UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

**ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS
INDUSTRIALES**

*Aspectos de la medición dinámica instantánea de emisiones de motores.
Aplicación al desarrollo de un equipo portátil y una metodología para estudios de
contaminación de vehículos en tráfico real.*

TESIS DOCTORAL

*Natalia Elizabeth Fonseca González
Ingeniero Mecánico
Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia*

2012

Edita e imprime: Sección de Publicaciones de la
Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales.
Universidad Politécnica de Madrid.

I.S.B.N: 978-84-695-6653-4
Depósito Legal: M-41263-2012

Sección de Publicaciones de la ETS de
Ingenieros Industriales
C/ José Gutiérrez Abascal, 2
28006 Madrid
E-mail: publicaciones@etsii.upm.es
Tf.: 91 336 30 68 – Fax: 91 336 30 69

DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA ENERGÉTICA Y FLUIDOMECÁNICA

*Aspectos de la medición dinámica instantánea de emisiones de motores.
Aplicación al desarrollo de un equipo portátil y una metodología para estudios
de contaminación de vehículos en tráfico real.*

*Natalia Elizabeth Fonseca González
Ingeniero Mecánico
Universidad de los Andes. Bogotá, Colombia*

Director:
Jesús Casanova Kindelán
Dr. Ingeniero Industrial

2012

Resumen

Esta Tesis Doctoral se encuadra en el ámbito de la medida de emisiones contaminantes y de consumo de combustible en motores de combustión interna alternativos cuando se utilizan como plantas de potencia para propulsión de vehículos ligeros de carretera, y más concretamente en las medidas dinámicas con el vehículo circulando en tráfico real.

En este ámbito, el objetivo principal de la Tesis es estudiar los problemas asociados a la medición en tiempo real con equipos embarcados de variables medioambientales, energéticas y de actividad, de vehículos ligeros propulsados por motores térmicos en tráfico real. Y como consecuencia, desarrollar un equipo y una metodología apropiada para este objetivo, con el fin de realizar consiguientemente un estudio sobre los diferentes factores que influyen sobre las emisiones y el consumo de combustible de vehículos turismo en tráfico real.

La Tesis se comienza realizando un estudio prospectivo sobre los trabajos de otros autores relativos al desarrollo de equipos portátiles de medida de emisiones (Portable Emission Measurement Systems – PEMS), problemas asociados a la medición dinámica de emisiones y estudios de aplicación en tráfico real utilizando este tipo de equipos. Como resultado de este estudio se plantea la necesidad de disponer de un equipo específicamente diseñado para ser embarcado en un vehículo que sea capaz de medir en tiempo real las concentraciones de emisiones y el caudal de gases de escape, al mismo tiempo que se registran variables del motor, del vehículo y del entorno como son la pendiente y los datos meteorológicos. De esta forma se establecen las especificaciones y condiciones de diseño del equipo PEMS. Aunque al inicio de esta Tesis ya existían en el mercado algunos sistemas portátiles de medida de emisiones (PEMS: Portable Emissions Measurement Systems), en esta Tesis se investiga, diseña y construye un nuevo sistema propio, denominado MIVCO – PEMS. Se exponen, discuten y justifican todas las soluciones técnicas incorporadas en el sistema que incluyen los subsistema de análisis de gases, subsistemas de toma de muestra incluyendo caudalímetro de gases de escape, el subsistema de medida de variables del entorno y actividad del vehículo y el conjunto de sistemas auxiliares. El diseño final responde a las hipótesis y necesidades planteadas y se valida en uso real, en banco de rodillos y en comparación con otros equipos de medida de emisiones estacionarios y portátiles.

En esta Tesis se presenta también toda la investigación que ha conducido a establecer la metodología de tratamiento de las señales registradas en tiempo real que incluye la

sincronización, cálculos y propagación de errores. La metodología de selección y caracterización de los recorridos y circuitos y de las pautas de conducción, preparación del vehículo y calibración de los equipos forma también parte del legado de esta Tesis.

Para demostrar la capacidad de medida del equipo y el tipo de resultados que pueden obtenerse y que son útiles para la comunidad científica, y las autoridades medioambientales en la parte final de esta Tesis se plantean y se presentan los resultados de varios estudios de variables endógenas y exógenas que afectan a las emisiones instantáneas y a los factores de emisión y consumo (g/km) como: el estilo de conducción, la infraestructura vial, el nivel de congestión del tráfico, tráfico urbano o extraurbano, el contenido de biocarburante, tipo de motor (diesel y encendido provocado), etc.

Las principales conclusiones de esta Tesis son que es posible medir emisiones másicas y consumo de motores de vehículos en uso real y que los resultados permiten establecer políticas de reducción de impacto medio ambiental y de eficiencia energética, pero, se deben establecer unas metodologías precisas y se debe tener mucho cuidado en todo el proceso de calibración, medida y postratamientos de los datos.

Abstract

This doctoral thesis is in the field of emissions and fuel consumption measurement of reciprocating internal combustion engines when are used as power-trains for light-duty road vehicles, and especially in the real-time dynamic measurements procedures when the vehicle is being driven in real traffic.

In this context, the main objective of this thesis is to study the problems associated with on-board real-time measuring systems of environmental, energy and activity variables of light vehicles powered by internal combustion engines in real traffic, and as a result, to develop an instrument and an appropriate methodology for this purpose, and consequently to make a study of the different factors which influence the emissions and the fuel consumption of passenger cars in real traffic.

The thesis begins developing a prospective study on other authors' works about development of Portable Emission Measurement Systems (PEMS), problems associated with dynamic emission measurements and application studies on actual traffic using PEMS. As a result of this study, it was shown that a measuring system specifically designed for being on-board on a vehicle, which can measure in real time emission concentrations and exhaust flow, and at the same time to record motor vehicle and environment variables as the slope and atmospheric data, is needed; and the specifications and design parameters of the equipment are proposed. Although at the beginning of this research work there were already on the market some PEMS, in this Thesis a new system is researched, designed and built, called MIVECO – PEMS, in order to meet such measurements needs. Following that, there are presented, discussed and justify all technical solutions incorporated in the system, including the gas analysis subsystem, sampling and exhaust gas flowmeter subsystem, the subsystem for measurement of environment variables and of the vehicle activity and the set of auxiliary subsystems. The final design meets the needs and hypotheses proposed, and is validated in real-life use and chassis dynamometer testing and is also compared with other stationary and on-board systems.

This thesis also presents all the research that has led to the methodology of processing the set of signals recorded in real time including signal timing, calculations and error propagation. The methodology to select and characterize of the routes and circuits, the driving patterns, and the vehicle preparation and calibration of the instruments and sensors are part of the legacy of this thesis.

To demonstrate the measurement capabilities of the system and the type of results that can be obtained and that are useful for the scientific community and the environmental authorities, at the end of this Thesis is presented the results of several studies of endogenous and exogenous variables that affect the instantaneous and averaged emissions and consumption factors (g/km), as: driving style, road infrastructure, the level of traffic congestion, urban and extra-urban traffic, biofuels content, type of engine (diesel or spark ignition) etc.

The main conclusions of this thesis are that it is possible to measure mass emissions and consumption of vehicle engines in actual use and that the results allow us to establish policies to reduce environmental impact and improve energy efficiency, but, to establish precise methodologies and to be very careful in the entire process of calibration, measurement and data post-treatment is necessary.

Agradecimientos

Primero que todo, quiero agradecer a Dios Nuestro Señor y a la Santísima Virgen por concederme el deseo de trabajar en investigación, de adelantar los estudios de doctorado y finalmente desarrollar esta tesis doctoral. Gracias por iluminarme en tantos momentos de dificultad que he tenido a lo largo de estos 6 años de trabajo casi ininterrumpido y por darme la fortaleza para culminar exitosamente esta etapa tan importante para mí.

En segundo lugar, quiero darle gracias a mi director de tesis el Dr. Jesús Casanova Kindelán, por confiar en mí al ofrecerme la oportunidad de trabajar en el proyecto de investigación que ha dado origen a esta tesis, por su dirección técnica, su apoyo y respaldo en todos estos años de intenso trabajo. Sin él esto no sería realidad.

En tercer lugar, quiero dar gracias a todos los becarios, estudiantes erasmus, estudiantes de proyecto fin de carrera de Ingeniero Industrial y máster en Ingeniería de Automoción del INSIA y técnicos del laboratorio de Motores Térmicos de la ETSII que han dado lo mejor de sí, encargándose del ensamblaje de los equipos y realización de los ensayos en tráfico real. Este trabajo sin duda ha sido el más duro, por las interminables horas dedicadas a la preparación de los equipos y realización de los ensayos muchas veces en condiciones difíciles. El trabajo de cada uno ha constituido una parte fundamental de lo que hoy se configura como mi tesis doctoral. Gracias de todo corazón y perdonadme mis desaciertos y enfados.

En cuarto lugar, quiero dar gracias a Endesa por concederme la beca que me permitió venir desde Colombia a adelantar los estudios de doctorado y al Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino por la subvención recibida para llevar a cabo este trabajo de investigación: inicialmente 3 años dentro del Plan Nacional I+D+i y finalmente 2 años de subvención nominativa. También dar gracias a los miembros del equipo de Investigación de la Universidad de Alcalá de Henares y del Ciemat, con quienes compartimos los tres primeros años de trabajo como participantes del Proyecto de Investigación. Quiero agradecer también al personal del INSIA y del INTA por la ayuda en la realización de los ensayos en banco de rodillos.

Gracias a todos los del Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica de la ETSII – UPM por vuestra colaboración en estos años que he hecho parte vuestra como Investigadora contratada y gracias a mis compañeros del Departamento de Sistemas Energéticos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas de la UPM por su

ayuda y apoyo en este último año en el que he compaginado la docencia y la redacción de la tesis.

Gracias en especial a mi familia, sin su apoyo moral y ejemplo no habría sido capaz de llevar a cabo esta tesis doctoral que ha constituido para mí un verdadero reto.

Gracias a todos los que me habéis apoyado, acompañado y me habéis encomendado a Dios durante estos años... sin vuestro cariño y oración esto no habría sido posible: amigos... de Colombia, de la ETSII, de Pastoral Universitaria, de la Congregación Mariana de la Asunción, de la Milicia y Hogares de Santa María, Carmelitas Descalzas de Mansión de Paz (La Rioja) y de Santa Teresa (Madrid), de la Parroquia Santa Ángela de La Cruz, etc.

Gracias y que Dios os bendiga!

Tabla de Contenido

Resumen	i
Abstract	iii
Agradecimientos	v
Tabla de Contenido	vii
Lista de figuras	xv
Lista de tablas	xxix
Símbolos y abreviaciones	xxxiii
 Parte I: Introducción, estado del arte y fundamentos	 1
1 Introducción	3
1.1 Preámbulo.....	3
1.1.1 La contaminación atmosférica.....	3
1.1.2 El cambio climático.....	4
1.1.3 El transporte por carretera.....	5
1.1.4 Normativa sobre emisiones para el transporte por carretera.....	6
1.2 Justificación.....	7
1.3 Trabajos anteriores del equipo investigador.....	8
1.4 Objetivos e hipótesis de la Tesis Doctoral.....	10
1.4.1 Estudio de los problemas asociados a la medición embarcada de emisiones gaseosas y desarrollo de un equipo experimental.....	11
1.4.2 Estudio sobre los factores que influyen en las emisiones y el consumo de combustible de vehículos turismo en tráfico real.....	12

Tabla de contenido

1.5	Contribuciones	14
1.6	Plan de trabajo.....	17
1.7	Estructura y organización de la tesis	21
2	Estado del arte	23
2.1	Desarrollo de los sistemas embarcados de medida de emisiones - PEMS.....	24
2.2	Características de los principales sistemas PEMS desarrollados.....	27
2.3	Problemas asociados a la medición dinámica de emisiones	31
2.4	Metodología de medida de emisiones en tráfico real y de análisis de resultados	33
2.5	Proyectos de investigación sobre PEMS.....	36
2.5.1	Proyecto Europeo sobre Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones: Proyecto “EU-PEMS”	37
2.5.2	Proyecto OSCAR: On-board emission measurements in Central London (Boulter et al, 2006).....	39
2.5.3	Proyecto sobre evaluación de PEMS para inventario de emisiones y ensayos de certificación NTE en motores diésel de servicio pesado	41
2.5.4	Proyecto sobre determinación de errores de medida de factores de emisión usando PEMS para el programa de control de emisiones de motores pesados en uso (Heavy-Duty In-Use Testing – HDIUT)	44
3	Fundamentos	51
3.1	Formación de emisiones contaminantes en motores de combustión interna...	51
3.1.1	Mecanismo de formación de emisiones en los motores de encendido provocado	52
3.1.2	Mecanismo de formación de emisiones en los motores de encendido por compresión (motores diesel)	54
3.2	Técnicas para reducir las emisiones contaminantes en motores de combustión interna.....	57
3.2.1	Tecnologías que afectan el diseño del motor.....	58
3.2.2	Tecnologías de postratamiento de gases.....	61
3.3	Normativa de control de emisiones	65
3.3.1	Normativa europea de emisiones para vehículos ligeros	66
3.3.2	Normativa americana para vehículos pesados con equipos embarcados	68
Parte II: Medida de emisiones con equipos embarcados		71

4	Consideraciones generales sobre equipos portátiles de medida de emisiones - PEMS	73
4.1	Generalidades del MIVECO- PEMS	75
4.2	Ecuaciones básicas involucradas en los sistemas portátiles de medida de emisiones- PEMS	76
4.3	Subsistemas de un PEMS.....	78
4.4	Consideraciones generales de la normativa americana 40CFR parte 1065 subparte J sobre Sistemas portátiles de medida de emisiones - PEMS	79
4.4.1	Especificaciones técnicas generales de los equipos de medida involucrados en los PEMS	80
4.4.2	Calibración y verificación de un PEMS.....	81
4.5	Consideraciones generales de la normativa ISO 16183 sobre medida de emisiones gaseosas en muestra directa en Heavy-duty engines.....	81
5	Subsistema de Analizadores de gas y partículas	83
5.1	Pruebas de prestaciones de analizadores.....	84
5.1.1	Prueba de respuesta dinámica y frecuencia de muestreo	84
5.1.2	Prueba de exactitud, repetibilidad y ruido.....	88
5.2	Medida de concentración de NO _x	91
5.2.1	Tecnologías de medida de concentración de NO _x	91
5.2.2	Efecto de las condiciones de temperatura y humedad ambiente sobre las emisiones de NO _x	95
5.2.3	Equipos de medida de concentración de NO _x en el MIVECO-PEMS100	
5.2.4	Resultado de las pruebas de prestaciones de los analizadores NO _x que integran el MIVECO-PEMS.....	102
5.2.5	Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de NO _x 108	
5.3	Medida de concentración de CO	109
5.3.1	Tecnologías de medida de concentración de CO	109
5.3.2	Equipo de medida de concentración de CO en el MIVECO-PEMS..	111
5.3.3	Resultado de las pruebas de prestaciones del analizador de CO que integra el MIVECO-PEMS.....	111
5.3.4	Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de CO116	
5.4	Medida de concentración de CO ₂ y relación aire/combustible.....	117
5.4.1	Relación entre concentración de CO ₂ y relación aire/combustible.	117
5.4.2	Tecnologías de medida de concentración de CO ₂ y relación aire/combustible.....	128

5.4.3	Equipo de medida de concentración de CO ₂ y relación aire/combustible (factor λ) en el MIVECO-PEMS.....	130
5.4.4	Resultado de las pruebas de prestaciones del analizador de CO ₂ y del medidor lambda que integra el MIVECO-PEMS.....	131
5.4.5	Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de CO ₂	139
5.5	Medida de concentración de HC.....	140
5.5.1	Tecnologías de medida de concentración de HC.....	140
5.5.2	Equipos de medida de concentración de HC en el MIVECO-PEMS.....	142
5.5.3	Resultado de las pruebas de prestaciones del analizador de HC que integra el MIVECO-PEMS.....	144
5.5.4	Propuestas de mejora de prestaciones del conjunto analizador de HC que integra el MIVECO-PEMS.....	149
5.5.5	Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de HC.....	158
5.6	Medida de concentración de partículas.....	160
5.6.1	Tecnologías de medida de concentración de partículas.....	160
5.6.2	Equipo de medida de concentración de partículas en el MIVECO-PEMS.....	161
5.6.3	Resultado de pruebas de prestaciones del analizador de partículas en el MIVECO-PEMS.....	162
5.6.4	Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de partículas.....	163
6	Subsistema de medida de caudal y variables termodinámicas	165
6.1	Medida de temperatura del gas de escape.....	168
6.1.1	Tecnologías de medida de temperatura.....	168
6.1.2	Sensores de temperatura usadas en el MIVECO-PEMS.....	170
6.2	Medida de presión de gas de escape.....	170
6.2.1	Tecnologías de medida de presión.....	170
6.2.2	Sensores de presión utilizados en el MIVECO-PEMS.....	171
6.3	Medida de caudal de gas de escape.....	172
6.3.1	Tecnologías de medida de caudal de gases de escape.....	172
6.3.2	Teoría sobre flujo pulsante.....	175
6.3.3	Caudalímetros de tubo de Pitot.....	177
6.3.4	Caudalímetro del MIVECO-PEMS.....	182
6.3.5	Resultado de las pruebas de prestaciones del caudalímetro MIVECO-PEMS.....	198

6.3.6	Conclusiones sobre problemas en la medida de caudal	201
7	Subsistema de medida de variables del motor y vehículo, variables ambientales y variables de infraestructura	203
7.1	Medida de variables de motor.....	203
7.1.1	Medida de régimen de motor.....	203
7.1.2	Medida de temperatura de aceite y temperatura de refrigerante.....	205
7.2	Medida de actividad del vehículo	206
7.2.1	Medida de posición de pedales	206
7.2.2	Medida de velocidad.....	207
7.3	Medida de variables ambientales	210
7.4	Medida de variables de infraestructura.....	211
7.5	Conclusiones generales sobre medida de variables de motor, actividad del vehículo, variables ambientales y de infraestructura.....	215
8	Subsistema de adquisición, registro y posprocesado de datos	217
8.1	Subsistema de adquisición, registro y acondicionamiento de señales	217
8.1.1	Frecuencia de muestreo y de registro	218
8.1.2	Calibración de señales	220
8.1.3	Sincronización de señales	220
8.1.4	Propagación de errores en la adquisición y registro	222
8.2	Subsistema de posprocesamiento de datos.....	225
8.2.1	Cálculo del caudal másico de emisiones	225
8.2.2	Cálculo de consumo instantáneo.....	227
8.2.3	Cálculo de variables dinámicas secundarias (aceleraciones y marcha) .	229
8.2.4	Cálculo de la potencia de tracción y potencia motor instantánea.....	230
8.2.5	Cálculo de factores de emisión y de consumo	234
8.2.6	Cálculo de rendimiento global	234
8.2.7	Caracterización de los ensayos.....	235
8.3	Conclusiones generales sobre el subsistema de adquisición, registro y posprocesamiento de datos.....	236
9	Validación del equipo MIVECO-PEMS	239
9.1	Validación de la medida equipo MIVECO-PEMS en laboratorio oficial de certificación de emisiones de vehículos.....	240
9.2	Conclusiones generales sobre los ensayos de validación	243

Parte III: Aplicación del equipo MIVECO-PEMS al estudio de emisiones contaminantes y consumo de vehículos en tráfico real	245
10 Metodología de medida de emisiones en tráfico real	247
10.1 Introducción	247
10.2 Planteamiento general	248
10.3 Diseño del ensayo	249
10.4 Preparación de los ensayos	252
10.5 Realización de los ensayos	254
10.6 Posprocesamiento de datos	256
10.7 Análisis de resultados	258
11 Influencia de Factores Exógenos sobre el consumo de combustible y emisiones	259
11.1 Metodología	259
11.1.1 Metodología ensayos con turismos diésel en tráfico urbano	259
11.1.2 Metodología ensayos con turismos gasolina en tráfico urbano	261
11.1.3 Metodología ensayos en tráfico extraurbano	262
11.2 Factores exógenos	263
11.2.1 Estilo de conducción	264
11.2.2 Infraestructura vial	268
11.2.3 Nivel de tráfico	269
11.3 Influencia de los factores exógenos en turismos diesel en tráfico urbano	271
11.4 Influencia de los factores exógenos en turismos gasolina en tráfico urbano ..	280
11.5 Influencia de los factores exógenos en turismos diesel en tráfico extraurbano	289
11.6 Otros estudios de influencia de factores exógenos	295
11.6.1 Influence of the stop/start system on CO ₂ emissions of a diesel vehicle in urban traffic. (Fonseca et al, 2011a)	295
11.6.2 Influencia del contenido de Biodiésel en gasóleo en el rendimiento térmico de un motor diésel ligero ensayado en tráfico real. (Fonseca et al, 2011b)	295
11.6.3 Environmental assessment of low speed policies for motor vehicle mobility in city centres. (Casanova y Fonseca, 2012)	296
11.7 Conclusiones	297
12 Influencia de los factores endógenos sobre el consumo de combustible y emisiones	301
12.1 Estudio en banco de rodillos	301

12.1.1 Influencia de la marcha.....	302
12.1.2 Ciclo de conducción NEDC en turismos diésel	304
12.1.3 Ciclo de conducción NEDC en turismos gasolina	306
12.2 En tráfico real.....	307
12.2.1 Vehículos diésel en tráfico urbano	307
12.2.2 Turismos gasolina en tráfico real.....	310
12.2.3 Turismos diésel en tráfico extraurbano	313
12.3 Conclusiones	316
Parte IV: Conclusiones y trabajos futuros	319
13 Conclusiones generales	321
13.1 Conclusiones sobre el estudio de los problemas asociados a la medición embarcada de emisiones gaseosas y desarrollo de un equipo experimental ...	321
13.1.1 Objetivo 1	321
13.1.2 Objetivo 2	325
13.1.3 Objetivo 3	326
13.2 Conclusiones sobre los factores que influyen en las emisiones y el consumo de combustible en tráfico real.....	327
13.2.1 Objetivo 4	327
13.2.2 Objetivo 5	328
13.2.3 Objetivo 6	330
14 Trabajos futuros	333
Referencias Bibliográficas	335
ANEXOS	355
A Difusión de resultados	357
A.1 Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel- Powered Passenger Car” (Fonseca et al, 2010).....	359
A.2 Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions. (Casanova et al, 2009).....	367
A.3 Influence of the stop/start system on CO2 emissions of a diesel vehicle in urban traffic. (Fonseca et al, 2011a)	379

Tabla de contenido

A.4	Influencia del contenido de Biodiésel en gasóleo en el rendimiento térmico de un motor diésel ligero ensayado en tráfico real. (Fonseca et al, 2011b).....	389
A.5	Environmental assessment of low speed policies for motor vehicle mobility in city centres. (Casanova y Fonseca, 2012).....	403
A.6	Solicitud de patente española. Dispositivo Universal, no intrusivo, de medida en tiempo real de emisiones contaminantes de motores embarcable en vehículos. (Casanova y Fonseca, 2010c).....	415

Lista de figuras

Figura 1-1: Evolución de la temperatura de la tierra 1850-2010. (Adaptado de Payri et al, 2011)	4
Figura 1-2: Límites europeos de emisión de partículas (PM) y óxidos de nitrógeno (NO _x) en vehículos ligeros diesel (turismos y furgonetas).....	6
Figura 1-3: Ciclo Madrid. Desarrollado por la UPM. (Casanova et al., 2001)	9
Figura 2-1: Publicaciones científicas relacionadas con la medida de emisiones con equipos embarcados.	23
Figura 2-2: Sistema portátil de medida de emisiones. U.S.A. año 1956. CRC (Coordinating Research Council) Project CM-4-58. (Shah, 2007)	25
Figura 2-3: Sistemas PEMS comerciales. a) SEMTECH-DS de Sensors. b) Axion de Clean Air Technologies International Inc. c) OBS-2200 de Horiba.	30
Figura 3-1: Resumen del mecanismo de formación de emisiones en motores de encendido provocado. Adaptación de (Heywood, 1988).	52
Figura 3-2: Variación de la concentración de HC, CO y NO en los gases de escape de un motor convencional de encendido provocado. Adaptación de (Pundir, 2007).....	54
Figura 3-3: Resumen del mecanismo de formación de emisiones en motores de encendido por compresión. Adaptación de (Heywood, 1988).	55
Figura 3-4: Comparación de emisiones de NO _x y CO entre motores diesel de inyección directa (DI) e inyección indirecta (IDI). Adaptado de (Pundir, 2007).....	56
Figura 3-5: Curva de tendencia ("trade-off") de emisiones de NO _x y de partículas en un motor diesel y soluciones técnicas para su reducción.	57
Figura 3-6: Zonas de emisión de NO _x y partículas en la gráfica de dosado relativo local – temperatura local. Adaptado de (Payri et al, 2011).....	59

Lista de figuras

Figura 3-7: Recirculación de gases de escape en motores diésel con turbo-sobrealimentación.	60
Figura 3-8: Estructura de un catalizador de escape de monolito cerámico.	61
Figura 3-9: Rendimiento de la conversión de CO, HC y NO _x de un catalizador con mezcla homogénea.	62
Figura 3-10: Rendimiento de conversión de catalizadores de oxidación típicos. Adaptado de (Pundir, 2007).	62
Figura 3-11: Esquemas de las instalaciones y equipos para medida de emisiones de vehículos ligeros con motor diésel. Adaptado de (Payri et al, 2011).	66
Figura 3-12: Esquemas de las instalaciones y equipos para medida de emisiones de vehículos ligeros con motor gasolina. Adaptado de (Payri et al, 2011).	66
Figura 3-13: Ciclo europeo de medida de emisiones NEDC. a) Parte urbana UCD. b) Parte extraurbana EUCD.	67
Figura 3-14: Zona básica de control NTE.	69
Figura 5-1: La respuesta típica de un sistema de 2º orden sobre-amortiguado a un escalón unitario.	84
Figura 5-2: Fotografías del montaje realizado para la prueba de tiempo de respuesta y tiempo de retardo.	86
Figura 5-3: Esquema del montaje realizado para la prueba de tiempo de respuesta y tiempo de retardo.	87
Figura 5-4: Esquema del montaje realizado para la prueba de tiempo de respuesta y tiempo de retardo.	88
Figura 5-5: Fotografía del montaje realizado para los ensayos de validación del MIVECO-PEMS en el banco de rodillo del INSIA.	90
Figura 5-6: Esquema de un analizador de quimioluminiscencia (CLD). (Adaptado de Pundir, 2007)	92
Figura 5-7: Esquema de un sensor de NO _x de óxido de zirconio (Adaptado de Shade, 2000)	95
Figura 5-8: Carta psicrométrica. Adaptado de (Miranda, 1996).	96
Figura 5-9: Comparación entre las expresiones empíricas para corregir las emisiones de NO _x en motores diésel por efecto de la humedad y temperatura. A) Gráfica en función de la temperatura ambiental. B) Gráfica en función de la humedad relativa	99

Figura 5-10: Comparación entre diferentes factores de corrección de NO _x aplicados a un ensayo real. Renault Laguna modelo 2005. 28/07/09 (33°C y 24% HR).....	100
Figura 5-11: Analizadores NO _x . a) Horiba MEXA 720 NO _x . b) Sensors AGM 400...	102
Figura 5-12: Respuesta escalón MEXA 720 NO _x	103
Figura 5-13: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida NO _x ensayo de validación 1133.	104
Figura 5-14: Comparación entre medidas instantáneas de NO _x . MIVECO-PEMS (MEXA 720 NO _x) & OBS-2200.....	105
Figura 5-15: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida de NO _x con base en las medidas MIVECO-PEMS corregidas.	106
Figura 5-16: Detalle de medida instantánea para cálculo de precisión. Comparación MIVECO-PEMS con el equipo OBS-2200. Corresponde a medida real de NO _x (ppm) del intervalo 2 (I ₂) ensayo 1133.....	107
Figura 5-17: Espectro Infrarrojo del agua. Adaptado de (Bonuccelli, 2006)	110
Figura 5-18: Configuración de un h-NDIR. Adaptado de (Nakamura et al, 2002)	110
Figura 5-19: Respuesta dinámica medida de CO, analizador Signal 9000 MGA.	112
Figura 5-20: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1046.....	112
Figura 5-21: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1106.....	113
Figura 5-22: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1133.....	113
Figura 5-23: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1203.....	114
Figura 5-24: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1231.....	114
Figura 5-25: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1321.....	114
Figura 5-26: Detalle de un intervalo de medida instantánea de CO para cálculo de exactitud, repetibilidad y precisión. Ensayo de validación 1046.....	115
Figura 5-27: Composición del gas de escape en motores de encendido provocado. Combustible: gasolina e isooctano H/C entre 2 y 2,25. Adaptado de (Heywood, 1988).	124
Figura 5-28: Curva de respuesta Sonda lambda. a) Dos estados- EGO. b) Proporcional UEGO. Adaptado de (Pundir, 2007).....	129

Lista de figuras

Figura 5-29: Sonda lambda convencional: a) sin calentamiento -EGO. b) con calentamiento HEGO. Adaptado de (Pundir, 2007).....	129
Figura 5-30: Estructura de la sonda lambda universal. Adaptado de (Nevot, 2000).	130
Figura 5-31: Medidor relación aire/combustible MIVECO-PEMS. Lambda Meter LA4 marca ETAS.....	131
Figura 5-32: Respuesta dinámica medida de CO ₂ , analizador Signal 9000 MGA.	131
Figura 5-33: Respuesta dinámica medidor lambda LA4 marca ETAS.....	132
Figura 5-34: Instalación utilizada para verificación de la calibración del analizador Signal 9000 MGA.	133
Figura 5-35: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida de CO ₂ ensayo de validación 1133. Analizador Signal 9000 MGA.	134
Figura 5-36: Gráfica de comparación datos instantáneos CO ₂ , analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del INSIA.	135
Figura 5-37: Gráfica de comparación datos instantáneos CO ₂ , analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del INSIA. Ensayo de validación 1133.	135
Figura 5-38: Gráfica de comparación datos instantáneos CO ₂ , analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del CIEMAT. Ensayo 1215 del 09 de julio-09.....	136
Figura 5-39: Gráfica de ajuste de tendencia CO ₂ para corrección de efecto del contenido de humedad sobre la medida directa de CO ₂ en muestra húmeda del analizador Signal 9000 MGA.	137
Figura 5-40: Gráfica de comparación datos instantáneos CO ₂ corregidos, analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del CIEMAT. Ensayo 1215 del 9/jul/2009.	138
Figura 5-41: Detalle de la gráfica de comparación datos instantáneos CO ₂ corregidos, analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del CIEMAT. Ensayo 1215 del 9/jul/2009.	138
Figura 5-42: Esquema de un analizador de ionización de llama (FID) para medida de HC.....	142
Figura 5-43: Analizador de HC ThermoFID-PT marca Mess & Analysentechnik M&A GMBH que conforma el equipo MIVECO-PEMS.....	144
Figura 5-44: Respuesta escalón unitario analizador de HC ThermoFID-PT.....	144
Figura 5-45: Tubo de muestreo MIVECO-PEMS. Detalle de la línea de muestreo del analizador de HC ThermoFID-PT. Incluye línea calefactada y filtro.	146

Figura 5-46: Efecto de los accesorios sobre la respuesta escalón unitario analizador ThermoFID-PT.	146
Figura 5-47: Efecto de la calefacción del filtro sobre la medida de HC.	147
Figura 5-48: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida HC ensayo de validación 1133.	148
Figura 5-49: Filosofía de reconstrucción de la señal $x(n)$ usando deconvolución.	149
Figura 5-50: Diagrama esquemático del filtro y de la línea calefactada.	150
Figura 5-51: Comparación respuesta escalón real y modelo simplificado del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS.	153
Figura 5-52: Variables que intervienen en la obtención del modelo de emisiones	155
Figura 5-53: Comparación entre medida HC_MIVECO_1 (azul), medida de referencia HC_OBS_1 (negro) y concentración estimada HC_ESTIM_1 (rojo).	157
Figura 5-54: Validación del modelo a partir de un ensayo diferente al utilizado para la obtención del modelo.	157
Figura 5-55: Comparación entre medida HC_MIVECO_2 (azul), medida de referencia HC_OBS_2 (negro) y concentración estimada HC_ESTIM_2 (verde).	157
Figura 5-56: Figura esquemática medidor de partículas EEPS.	161
Figura 5-57: Analizador de partículas MAHA MPM-4 incluido en el MIVECO-PEMS.	162
Figura 5-58: Concentración de partículas en tramo final de ciclo NEDC medido con el analizador MAHA MPM-4 incluido en el MIVECO-PEMS. Ensayo de validación 1203.	163
Figura 6-1: Esquema de medida de emisiones en banco de rodillos.	166
Figura 6-2: No linealidad entre el caudal y presión diferencial. Adaptación de (Silvis et al 2003)	173
Figura 6-3: Esquema de un tubo de Pitot convencional o tubo Prandtl.	177
Figura 6-4: Esquema de un tubo de Pitot de velocidad media o Averaging Pitot tube. Adaptado de (Laurantzon, 2010).	178
Figura 6-5: Condiciones de remanso. Adaptado de (Zucrow & Hoffman, 1976).	178
Figura 6-6: Perfiles de velocidad en un tubo de sección circular, para flujo turbulento y flujo laminar. Adaptado de (Zucrow & Hoffman, 1976)	179

Lista de figuras

Figura 6-7: Esquema de flujo inverso en tubo de pitot en flujo turbulento $Re > 10^5$. Adaptado de (Douglas et al, 1979).	181
Figura 6-8: Montaje utilizado para las pruebas de verificación del caudalímetro comercial en condiciones estacionarias.....	182
Figura 6-9: Montaje utilizado para las pruebas de validación en banco de motor.	183
Figura 6-10: Medida errónea de caudalímetro comercial en banco de motor. Prueba con motor diésel IVECO 6,7 L a 1600 min^{-1} , 40 Nm.....	183
Figura 6-11: Prueba de verificación del caudalímetro comercial con un Peugeot 205 gasolina.	184
Figura 6-12: Esquema de medida de emisiones en banco de rodillos.....	185
Figura 6-13: Acondicionamiento flujo en el equipo MIVECO-PEMS. a) Tubo de toma de muestra. b) Detalle del enderezador de flujo.....	185
Figura 6-14: Caudalímetro tipo Pitot, equipo MIVECO-PEMS.	186
Figura 6-15: Efecto de vibraciones sobre el medidor de presión diferencial que integra el MIVECO-PEMS	187
Figura 6-16: Calibración del sensor de presión diferencial BD SENSORS que integra el equipo MIVECO-PEMS.	187
Figura 6-17: Calibración con flujo estacionario caudalímetro tipo Pitot, equipo MIVECO-PEMS.	188
Figura 6-18: Montaje utilizado para las pruebas de verificación del caudalímetro MIVECO con flujo pulsante.....	189
Figura 6-19: Comparación de caudal másico instantáneo en régimen pulsante con caudal medio. Turismo diésel 2000 cm^3 (P406) y turismo gasolina 1100 cm^3 (P205).....	189
Figura 6-20: Comparación de medida de caudal másico instantáneo en régimen pulsante con medida de caudal másico medio. Turismo diésel 2000 cm^3 (P406) y turismo gasolina 1100 cm^3 (P205).	190
Figura 6-21: Caudal instantáneo en condiciones estandar de gases de escape en condiciones de vacío. Peugeot 406 BK STD T 2.1.....	191
Figura 6-22: Caudal instantáneo de gases de escape a velocidad constante. Peugeot 406 BK STD T 2.1	191
Figura 6-23: Efecto de frecuencia de adquisición y cálculo de caudal de gases de escape en condiciones de ralenti.....	192

Figura 6-24: Comparación de medida de presión diferencial instantánea del pitot a ralentí. Turismo diésel 2000 cm ³ (P406) y turismo gasolina 1100 cm ³ (P205).	193
Figura 6-25: Onda de Presión diferencial. Comparación entre la onda real medida y onda reconstruida. Turismo diésel 2000 cm ³ (P406).	196
Figura 6-26: Instalación del caudalímetro en un turismo.	196
Figura 6-27: Efecto de la extensión y curvatura del tubo de extensión sobre la onda de presión diferencial. a) Presión diferencial ensayos 1,2 y 3. b) Desviación estándar ensayos 1,2 y 3. c) Presión diferencial ensayos 2, 4 y 5. d) Desv.estándar ensayos 2, 4 y 5	197
Figura 6-28: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida de caudal. Ensayo de validación 1133. Caudalímetro MIVECO-PEMS.	199
Figura 6-29: Ensayo de validación 1133, parte urbana ciclo NEDC. Caudalímetro MIVECO-PEMS. Turismo diésel de 2000 cm ³ (Peugeot 406).	200
Figura 6-30: Ensayo de validación ciclo NEDC. Caudalímetro MIVECO-PEMS. Turismo gasolina de 1100 cm ³ (Toyota Yaris 2000).	200
Figura 7-1: Instalación del medidor de régimen de motor, que integra el MIVECO-PEMS.	204
Figura 7-2: Ejemplo de medida real de régimen de motor & caudal de gases de escape. MIVECO-PEMS.	205
Figura 7-3: Medida de temperatura del motor en el MIVECO-PEMS. a) Temperatura de aceite. b) Temperatura de refrigerante.	205
Figura 7-4: Ejemplo de medida real de temperatura de aceite y de refrigerante del motor. MIVECO-PEMS.	206
Figura 7-5: Potenciómetros para la medida de posición de los pedales. Utilizados durante la primera fase de desarrollo del MIVECO-PEMS.	207
Figura 7-6: Medida real de posicionamiento con GPS integrado en el MIVECO-PEMS.	208
Figura 7-7: Radar Delta DRS1000 de la marca GMH Engineering, integrado en el equipo MIVECO-PEMS.	209
Figura 7-8: Comparación entre medida de velocidad por GPS y por radar. Equipo MIVECO-PEMS.	209
Figura 7-9: Calibración del radar con el GPS. Equipo MIVECO-PEMS.	210

Lista de figuras

Figura 7-10: Estación meteorológica SKYWATCH GEOS 11 que integra el equipo MIVECO-PEMS.	210
Figura 7-11: Medida de velocidad de viento frontal versus velocidad del vehículo. Equipo MIVECO-PEMS.	211
Figura 7-12: Medida de pendiente con giróscopo versus pendiente calculada con base en la altitud. Equipo MIVECO-PEMS.	211
Figura 7-13: Metodología para determinación del perfil topográfico.	214
Figura 7-14: Pendiente calculada según metodología MIVECO-PEMS.	214
Figura 7-15: Medida de altitud. Comparación entre medidas con base a la estación meteorológica y a planos cartográficos.	215
Figura 8-1: Variación del dosado y régimen del motor en turismos durante tráfico urbano. Ensayo realizado con el equipo MIVECO-PEMS a 100 Hz.	219
Figura 8-2: Densidad espectral de energía del caudal de gases de escape. Medidas realizadas con MIVECO-PEMS a 100 Hz.	219
Figura 8-3: Densidad espectral de energía de la relación aire/combustible relativa (λ). Medidas realizadas con MIVECO-PEMS a 100 Hz.	220
Figura 8-4: Esquema de tiempo de retraso de señales. Adaptado de Aríztegui, 2005. ...	221
Figura 8-5: Ejemplo de medidas realizadas con el equipo MIVECO-PEMS. a) Señales no sincronizadas. B) Señales sincronizadas.	222
Figura 8-6: Curvas de aceleración instantánea con el equipo MIVECO-PEMS. Ensayo en tráfico real, Seat León 2.0 L.	229
Figura 8-7: Determinación de la marcha instantánea en el MIVECO PEMS. Ensayo en tráfico real, Seat León 2.0 L.	230
Figura 8-8: Coeficiente de rodadura para turismos sobre pavimento de hormigón/asfalto.	231
Figura 8-9: Esquema general de un banco de rodillos inercial. Fotografía del detalle del contacto del neumático con el rodillo.	232
Figura 8-10: Curva de potencia de tracción real obtenida en banco de rodillos inercial. Peugeot 407 2.0 HDI. Datos reales cortesía de Motorpress Ibérica.	233
Figura 9-1: Fotografía de la validación del equipo MIVECO-PEMS.	240
Figura 9-2: Consumo de combustible. Resultados de validación equipo MIVECO-PEMS en laboratorio oficial de certificación de emisiones INTA.	241

Figura 9-3: Factor de emisión de CO ₂ , CO, HC y NO _x . Resultados de validación equipo MIVECO-PEMS en laboratorio oficial de certificación de emisiones INTA. Ciclo NEDC, Peugeot 406 2 lt, Euro 2.	242
Figura 10-1: Fotografías de medida de emisiones en tráfico real con el equipo MIVECO-PEMS.	247
Figura 10-2: Esquema general metodología de ensayos de emisiones en tráfico real.	249
Figura 10-3: Fotografía de instalación del equipo MIVECO-PEMS.	253
Figura 10-4: Proceso de calibración del equipo MIVECO-PEMS.	255
Figura 11-1: Circuitos utilizados para estudio de influencia de factores exógenos en turismos diésel. a) Circuito Madrid (CM0) y b) Circuito Tetuán (LR1).	260
Figura 11-2: Circuito utilizado para estudio de influencia de factores exógenos en turismos gasolina. Circuito Tetuán modificado (LR1mod).	261
Figura 11-3: Circuito Torrelodones.	262
Figura 11-4: Perfil orográfico circuito Torrelodones.	262
Figura 11-5: Aceleración media en tráfico real urbano por tipo de conducción.	265
Figura 11-6: Distribución de probabilidad del $ID_{diésel}$ de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.	266
Figura 11-7: Distribución de probabilidad del $ID_{gasolina}$ de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.	267
Figura 11-8: Distribución de probabilidad del ID , de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.	270
Figura 11-9: Relación entre estilo de conducción y velocidad media de circulación.	270
Figura 11-10: Velocidad media de circulación en función del Índice de tráfico y del tipo de calle.	271
Figura 11-11: Distribución de probabilidad del ID , de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.	273
Figura 11-12: Influencia del estilo de conducción sobre el factor de emisión de CO ₂ para el vehículo Renault Laguna 2005 en tráfico real urbano. Tendencias calculadas para pendiente del 0%	273

Lista de figuras

Figura 11-13: Influencia de la velocidad media de circulación, la pendiente y el estilo de conducción sobre el factor de emisión de CO ₂ para el vehículo Renault Laguna 2005 en tráfico real urbano.....	273
Figura 11-14: Distribución de probabilidad del ID, de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.	274
Figura 11-15: Resumen global de la influencia del estilo de conducción sobre el factor de consumo de turismos diésel en tráfico real urbano.	275
Figura 11-16: Resumen global de la influencia del estilo de conducción sobre el factor de emisión de CO ₂ de turismos diésel en tráfico real urbano.....	276
Figura 11-17: Influencia del comportamiento dinámico del conductor sobre el factor de emisión de NO _x	276
Figura 11-18: Influencia del comportamiento dinámico del conductor sobre el factor de emisión de NO _x	277
Figura 11-19: Factor de emisión de NO _x , comparación entre los diferentes vehículos ensayados.....	278
Figura 11-20: Factor de emisión de NO _x , comparación entre los diferentes vehículos ensayados.....	278
Figura 11-21: Factor de emisión de CO, comparación entre los diferentes vehículos ensayados.....	279
Figura 11-22: Factor de emisión de HC, comparación entre los diferentes vehículos ensayados.....	280
Figura 11-23: Comparación del factor de consumo, turismos gasolina.....	281
Figura 11-24: Comparación del factor de emisión de CO ₂ , turismos gasolina	282
Figura 11-25: Influencia de estilo de conducción, pendiente y velocidad media sobre el factor de consumo para el vehículo Yaris 2010 con sistema Stop/Start inhibido (Y2010-OFF)	283
Figura 11-26: Influencia de la velocidad media y estilo de conducción. Comparación entre el Y2000 y el Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON) y deshabilitado (Y2010-OFF).....	283
Figura 11-27: Factor de Consumo turismo gasolina <1,4 L según Copert 4 para Euro 2 en comparación con datos reales del turismo gasolina Y 2000.....	284
Figura 11-28: Factor de Consumo turismo gasolina <1,4 L según Copert 4 para Euro 5 en comparación con datos reales del turismo gasolina Y 2010.....	284

Figura 11-29: Factor de emisión de NO_x en vehículos gasolina. Comparación entre el Y2000 y el Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON) y deshabilitado (Y2010-OFF).....	285
Figura 11-30: Factor de emisión de NO_x en turismos gasolina EURO 2. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2000.....	285
Figura 11-31: Factor de emisión de NO_x en turismos gasolina EURO 5. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2010-ON.....	286
Figura 11-32: Factor de emisión de CO en vehículos gasolina. Comparación entre el Y2000 y el Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON) y deshabilitado (Y2010-OFF).....	287
Figura 11-33: Factor de emisión de CO en turismos gasolina EURO 2. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2000.....	287
Figura 11-34: Factor de emisión de CO en turismos gasolina EURO 5. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2010-ON.....	287
Figura 11-35: Factor de emisión de HC en vehículos gasolina. Comparación entre el Y2000 y el Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON) y deshabilitado (Y2010-OFF).....	288
Figura 11-36: Factor de emisión de HC en turismos gasolina EURO 2. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2000.....	289
Figura 11-37: Factor de emisión de HC en turismos gasolina EURO 5. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2010-ON.....	289
Figura 11-38: Factor de consumo en tráfico extraurbano. Turismo diésel Euro 2 IDI.	290
Figura 11-39: Grado de ajuste del factor de consumo en tráfico extraurbano - ecuación (11-13). Turismo diésel Euro 2 IDI.....	291
Figura 11-40: Rendimiento global del vehículo diésel Euro 2 en tráfico urbano.....	291
Figura 11-41: Factor de emisión de NO_x en turismo diésel EURO 2. Comparación entre el factor usado Copert 4 y datos reales medidos.....	292
Figura 11-42: Relación entre el factor de emisión de NO_x y el factor de emisión de CO_2 en un turismo diésel EURO 2 en tráfico extraurbano.....	292
Figura 11-43: Factor de emisión de CO en un turismo diésel en tráfico extraurbano Euro 2 IDI. Comparación con el factor usado en metodología Copert 4.....	293
Figura 11-44: Factor de emisión de HC en un turismo diésel en tráfico extraurbano Euro 2 IDI. Comparación con el factor usado en metodología Copert 4.....	293

Lista de figuras

Figura 11-45: Factor de emisión de partículas en un turismo diésel en tráfico extraurbano Euro 2 IDI. Comparación con el factor usado en metodología Copert 4.294	
Figura 11-46: Relación entre el factor de emisión de partículas y el factor de consumo en un turismo diésel en tráfico extraurbano Euro 2 IDI.....	294
Figura 12-1: Ensayos de validación en banco de rodillos INSIA.	302
Figura 12-2: Caudal de gases de escape medido con MIVECO-PEMS durante los ensayos en banco de rodillos.	302
Figura 12-3: Consumo y emisiones instantáneas. Comparación a velocidad constante con diferente marcha. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.	303
Figura 12-4: Consumo y factores de emisión medios turismo diésel P406 2L IDI. Comparación en diferentes condiciones de velocidad constante con diferentes marchas.	304
Figura 12-5: Emisiones y consumo instantáneo medido con equipo MIVECO-PEMS. Ciclo NEDC. Turismo diésel Peugeot 406 2L.....	305
Figura 12-6: Emisiones y consumo instantáneo medido con equipo MIVECO-PEMS. Ciclo NEDC, Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.	306
Figura 12-7: Consumo instantáneo medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.	308
Figura 12-8: Emisión másica instantánea de NO _x medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.	308
Figura 12-9: Emisión másica instantánea de CO y dosado relativo medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.	309
Figura 12-10: Emisión másica instantánea de HC y dosado relativo medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.	309
Figura 12-11: Consumo instantáneo medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.....	310
Figura 12-12: Consumo acumulado medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.....	310
Figura 12-13: Emisión másica instantánea y dosado medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2010.	311
Figura 12-14: Emisión másica instantánea de NO _x y dosado medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.....	311

Figura 12-15: Emisión másica instantánea de CO y dosado medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.....	312
Figura 12-16: Emisión másica instantánea de CO y dosado medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2010.....	312
Figura 12-17: Emisión másica instantánea de HC medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Comparación Toyota Yaris 2000 y Yaris 2010.....	313
Figura 12-18: Registro instantáneo de velocidad, régimen de giro, consumo y dosado relativo de un tramo de acceso a autopista A6 usando equipo MIVECO-PEMS. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.	314
Figura 12-19: Consumo y emisión másica instantánea de NO _x medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico extraurbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L.....	314
Figura 12-20: Emisión másica instantánea de CO y HC medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico extraurbano. Turismo diésel Peugeot 406.....	315

Lista de tablas

Tabla 1.1 Cronograma del plan de trabajo.....	20
Tabla 2.1 Características técnicas comparativas de PEMS disponibles en el mercado mundial.....	28
Tabla 2.2 Porcentajes de error en factores de emisión específica determinados experimentalmente para pruebas NTE medido con PEMS con relación a equipos de laboratorio normalizados.....	44
Tabla 2.3 Pruebas de verificación para equipos de laboratorio y PEMS usados en Proyecto de determinación de errores de medida en programa HDIUT	47
Tabla 2.4 Magnitud del término de error en condiciones estacionarias	47
Tabla 2.5 Magnitud del término de error en condiciones transitorias	47
Tabla 2.6 Magnitud del término de error en la medida de caudal.	48
Tabla 2.7 Magnitud del término de error debido a la falta de sincronización entre las señales.....	48
Tabla 2.8 Resultados del modelo Montecarlo y de la validación.	48
Tabla 3.1 Técnicas de reducción de emisiones con base en el sistema de inyección.....	60
Tabla 3.2 Comparación de las tecnologías de postratamiento.....	64
Tabla 3.3 Límites de emisión en g/km. Normativa europea para vehículos turismo (Categoría M1).....	68
Tabla 4.1 Características técnicas de los instrumentos de medida utilizados en el equipo MIVECO-PEMS	76
Tabla 4.2 Recomendaciones mínimas para los equipos de medida de los PEMS según normativa americana 40CFR 1065-J	80

Tabla 5.1 Pruebas de validación MIVECO-PEMS en banco de rodillo del INSIA.....	91
Tabla 5.2 Especificaciones técnicas del coche ensayado en banco de rodillos INSIA....	91
Tabla 5.3 Comparación de analizadores de NO _x disponibles en el mercado español. .	101
Tabla 5.4 Parámetros de respuesta dinámica analizador de NO _x MEXA 720.....	103
Tabla 5.5 Ruido del MEXA 720 NO _x	103
Tabla 5.6 Exactitud del MEXA 720 NO _x	104
Tabla 5.7 Exactitud corregida del MEXA 720 NO _x	106
Tabla 5.8 Repetibilidad del MEXA 720 NO _x (medidas corregidas).....	107
Tabla 5.9 Precisión del MEXA 720 NO _x	108
Tabla 5.10 Parámetros de la respuesta dinámica medida de CO, analizador Signal 9000 MGA.....	112
Tabla 5.11 Ruido del analizador CO MIVECO-PEMS (Signal 9000 MGA).....	115
Tabla 5.12 Exactitud del analizador CO MIVECO-PEMS (Signal 9000 MGA).	116
Tabla 5.13 Repetibilidad del analizador CO MIVECO-PEMS (Signal 9000 MGA).	116
Tabla 5.14 Parámetros de la respuesta dinámica medida de CO ₂ , analizador Signal 9000 MGA.....	132
Tabla 5.15 Parámetros de la respuesta dinámica medidor lambda LA4 marca ETAS. .	132
Tabla 5.16 Ruido en la medida de CO ₂ , analizador Signal 9000 MGA.....	134
Tabla 5.17 Precisión en la medida de CO ₂ , analizador Signal con respecto al OBS-2200 del INSIA.....	134
Tabla 5.18 Exactitud en la medida corregida de CO ₂ del analizador Signal con respecto al CO ₂ calculado con base al factor lambda medido con el LA4 ETAS.....	138
Tabla 5.19 Repetibilidad en la medida corregida de CO ₂ del analizador Signal con respecto al CO ₂ calculado con base al factor lambda medido con el LA4 ETAS.....	138
Tabla 5.20 Precisión en la medida corregida de CO ₂ del analizador Signal con respecto al CO ₂ calculado con base al factor lambda medido con el LA4 ETAS.....	139
Tabla 5.21 Comparación de analizadores de HC disponibles en el mercado español...	143
Tabla 5.22 Parámetros de respuesta dinámica analizador de HC ThermoFID-PT.....	145

Tabla 5.23 Ruido del analizador de HC - ThermoFID.....	145
Tabla 5.24 Exactitud del analizador de HC - ThermoFID.	145
Tabla 5.25 Repetibilidad del analizador de HC - ThermoFID.	145
Tabla 5.26 Parámetros de respuesta dinámica analizador de HC ThermoFID-PT.....	147
Tabla 5.27 Exactitud del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS.	148
Tabla 5.28 Repetibilidad del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS.	148
Tabla 5.29 Precisión del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS.	149
Tabla 5.30 Exactitud del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS. Aplicando el modelo de estimación y sin aplicar.	158
Tabla 5.31 Repetibilidad del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS. Aplicando el modelo de estimación y sin aplicar.	158
Tabla 5.32 Precisión del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS. Aplicando el modelo de estimación y sin aplicar.	158
Tabla 6.1 Condiciones de medida de datos presentados en la Figura 6-19.....	190
Tabla 6.2 Efecto de la longitud y curvatura del tubo de extensión sobre la onda de presión diferencial.....	196
Tabla 6.3 Ruido en la medida de caudal másico. Equipo MIVECO-PEMS.	198
Tabla 6.4 Exactitud en la medida de caudal másico. Equipo MIVECO-PEMS.	199
Tabla 6.5 Repetibilidad en la medida de caudal másico. Equipo MIVECO-PEMS.....	199
Tabla 6.6 Precisión en la medida de caudal másico. Equipo MIVECO-PEMS.....	199
Tabla 7.1 Precisión en la medida de posición con GPS.....	208
Tabla 8.1 Errores de exactitud y calibración MIVECO-PEMS.....	223
Tabla 8.2 Errores estimados por efecto del tiempo de respuesta MIVECO-PEMS.....	224
Tabla 8.3 Errores de sincronización al 68,2% de confiabilidad. MIVECO-PEMS. Resultados con base a ensayos en tráfico real con un turismo diésel.	225
Tabla 8.4 Propagación de errores en el cálculo de emisiones másicas instantáneas. Equipo MIVECO-PEMS.....	226

Tabla 8.5 Error en el cálculo de consumo con base en medida de emisiones en los gases de escape. Equipo MIVECO-PEMS	227
Tabla 8.6 Error en el cálculo de consumo con base en medida de lambda. Equipo MIVECO-PEMS	228
Tabla 9.1 Resumen resultados de validación equipo MIVECO-PEMS en laboratorio oficial de certificación de emisiones INTA.....	243
Tabla 11.1 Características de los vehículos diésel ensayados para el estudio de la influencia de los factores exógenos en turismos diésel.	260
Tabla 11.2 Características de los vehículos gasolina ensayados para el estudio de la influencia de los factores exógenos en turismos gasolina.	261
Tabla 11.3 Correlación entre variables dinámicas y factores exógenos.	263
Tabla 11.4 Constantes para el cálculo del factor de consumo según ecuación (11-11).	272
Tabla 11.5 Constantes del factor de emisión de CO ₂ según ecuación (11-12).	272
Tabla 11.6 Factor de emisión de NO _x en función del factor de emisión de CO ₂ y del factor de consumo.	277
Tabla 11.7 Constantes para el cálculo del factor de consumo según ecuación (11-11).	282
Tabla 11.8 Constantes para el cálculo del factor de consumo según ecuación (11-12).	282

Símbolos y abreviaciones

Símbolos latinos

A	m^2	Área
c	m/s	Velocidad del sonido
C_x	-	Coefficiente de resistencia aerodinámica
d	m	Diámetro
E	$kW \cdot h$	Energía
F	N	Fuerza
f	s^{-1}	Frecuencia
FC	$l/100km$ $l.kW^{-1}.h^{-1}$	o Factor de consumo
FE	$g.km^{-1}$ $g.kW^{-1}.h^{-1}$	o Factor de emisión
f_r	-	Coefficiente de resistencia a la rodadura
g	m/s^2	Aceleración de la gravedad
HR	%	Humedad relativa
I		Intensidad de la radiación
k	-	Coefficiente o constante
l	M	longitud característica
M	Kg/mol	Peso molecular
m	kg	Masa
$\dot{m}$	$g.h^{-1}$	Caudal másico
m_A/m_F	-	Relación másica aire /combustible
m_F/m_A	-	Dosado: Relación másica combustible / aire
N	W	Potencia
n	min^{-1}	Régimen del motor
P	Pa	Presión
r	-	Coefficiente de correlación
R	$J/(mol \cdot K)$	Constante universal de los gases
R^*	$J/(kg \cdot K)$	Constante de los gases para aire seco
t	s	Tiempo
T	K o $^{\circ}C$	Temperatura
t_{10-90}	S	Tiempo de subida (respuesta escalón)
t_{90-10}	S	Tiempo de bajada (respuesta escalón)

Nomenclatura

t_{ret}	s	Tiempo de retardo
t_{rs}	s	Tiempo de respuesta
V	m ³	Volumen
v	km/h	Velocidad
v	m/s	Velocidad
V_d	m ³	Cilindrada total del motor
V_T	cm ³	Cilindrada total del motor
y	-	De forma genérica designa un valor medido
$\dot{V}$	m ³ /s	Caudal
$\bar{y}$	-	Media aritmética

Símbolos griegos

α	grad	Ángulo de pendiente de la vía
η	-	Rendimiento o eficiencia
λ	-	Relación másica aire/combustible relativa
ρ	kg/m ³	Densidad
$\rho_{A,0}$	kg/m ³	Densidad del aire en condiciones de referencia
σ		Desviación estándar
φ	-	Dosado relativo: Relación másica combustible/aire relativa
ν	Hz	Frecuencia de la radiación emitida
χ	%V, ppmV	Concentración en volumen

Subíndices

0	Inicial
A	Aire
a	Admisión ó aire
amb	Ambiente
atm	Atmosférica
D	Diferencial
d	Amplitud
E	Escape
f	Filtro
F	Combustible
i	Componente i
in	Entrada
LC	Línea calefactada
m	Valor medio
out	Salida
ref	Referencia
s	Estequiométrico

<i>S</i>	Estática
<i>t</i>	Tracción
<i>T</i>	Total
TR	Sistema de transmisión
<i>V</i>	Volumétrica
<i>vh</i>	Vehículo

Abreviaciones

a.C.	“Antes de Cristo”
CARB	California Air Resources Board
CFR	Code of Federal Regulations of the United States
CIEMAT	Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas de España.
CRC	Coordinating Research Council
CVS	Constant Volume Sampling
DCM	Differential coefficients method
DG ENTR	Directorate General Enterprise and Industry - European Commission
DPF	Diesel Particulate Filter
ECM	Engines’s electronic control module
EE.UU.	Estados Unidos de América
EGR	Exhaust Gas Recirculation
EPA	United States Environmental Protection Agency
ESC	European Stationary Cycle
EUDC	Extra-Urban Driving Cycle
EURO-X	European emission standards
FID	Flame Ionization Detector
FRM	Federal Reference methods
FRM	Métodos de referencia federal USA
FSO	Fondo de escale (Full Scale Output)
FTIR	Fourier transform spectroscopy
GEI	Gases de efecto invernadero
GLP	Gas licuado del petróleo
GMT	Grupo de motores térmicos - UPM
GNC	Gas natural comprimido
GSE	Airport Ground Support Equipment
HCLD	Heated chemiluminescence detector
HFID	Heated Flame Ionization detector
HNDIR	Heated Nondispersive Infrared
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IUC	In-use conformity checking
JRC	Joint Research Centre
MEC	Motores de encendido por compresión
MEL	Mobile emissions laboratory
MEP	Motores de encendido provocado
MIVECO	Metodología e Instrumentación embarcada en vehículos para evaluar

	los efectos del tráfico real en las emisiones contaminantes
NDIR	Nondispersive Infrared
NDUV	Nondispersive ultraviolet analyzer
NEC	National Emission Ceiling
NEDC	New European Driving Cycle
NSR	NO _x Storage - Reduction
NTE	Not-To-Exceed
OMS	Organización Mundial de la Salud
PCCI	Premixed Charge Compression Ignition
PEMS	Portable Emissions Measurement Systems
RAVEM	Ride-Along Vehicle Emission Measurement
SCCM	Standard Cubic Centimeters per Minute
SCFM	Standard cubic feet per minute
SwRI	Southwest Research Institute
TNO	Netherlands Organisation for Applied Scientific Research
UAH	Universidad de Alcalá
UDC	Urban Driving Cycle
UNEP	United Nations Environment Programme
UPM	Universidad politécnica de Madrid
US	United States
VITO	Flemish Institute for Technological Research
VITO	Flemish Institute for Technological Research
WMO	World Meteorological Organization

Sustancias químicas

CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono
H ₂ O	Agua
HC	Hidrocarburos inquemados
N ₂	Nitrógeno
N ₂ O	Óxido Nitroso
NH ₃	Amoniaco
NMHC	Non-methane hydrocarbons
NMVOC	Non-methane volatile organic compounds
NO	Monóxido de nitrógeno
NO ₂	Dióxido de nitrógeno
NO _x	Óxidos de nitrógeno
O ₂	Oxígeno
O ₃	Ozono
PM	Particulate matter
SO ₂	Óxido de azufre
THC	Hidrocarburos totales
ZrO ₂	Óxido de zirconio

Parte I.

Introducción, estado del arte y fundamentos

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

1.1 Preámbulo

1.1.1 La contaminación atmosférica

La contaminación del aire ha sido un problema de salud pública desde el descubrimiento del fuego, debido a los humos producidos en el proceso de combustión. Inicialmente el problema se presentó en espacios cerrados o con ventilación deficiente, pero posteriormente llegó a afectar la calidad de aire en los asentamientos urbanos. Séneca en el año 61 a.C. escribió sobre el "aire cargado de Roma" y en el siglo XI se llegó a prohibir la quema de carbón en Londres.

Los problemas modernos de contaminación del aire se remontan al siglo XVIII en Inglaterra con el nacimiento de la revolución industrial debido al uso de combustibles fósiles para la producción de energía. A fines del siglo XIX e inicios del siglo XX, el humo y las cenizas llegaron a ser el principal problema de contaminación urbana, situación que empeoró con el creciente uso del automóvil. Desde mediados del siglo XX en ciudades como Londres y más tarde Los Ángeles, en los Estados Unidos, se presentaron episodios importantes de salud pública a causa de la contaminación del aire.

A raíz de una conferencia sobre contaminación del aire realizada en Milán en 1957, en donde se trataron los aspectos de salud pública relacionados con la contaminación del aire en Europa, la Organización Mundial de la Salud (OMS) se empezó a preocupar por este tema, especialmente por sus efectos nocivos sobre la salud. La OMS revela que hoy en día, en el mundo más de 3,1 millones de personas mueren cada año por causas directamente atribuibles a la contaminación del aire, equivalente al 5,3% de las muertes totales. El 40% de estas muertes se deben a la contaminación ambiental urbana y el resto a la contaminación del aire en espacios cerrados (WHO, 2009).

Las primeras legislaciones para regular las emisiones contaminantes las promulgó Estados Unidos en la década de los sesenta, setenta y noventa, después fue seguido por algunos países europeos, Japón y finalmente la Unión Europea en conjunto. Actualmente, en Europa los techos nacionales de emisión (NEC) de determinados contaminantes atmosféricos son regulados por la Directiva 2001/81/EC (NECD) y la calidad de aire ambiente por medio de la Directiva 2008/50/EC, que entró en vigor en junio de 2008. Estas normativas tienen como objetivo limitar las emisiones de contaminantes para reforzar la protección del medio ambiente y de la salud humana así como avanzar hacia el objetivo de no superar los niveles críticos de contaminantes y de proteger de forma eficaz a toda la población frente a los riesgos para la salud que se derivan de la contaminación atmosférica.

1.1.2 El cambio climático

Por su parte, el problema del cambio climático causado por los Gases de Efecto Invernadero (GEI) fue descubierto por el científico Sueco Svante Arrhenius (1859-1927) en 1896. Descubrió que debido a la capacidad de absorción de la radiación infrarroja del vapor de agua y del dióxido de carbono, los combustibles fósiles podrían dar lugar o acelerar el calentamiento de la tierra. Arrhenius llegó a establecer una relación entre la concentración de dióxido de carbono atmosférico y la temperatura. Este descubrimiento no tuvo relevancia hasta los años ochenta, en donde se observó un aumento significativo en la curva de temperatura media anual global, como se observa en la Figura 1-1.

Figura 1-1: Evolución de la temperatura de la tierra 1850-2010. (Adaptado de Payri et al, 2011)

En 1988 se reconoció la teoría del efecto invernadero y se estableció el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (Intergovernmental Panel on Climate Change- IPCC) por parte del Programa Medioambiental de las Naciones Unidas (United Nations Environment Programme -UNEP) y la Organización Meteorológica Mundial (World Meteorological Organization- WMO) con el objetivo de proveer al mundo con una clara visión científica sobre el estado actual del cambio climático y sus posibles consecuencias ambientales y socio-económicas (Maslin, 2005).

Hoy en día se conoce que la quema de petróleo, carbón y gas natural ha causado un aumento del CO_2 en la atmósfera que últimamente es de 1,4 ppm al año y produce el consiguiente aumento de la temperatura. Se estima que desde que el hombre mide la temperatura hace unos 150 años (siempre dentro de la época industrial) ésta ha aumentado 0,5 °C y se prevé un aumento de 1 °C en el 2020 y de 2 °C en el 2050. Adicionalmente, se estima que más de 140 mil personas mueren al año por causas del cambio climático (WHO, 2009).

En 1998 se promulgó el protocolo de Kioto sobre el cambio climático cuyo objetivo fue reducir las emisiones de los principales gases de efecto invernadero en el periodo comprendido entre los años 2008 y 2012. Para el caso del CO_2 el objetivo planteado fue reducir su emisión en un 8%. La XV Conferencia Internacional sobre el Cambio Climático que se celebró en Copenhague, Dinamarca, en diciembre de 2009, cuyo objetivo era la conclusión de un acuerdo jurídicamente vinculante sobre el clima, válido en todo el mundo y de aplicación a partir de 2012, no alcanzó a tener carácter oficial, debido a no haber obtenido un acuerdo unánime. De todas formas, en Europa se llegó a un acuerdo para reducir las emisiones de CO_2 de los vehículos ligeros, limitando las emisiones de CO_2 a 130 g/km, con aplicación progresiva desde 2012 hasta 2015 (Regulation (EC) No. 443/2009).

Además del dióxido de carbono (CO_2), existen otros gases de efecto invernadero responsables del calentamiento global, tales como el gas metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O), Hidrofluorocarbonos (HFC), Perfluorocarbonos (PFC) y Hexafluoruro de azufre (SF_6), los cuales están contemplados en el Protocolo de Kioto y en las normativas ambientales de carácter local.

Cada GEI tiene una influencia térmica (forzamiento radiactivo) distinta sobre el sistema climático mundial por sus diferentes propiedades radiactivas y períodos de permanencia en la atmósfera. En la literatura científica, tales influencias se homogenizan en una métrica común definida como el cambio en el flujo de energía en la propopausa (zona de transición entre la troposfera y la estratosfera), en W m^{-2} . Los gases con mayor forzamiento radiactivo positivo (influencia térmica de calentamiento) son el dióxido de carbono [CO_2], el óxido nitroso [N_2O], metano [CH_4] y los cloro-fluoro-carbonos, que en total equivalen a un valor de forzamiento radiactivo de 2,4 W m^{-2} en el año 2000. También hay GEI que tienen un forzamiento radiactivo negativo o influencia térmica de enfriamiento como ciertos compuestos de azufre y el ozono estratosférico, pero aún estos efectos no están estudiados científicamente en profundidad. (CRFEC, 2005).

1.1.3 El transporte por carretera

Una de las fuentes más importantes de contaminación atmosférica y de gases de efecto invernadero es el transporte por carretera. Los datos disponibles muestran que en 2005, el transporte por carretera contribuyó en el territorio europeo (UE-15) a alrededor del 24,5% de las emisiones totales de CO_2 , al 41,9% del total de NO_x , al 46,9% de las emisiones globales de CO y al 22,8% de las de HC (NMVOC) (EEA, 2007). Inicialmente, la contaminación ambiental fue el gran tema de preocupación para las emisiones del transporte por carretera pero el desarrollo de tecnologías de reducción de

emisiones y de postratamiento de gases ha producido una mejora significativa en la calidad de aire de las ciudades. Hoy en día, los gases de efecto invernadero y la diversificación de las fuentes de energía de los vehículos de carretera surgen como las principales preocupaciones para el desarrollo sostenible de este sector.

1.1.4 Normativa sobre emisiones para el transporte por carretera

Con respecto a este sector económico, las diferentes normativas sobre emisiones (normativa europea, americana, etc.) establecen límites de emisiones en los gases de escape para los vehículos nuevos, pero no se aplican a los vehículos en uso. En la actualidad, las emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos totales (THC), hidrocarburos excepto metano (NMHC), monóxido de carbono (CO) y partículas (PM) están regulados de alguna manera para la mayoría de los vehículos, siendo específica para cada tipo en particular. Por ejemplo en la Figura 1-2, se muestra de forma esquemática la evolución de los límites impuestos por la normativa europea de emisiones para los turismos diesel, desde la legislación europea denominada vulgarmente EURO 1, que empezó a regir en el año 1992, hasta la EURO 5 que entró en vigor en septiembre de 2009 y la EURO 6 que no entrará en vigor hasta el año 2014.

Figura 1-2: Límites europeos de emisión de partículas (PM) y óxidos de nitrógeno (NO_x) en vehículos ligeros diesel (turismos y furgonetas).

En general, el cumplimiento de estas normativas se determina mediante la ejecución de ciclos de prueba normalizados en banco de motor para el caso de los vehículos pesados y en banco de rodillos para los vehículos ligeros, con el fin de garantizar la repetibilidad de los resultados. Estos procedimientos normalizados establecen el tipo de analizadores de gases a utilizar, el procedimiento de medida, así como la secuencia de velocidades o secuencia de condiciones de operación del motor. Los ciclos de prueba normalizados suelen ser de medidas estacionarias, para construir los llamados “mapa de emisiones” o de medidas dinámicas, en las que el motor va cambiando sus condiciones operativas siguiendo un ciclo preestablecido como puede ser el ciclo europeo EUTC (European Transient Cycle) para banco de motor o los ciclos NEDC (New European Driving Cycle) urbano y extra-urbano para banco de rodillos (Pundir, 2007).

La cuantificación de las emisiones contaminantes en los ciclos de prueba normalizados se realiza en muestra diluida mediante muestreo a caudal constante, denominado con las siglas inglesas CVS (“Constant Volume Sampling”) por acumulación en bolsas o por integración (Pundir, 2007). Este tipo de medida de emisiones permite conocer sólo la emisión total en gramos de cada uno de los gases contaminantes durante la prueba. La ventaja de este tipo de pruebas es, como se dijo anteriormente, la repetibilidad y la facilidad para su realización, pero tiene la gran desventaja de que no permite adquirir un conocimiento sobre el proceso de formación de emisiones ni sobre los factores que influyen sobre esta.

Por otro lado, a pesar de que las normativas que regulan las emisiones contaminantes de los motores de los vehículos de carretera se han vuelto más estrictas con el tiempo y por lo tanto las emisiones de los motores en los ciclos de prueba normalizados se han reducido fuertemente, se ha observado que en funcionamiento real tienen mayores emisiones. Este fenómeno se debe a que los ciclos de prueba normalizados no representan las condiciones reales de funcionamiento de los motores (EEA, 2004) y a la introducción de controladores electrónicos que de forma automática adaptan el modo de funcionamiento del motor a modo de bajas emisiones reduciendo las prestaciones del motor cuando detectan que están en condiciones de prueba normalizada, fenómeno que se conoce con el nombre de “cycle beating” (Kageson, 1998).

Debido al descubrimiento del “cycle beating” a finales de los años noventa, la Agencia de Protección Ambiental de los EE.UU. (EPA) y el California Air Resources Board (CARB) firmaron acuerdos con algunos fabricantes de motores para realizar pruebas complementarias para la certificación de los motores diesel de servicio pesado. Las pruebas complementarias incluyeron pruebas de vehículos en uso del tipo “Not-To-Exceed (NTE)” (Miller et al., 2006). Las pruebas NTE buscan asegurar que las emisiones de los motores están controladas dentro del rango de par y régimen que experimenta el motor de un vehículo en condiciones normales de uso. El procedimiento de ensayo NTE se basa en la medida en tiempo real de las emisiones y de los parámetros de operación del vehículo en condiciones normales de uso con equipos de medida embarcados. Este tipo de ensayos no establece un ciclo específico de conducción, ni tampoco una distancia o tiempo de ensayo concreto (FR, 2000).

1.2 Justificación

La reducción de las emisiones contaminantes y emisiones de gases efecto invernadero de los motores de los vehículos de transporte y la mejora de su eficiencia energética, se basan en buena medida en su evolución tecnológica y en la modernización del parque. Por lo tanto, el desarrollo de nuevos sistemas de propulsión y fuentes de energía para el transporte motiva a los centros de investigación y desarrollo a conocer las emisiones y el consumo de los vehículos y la maquinaria en su uso real.

Además, como se comentó anteriormente, para limitar las emisiones contaminantes y el consumo de los nuevos motores y vehículos, en las diferentes normativas y regulaciones se incluyen procedimientos de ensayo normalizados en banco motor o en banco de

rodillos. Pero el aumento de la gestión inteligente de las funciones del motor y del vehículo, que hacen que el motor se comporta de diferente forma en tráfico real que en los ensayos normalizados (cycle beating), unido al hecho de que los ciclos de prueba normalizados no representan la condiciones reales de circulación en tráfico real, hacen necesario medir, e incluso reglamentar, las emisiones reales. Las medidas de conformidad en utilización real (pruebas NTE) de los vehículos pesados desarrolladas por la EPA son ya una realidad en EE. UU. y lo serán en el futuro en Europa.

Pero esto no es suficiente. Las autoridades y expertos en medio ambiente y eficiencia energética necesitan disponer de datos cercanos a la realidad y al entorno concreto donde se detecta el problema. Condicionantes del entorno como la orografía o el estilo de urbanismo de una ciudad afectan significativamente a las emisiones reales de los vehículos, por lo que la medición de datos en tráfico real juega un papel importante para desarrollar las políticas apropiadas y adaptadas a la realidad de cada situación.

También los motores de la maquinaria industrial y agrícola, así como los motores marinos y ferroviarios, emiten emisiones y consumen combustible según la pauta de utilización real, que no es coincidente con el ciclo utilizado en los ensayos reglamentarios. Esto motiva, también, la tendencia a realizar medidas en uso real con equipos portátiles en las condiciones de uso de la vida real.

Pero la medida real con equipos embarcados en los vehículos o maquinaria tiene dificultades técnicas intrínsecas relacionadas con la alimentación de energía, el peso y tamaño de los equipos, la medida en tiempo real de las diferentes variables, el registro de datos, el posprocesamiento, y la propia variabilidad, en parte aleatoria, de las condiciones de la conducción y del uso del motor.

Para estudiar de forma sistemática todas estas dificultades y proponer una metodología de medida de emisiones en tráfico real se ha desarrollado la presente tesis doctoral.

1.3 Trabajos anteriores del equipo investigador

El Grupo de Motores Térmicos (GMT) de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSI) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), en donde se ha realizado la presente tesis doctoral, cuenta con una amplia experiencia en medida de emisiones de motores de combustión interna. Experiencia adquirida en el desarrollo de varios proyectos sobre medida de emisiones que se han venido adelantando desde hace más de 14 años.

Los primeros proyectos que se realizaron con medidas embarcadas fueron:

- “Estudio de definición de un ciclo de circulación en Madrid” financiado por el Ayuntamiento de Madrid y por la Comunidad Autónoma de Madrid.

- “Ciclos de conducción para la obtención de mapas de emisiones contaminantes y consumo energético en el área de Madrid”, financiado por el Ayuntamiento de Madrid.

En los que se desarrolló estadísticamente un ciclo de conducción de 620 segundos representativo de la conducción en la ciudad de Madrid con base en una gran cantidad de datos experimentales medidos en un vehículo instrumentado circulando en tráfico real. Este ciclo se conoce con el nombre de “Ciclo Madrid” y se puede observar en la Figura 1-3. Adicionalmente, con base en el ciclo de conducción desarrollado, se hizo un estudio de escenarios para valorar la influencia de la composición del parque automotor de la ciudad sobre el inventario total de emisiones. En estos estudios se demostró adicionalmente, que las emisiones contaminantes de un vehículo medio en Madrid son significativamente superiores a las que predice el ciclo de homologación de vehículos (Casanova et al., 2001). Este trabajo finalmente condujo al desarrollo de una metodología estructurada para calcular las emisiones totales debidas al tráfico congestionado de cualquier ciudad (Ariztegui et al, 2004).

Figura 1-3: Ciclo Madrid. Desarrollado por la UPM. (Casanova et al., 2001)

En el año 2002 se comenzó a desarrollar el proyecto “Consumo de carburante y emisiones contaminantes de los vehículos en tráfico real”, financiado por la Fundación Instituto Tecnológico de Seguridad del Automóvil (FITSA). Como parte de este proyecto, se desarrollaron los primeros equipos de medida de emisiones embarcados, uno de tecnología sencilla y bajo coste que se utilizaron para ensayos en un Peugeot 205 y en algunos vehículos GSE de aeropuertos, y otro, de tecnología más avanzada, instalado en un Nissan Terrano II con motor diesel. Se implementaron equipos de registro en tiempo real de parámetros instantáneos de funcionamiento dinámico del vehículo, parámetros de actividad del conductor y medida de emisiones contaminantes de forma modal en los dos vehículos, cada uno con tecnologías diferentes (Casanova et al., 2004). Como resultado significativo del trabajo desarrollado hasta ese momento por el GMT fue la experiencia adquirida en la adquisición y registro de datos en un coche con instrumentación.

Estos proyectos han dado lugar al desarrollo de dos tesis doctorales: una leída en el año 2005 (Aríztegui, 2005), en la que se desarrolló un modelo fluido-dinámico para corregir los problemas de retraso y distorsión en la medida instantánea de concentración que se origina por la imposibilidad de hacer las medidas directamente a la salida del motor. El modelo desarrollado permite relacionar segundo a segundo las emisiones reales que se forman en el motor con las condiciones instantáneas de funcionamiento del mismo. Y otra leída en febrero de 2010, titulada “Estudio de las emisiones contaminantes de motores de automoción mediante su análisis con equipos de medida embarcados” cuyo objetivo principal fue el establecer una metodología para la medida de emisiones contaminantes, con el fin de caracterizar el comportamiento de los vehículos de automoción y sus motores en materia de prestaciones medioambientales en uso real. Adicionalmente, como parte de esta tesis doctoral, se realizaron una serie de estudios en tráfico real con el fin de validar la metodología de medida propuesta (Margenat, 2010).

La presente tesis se ha desarrollado como parte de un proyecto I+D+i financiado por el Ministerio de Medio Ambiente Rural y Marino de España, convocatoria 2006 dentro del marco del Programa Nacional de Ciencias y Tecnologías Medioambientales del Plan Nacional de I+D+i 2004-2007. El proyecto se tituló “Metodología e Instrumentación embarcada en vehículos para evaluar los efectos del tráfico real en las emisiones contaminantes - MIVECO” y se desarrolló de forma conjunta entre la Universidad Politécnica de Madrid (UPM), Universidad de Alcalá (UAH) y el Centro de Investigaciones Energéticas, Medioambientales y Tecnológicas (CIEMAT). La ejecución del proyecto se llevó a cabo entre diciembre de 2006 y noviembre del 2009.

El objetivo principal del proyecto MIVECO fue el desarrollo de un equipo portátil y universal de medida de emisiones y una metodología de ensayo para estudiar los efectos de las condiciones reales de utilización de los vehículos de transporte por carretera en las emisiones contaminantes. Este proyecto en conjunto incluyó, además del desarrollo del equipo de medida de emisiones gaseosas másicas, el desarrollo de un sistema de medida de partículas en distribución de tamaño, sistema de monitoreo de la actividad del vehículo y del conductor y su integración, con el fin de adelantar diferentes estudios sobre factores que influyen sobre las emisiones contaminantes de los vehículos en tráfico real.

1.4 Objetivos e hipótesis de la Tesis Doctoral

Con el desarrollo de la presente tesis doctoral se han perseguido dos objetivos generales, que se enuncian a continuación y se detallan seguidamente:

- Estudiar los problemas asociados a la medición embarcada de emisiones gaseosas y desarrollo de un equipo experimental que permita medir las emisiones másicas instantáneas y factores de emisión de vehículos turismo en tráfico real.
- Realizar estudios de aplicación sobre los diferentes factores que influyen en las emisiones y el consumo de combustible de vehículos turismo en tráfico real.

1.4.1 Estudio de los problemas asociados a la medición embarcada de emisiones gaseosas y desarrollo de un equipo experimental.

El primer objetivo general de esta tesis es profundizar en el estudio de las tecnologías de medida, estudio de la respuesta de los analizadores, frecuencia de muestreo, distorsión de la señal tanto por ruido como por tiempos de respuesta y tiempos de retardo de la señal, repetibilidad, exactitud, precisión e incertidumbre en la medida. Todo esto aplicado al desarrollo de un equipo portátil de medida de emisiones másicas instantáneas para el estudio de emisiones vehiculares en tráfico real.

Para el desarrollo de este equipo es necesario asegurar la exactitud y precisión en la medida del caudal volumétrico de los gases de escape, que como lo expresa Nakamura (Nakaruma et al., 2005) presenta grandes dificultades por el hecho de ser un flujo pulsante. Por ello, el desarrollo de un caudalímetro y de una metodología adecuada para el cálculo del caudal másico, basado en la exactitud, precisión y sensibilidad del caudalímetro forma parte de este objetivo.

Dentro de este objetivo general también se incluye el desarrollo de una metodología de tratamiento de señales, que permite corregir la falta de sincronismo de las diferentes señales y la distorsión causada por el mismo analizador debido a sus características dinámicas propias.

A pesar de que el objetivo no es el desarrollo de un equipo para certificación de emisiones, es importante validar el equipo en su conjunto (medida caudal de gases de escape, medida de concentraciones de los diferentes gases, modelo de reconstrucción de señales, algoritmos para cálculo de las emisiones másicas instantáneas y totales, consumo y factores de emisión) con respecto a las normativas vigentes sobre medida de emisiones con equipos embarcados, usando a manera de valor de referencia equipos comerciales usados para la certificación de emisiones en banco de rodillos y equipos portátiles de medida de emisiones (Portable Emission Measurement System – PEMS) aceptados internacionalmente como son el Horiba o el SEMTECH.

Por lo anterior, los objetivos específicos y las hipótesis correspondientes a este primer objetivo general son:

Objetivo 1: Desarrollar y validar un equipo portátil de medida de emisiones (PEMS) capaz de medir las emisiones másicas instantáneas de CO₂, CO, HC, NO_x, partículas así como consumo de combustible instantáneo en motores de combustión interna de vehículos durante su funcionamiento en tráfico real.

Hipótesis 1.1: Los analizadores e instrumentos utilizados deben cumplir los requisitos establecidos por las normativas desarrolladas para estos equipos, en cuanto a la respuesta dinámica, exactitud, repetibilidad, precisión y ruido.

Hipótesis 1.2: El caudalímetro que hace parte del PEMS debe cumplir los criterios de exactitud, repetibilidad, precisión y ruido, así como respuesta dinámica, establecidos por las normativas desarrolladas para estos equipos.

Hipótesis 2.3: En el caso de que la respuesta dinámica o alguna de las prestaciones de los analizadores o del caudalímetro no cumpla con las especificaciones mínimas establecidas por las normativas desarrolladas para estos equipos, puede ser parcialmente corregida por medio de métodos analíticos o de tratamiento de señales.

Hipótesis 2.4: Es posible validar la medida instantánea del PEMS desarrollado con respecto a la medida instantánea de equipos PEMS comerciales certificados a nivel internacional.

Objetivo 2: Determinar los factores que influyen sobre la calidad de la medida de emisiones con PEMS.

Hipótesis 2.1: Las características dinámicas de los analizadores y del caudalímetro (exactitud y tiempo de respuesta), así como la adecuada sincronización y tiempo de muestreo de las diferentes señales determinan la capacidad del equipo portátil de medida de emisiones de medir los transitorios de operación de un motor.

Hipótesis 2.2: La respuesta dinámica de cada uno de los analizadores y del caudalímetro se ve afectada por el tipo de montaje y los accesorios de montaje utilizados.

Objetivo 3: Validar el PEMS desarrollado en cuanto a los factores de emisión y factores de consumo.

Hipótesis 3.1: Una vez validada la medida instantánea con los equipos PEMS comerciales, es posible validar la medida global de factores de emisión y consumo con respecto a los equipos convencionales de certificación de medida de emisiones en banco de rodillos.

1.4.2 Estudio sobre los factores que influyen en las emisiones y el consumo de combustible de vehículos turismo en tráfico real.

Los equipos embarcados de medida de emisiones son una herramienta muy valiosa en el estudio de los factores exógenos y endógenos que influyen sobre las emisiones contaminantes de los motores de vehículos en tráfico real. Los factores exógenos son todos aquellos factores que restringen o condicionan la conducción o las condiciones de funcionamiento del motor, como pueden ser el nivel de tráfico, la infraestructura vial, el comportamiento dinámico del conductor, el combustible utilizado, el tipo de motor, entre otros. Por otro lado, los factores endógenos se refieren fundamentalmente a las variables internas del motor o a las condiciones de funcionamiento del vehículo y/o motor que afectan las emisiones, como pueden ser el régimen del motor, la marcha, la riqueza de mezcla, la potencia generada por el motor, temperatura del motor, etc.

El estudio de las emisiones desde estas dos perspectivas permite adquirir un conocimiento global de este fenómeno, además de que brinda una información muy útil de cara a la toma de decisiones tanto de los fabricantes de motores como a las entidades gubernamentales encargadas de desarrollar las diferentes normativas de emisiones.

Por lo tanto, el segundo objetivo general de esta tesis, se puede sintetizar en los siguientes objetivos específicos e hipótesis:

Objetivo 4: Desarrollar una metodología para el estudio de las emisiones y consumo de vehículos en tráfico real.

Hipótesis 4.1: Es posible integrar en el equipo portátil de medida de emisiones, la medida de las variables que representen los diferentes factores exógenos y endógenos que se van a estudiar.

Hipótesis 4.2: Es posible hacer un análisis de la influencia de los factores exógenos y endógenos del vehículo sobre el consumo de combustible y las emisiones en base a medidas en tráfico real.

Objetivo 5: Determinar la influencia de factores exógenos como la congestión del tráfico, el estilo de conducción, infraestructura vial, límites de velocidad, tipo de vehículo, combustible, sobre las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

Hipótesis 5.1: El consumo de combustible está determinado por la congestión del tráfico, el estilo de conducción, la infraestructura vial, los límites de velocidad impuestos, etc. y es posible determinar relaciones empíricas que relacionen el consumo de combustible con las variables que representan estos factores exógenos.

Hipótesis 5.2: Los factores de emisión de HC, CO, NO_x y partículas están determinados por factores exógenos relativos a la congestión del tráfico, el estilo de conducción, la infraestructura vial, etc. y es posible determinar relaciones empíricas que relacionen los diferentes factores de emisión con las variables que representan estos factores exógenos.

Objetivo 6: Determinar la influencia de los factores endógenos como pueden ser las condiciones de funcionamiento del motor (régimen de motor, la riqueza de mezcla, marcha, temperatura del motor, etc) sobre las emisiones y consumo instantáneo.

Hipótesis 6.1: El consumo instantáneo de combustible está determinado por factores endógenos como el régimen de motor, la riqueza de mezcla, marcha, temperatura del motor, etc., y es posible entender las diferencias en el consumo en base a estos factores endógenos.

Hipótesis 6.2: Las emisiones máximas instantáneas de HC, CO, NO_x y partículas están determinadas por factores endógenos como régimen de motor, riqueza de mezcla, marcha, temperatura del motor, etc., y es posible determinar las condiciones de funcionamiento del motor en las que se emiten los diferentes contaminantes.

1.5 Contribuciones

Esta tesis doctoral contribuye de forma importante al conocimiento científico actual, en la medida en que se estudia de forma sistemática todos los factores que influyen en la calidad de la medida instantánea de emisiones con equipos embarcados. Como se verá en el apartado 2.3 (Estado del Arte), hay algunos trabajos publicados en donde se abordan algunos de los problemas de la medida instantánea de emisiones, pero la diferencia fundamental es que estos están orientados al desarrollo de equipos de medida de emisiones para pruebas de certificación de vehículos y nuestro objetivo es el desarrollo de un equipo para investigación de emisiones, donde la capacidad de medir correctamente los transitorios de operación es fundamental y por lo tanto es importante conocer y cuantificar los errores que se tienen en la determinación de las emisiones máxicas y consumo instantáneo, así como en cuanto a los factores de emisión y factor de consumo.

Por otra parte, en el presente trabajo de tesis doctoral, se desarrolla un procedimiento original para el estudio de las emisiones y consumo de vehículos en tráfico real, en el que se tienen en cuenta la influencia de los diferentes factores exógenos y endógenos que afectan al vehículo en condiciones de tráfico real. A pesar de que sobre este tema hay varias publicaciones de importancia, la contribución de esta tesis está en que la metodología propuesta pretende estudiar los diferentes factores que influyen en las emisiones de forma conjunta, partiendo de ensayos en tráfico real.

Otra contribución original y de gran utilidad, para la comunidad científica y los fabricantes de vehículos y la sociedad en general, son los resultados concretos de los diferentes estudios de emisiones y consumo realizados. Por una parte, las relaciones empíricas halladas pueden ser usadas para generar modelos predictivos de consumo y emisiones de vehículos en tráfico real, así como programas de control de condiciones operativas del vehículo (algoritmos para centralita de control electrónico) para evitar condiciones de funcionamiento que produzcan altas emisiones y consumo innecesarios. Por otra parte, los resultados son de gran interés para las entidades gubernamentales, porque sirven de fundamento para las políticas medioambientales relativas y para la sociedad en general, porque contribuyen a fomentar la conciencia ecológica de que todos podemos contribuir activamente a mejorar la calidad del aire y a reducir el consumo de energía primaria.

De forma más concreta, a continuación se presenta un listado pormenorizado de las diferentes contribuciones originales aportadas con la presente tesis doctoral, presentados en orden de aparición en el documento de tesis.

1. Procedimientos desarrollados para la determinación de la respuesta dinámica de los analizadores y de la influencia de los accesorios de montaje, como adaptación al procedimiento presentado en la norma 40CFR 1065.308, presentado en el apartado 5.1.1.
2. Procedimiento realizado para la determinación de la exactitud, repetibilidad, precisión y ruido de los analizadores con base en la medida dinámica en serie con un

equipo PEMS comercial de referencia, a manera de adaptación de la norma 40CFR 1065.305, presentado en el apartado 5.1.2. Procedimiento desarrollado para tener en cuenta diferentes puntos de operación dentro del rango de medida de los analizadores y la presencia de fenómenos no lineales como la histéresis.

3. Procedimiento para determinar y corregir los errores debidos a la calibración de los analizadores como el presentado en el apartado 5.2.4.
4. Procedimiento para la determinación de la Precisión en la medida instantánea, parámetro no especificado en la normativa americana 40CFR y que se incluye por dar una idea general de la respuesta dinámica del analizador en condiciones cuasi-estacionarias, presentado en el apartado 5.2.4, ecuaciones (5-25) y (5-26).
5. Desarrollo de expresiones analíticas basadas en la estequiometría de la reacción de combustión que permiten calcular la concentración volumétrica de CO_2 , O_2 y vapor de agua en los gases de escape con base en la composición química del combustible, de la relación aire/combustible instantánea y la concentración de gases contaminantes HC, CO y NO_x , tanto para mezcla pobre como para mezcla rica, presentado en detalle en el apartado 5.4.1.
6. Desarrollo de la expresión analítica basadas en la estequiometría de la reacción de combustión para determinar la relación aire/combustible relativa para mezcla rica con base en la composición volumétrica de los gases de escape, ecuación (5-76).
7. Desarrollo de un procedimiento para la corrección de la medida de concentración de los analizadores de muestra directa por falta de estanqueidad perfecta o por pérdidas de presión en las líneas de muestreo. Esta corrección se realiza usando la medida en bolsa con gases de calibración y a través de todo el sistema de muestreo, como se muestra en el apartado 5.4.4.
8. Determinación de una relación empírica para la corrección de la medida en húmedo de CO_2 por interferencia del contenido de humedad en los gases de escape, ecuación (5-80) presentada en el apartado 5.4.4.
9. Medida del efecto del tiempo de respuesta de los analizadores sobre la medida instantánea de concentración de gases, Figura 5-41.
10. Propuesta de mejoramiento de las prestaciones del analizador de HC, desarrollo de modelo analítico y modelo experimental por identificación numérica de parámetros, presentado en el apartado 5.5.4.
11. Desarrollo de expresiones analíticas para el cálculo exacto del peso molecular de los gases de escape con base en la composición química del combustible y relación aire/combustible medida, tanto para mezcla rica como para mezcla pobre, ecuaciones (6-4) y (6-5).
12. Diseño y construcción del caudalímetro MIVECO-PEMS, diseñado específicamente para flujo pulsante, presentado en el apartado 6.3.4, para la cual se ha realizado la solicitud de una patente nacional. Ver anexo 0.

13. Desarrollo de la metodología para la determinación del caudal con base en la reconstrucción de la señal a alta frecuencia, presentado en el apartado 6.3.4.
14. Procedimiento para determinar la influencia de los accesorios sobre la medida de caudal, presentado en el apartado 6.3.4.
15. Inclusión de la medida del régimen de motor como parte del PEMS, presentado en el apartado 7.1.1.
16. Procedimiento para determinación precisa de velocidad instantánea y distancia recorrida con base en la medida combinada de GPS y sensor Doppler, presentado en el apartado 7.2.2.
17. Procedimiento para la determinación del perfil orográfico y pendiente de los recorridos, presentado en el apartado 7.4.
18. Determinación de la frecuencia mínima de muestreo para la medida de emisiones en turismos en tráfico urbano usando PEMS, por medio del método de densidad espectral de energía, presentado en el apartado 8.1.1.
19. Procedimiento para estimar los errores debidos al tiempo de respuesta de los analizadores, presentado en el apartado 8.1.4.
20. Procedimiento para estimar los errores debidos a la sincronización de las señales, presentado en el apartado 8.1.4.
21. Determinación de los errores de cálculo de emisiones máxicas instantáneas debido a la propagación de errores de calibración, sincronismo, tiempo de respuesta y caudal de escape, presentado en los apartados 8.2.1 y 8.2.2.
22. Procedimiento para la determinación indirecta de la marcha actual en base al régimen de motor y velocidad instantánea del vehículo, presentado en el apartado 8.2.3.
23. Relación empírica para el cálculo de las pérdidas mecánicas del sistema de transmisión en función de la velocidad instantánea del vehículo, calculado en base a los datos de potencia medidos en banco inercial. Presentado en el apartado 8.2.4 ecuación (8-17).
24. Definición del rendimiento global del vehículo en un determinado recorrido, ecuación (8-22).
25. Definición y determinación de un “índice de comportamiento dinámico” para turismos diésel y para turismos gasolina, que permite cuantificar el estilo de conducción utilizado en tráfico urbano. Ecuaciones (11-1) y (11-2).
26. Relación empírica para el cálculo de la velocidad media sin tráfico en un circuito urbano. Ecuación (11-7).

27. Definición y determinación de un “índice de calle” que permite cuantificar la restricción que la infraestructura vial impone a la conducción, ecuación (11-8).
28. Definición y determinación de un “índice de tráfico” que permite cuantificar el nivel de tráfico de una determinada vía, ecuación (11-9).
29. Relación empírica que permite calcular el factor de emisión de CO₂ y el factor de consumo en varios turismos diésel en tráfico urbano en base al índice de comportamiento dinámico, la velocidad media y pendiente, que permite independizar el efecto del estilo de conducción, de la velocidad y de la pendiente y permite comparar diferentes vehículos entre si en cuanto al consumo en tráfico urbano, ecuación (11-11) y ecuación (11-12).
30. Determinación de factores específicos de emisión de NO_x en varios turismos diésel en tráfico urbano, Tabla 11.6.
31. Determinación de factores de emisión de CO₂, NO_x, CO y HC en tráfico real de varios turismos diésel. Figura 11-16, Figura 11-20, Figura 11-21 y Figura 11-22.
32. Estudio sobre la influencia de los factores exógenos en turismos gasolina en tráfico urbano, con la determinación de factores reales de consumo y emisión de CO₂, NO_x, CO y HC de dos turismos gasolina y comparación entre estos dos vehículos, presentado en el apartado 11.4.
33. Estudio sobre la influencia de factores exógenos e turismos diésel en tráfico extraurbano, presentado en el apartado 11.5.
34. Estudio sobre la influencia del sistema Stop/Start sobre las emisiones de CO₂ de un vehículo diésel en tráfico urbano. Presentado en el apartado 11.6.1.
35. Estudio sobre la influencia del contenido de biodiesel en gasóleo en el rendimiento térmico de un motor diésel ligero ensayado en tráfico real. Presentado en el apartado 11.6.2.
36. Estudio sobre el impacto ambiental de la reducción del límite de velocidad en zonas urbanas centrales, presentado en el apartado 11.6.3.
37. Estudio sobre la influencia de los factores endógenos sobre el consumo de combustible y emisiones en vehículos turismo diésel y gasolina, presentado en el capítulo 12, apartados 12.1 y 12.2.

1.6 Plan de trabajo

Debido a que el trabajo objeto de la presente tesis doctoral tiene una gran componente experimental, que siempre presenta dificultades y toma tiempo para su realización, este trabajo se ha desarrollado en el curso de 5 años, como se muestra en el cronograma presentado en la Tabla 1.1. Las principales actividades desarrolladas han sido:

1. Revisión bibliográfica, principalmente sobre el estado del arte de la medida instantánea de emisiones, equipos portátiles de medida de emisiones (PEMS) y estudios realizados con PEMS. Se realizó de forma exhaustiva durante los 5 primeros meses, y aunque se continuó realizando de forma esporádica a lo largo de los 5 años, durante los primeros meses dedicados a la redacción del documento de tesis, se volvió a realizar de forma exhaustiva.
2. Instalación instrumental MIVECO-PEMS V0, incluye la selección de los diferentes analizadores, instrumentos y sistemas de alimentación autónoma que conforman el equipo MIVECO-PEMS versión 0; la integración de todos los componentes como equipo portátil y desarrollo del software de adquisición de datos. Esta instalación instrumental se realizó en dos fases: inicialmente se construyó un prototipo que se sometió a comienzos del 2008 a ensayos de validación. Estos primeros ensayos de validación mostraron la necesidad de hacer modificaciones importantes como el reemplazo del caudalímetro y cambio del sistema de alimentación eléctrica, entre otros. A partir del mes de abril de 2008 se comenzó el diseño y fabricación del caudalímetro MIVECO-PEMS y se culminó el desarrollo de este segundo prototipo, conocido como MIVECO-PEMS V0, en julio de 2008.
3. Ensayos de caracterización analizadores y caudalímetro. Esta actividad se desarrolló con el fin de conocer la respuesta dinámica y las funciones de calibración de los diferentes analizadores e instrumentos que integra el equipo MIVECO-PEMS, actividad que se realizó de forma independiente para cada uno de los equipos e instrumentos.
4. Ensayos de validación en banco de motor y rodillos. El primer objetivo de esta tarea ha sido la de comprobar el funcionamiento del equipo portátil de medida de emisiones en condiciones de laboratorio con gases de escape reales y en condiciones de operación real del motor, con el fin de detectar problemas en la medida, problemas de diseño, de selección de equipos o de configuración, estos ensayos han permitido ajustar el sistema de medida de emisiones, hacer modificaciones en el diseño y sustituir algunos equipos que se vieron necesarios. Una vez superada esta primera fase, a comienzos del año 2009 se comenzó una segunda fase, cuyo objetivo ha sido la validación de la medida de emisiones del equipo MIVECO-PEMS V0 con respecto a equipos de laboratorio utilizados para la certificación de emisiones de vehículos en banco de rodillos y PEMS validados internacionalmente.
5. Ensayos de validación en tráfico real: El objetivo de estos ensayos ha sido el de verificar la operatividad del equipo MIVECO-PEMS, para detectar fallos en analizadores y demás instrumentos, así como constatar la universalidad del equipo MIVECO-PEMS en diferentes vehículos turismos en pruebas en tráfico real. Estos ensayos se realizaron de forma preliminar antes de hacer los ensayos definitivos.
6. Realización ensayos tráfico real MIVECO-PEMS V0: Se realizaron ensayos en 5 turismos diesel, 2 vehículos todoterreno diesel y dos turismos de gasolina, con 5 conductores diferentes, y se realizaron ensayos en 5 rutas urbanas y una extraurbana. Se obtuvieron 233 ensayos válidos, que suman más de 1300 km y que

corresponden a más de 150 horas de ensayo, de las cuales se guarda registro de emisiones, variables dinámicas del conductor, del coche y datos medioambientales.

7. Desarrollo software para análisis de datos: Se desarrollo bajo entorno LabView®, con el fin de agilizar el análisis de datos, obteniendo factores de emisión, factores de consumo, velocidad media, pendiente media, distancia, porcentajes de tiempo en determinadas marchas, energía de tracción y demás variables de utilidad para el análisis de resultados.
8. Análisis de resultados MIVECO-PEMS V0: El análisis de datos se ha realizado utilizando métodos y herramientas estadísticas.
9. Integración de sensores de actividad del vehículo MIVECO-PEMS V1 y V2. Después de la primera fase de desarrollo del equipo, que incluía únicamente el conjunto de analizadores y el caudalímetro MIVECO, se vió la necesidad de integrar en el mismo equipo los sensores de actividad del vehículo y de condiciones ambientales (sensor de régimen de motor, sensor de velocidad doopler, termopares para medida de temperatura de operación del motor y estación meteorológica). De esta forma hacia finales de julio de 2010, se culminó el desarrollo de lo que llamamos el equipo MIVECO-PEMS V1. Seguidamente, se vió la necesidad de integrar en el equipo MIVECO-PEMS un sensor de posición geográfica (GPS) para registrar la posición del vehículo y como medio para la calibración dinámica del sensor de velocidad doopler, mejorando así la precisión en la medida de velocidad. A finales del año 2010 se concluyó la integración física y la integración de la señal del GPS dentro del software de posprocesamiento. Esta última versión es la que llamamos MIVECO_PEMS V2.
10. Ensayos de validación en tráfico real MIVECO PEMS V1 y V2. Durante el mes de julio de 2010, se realizaron los ensayos de validación del equipo MIVECO-PEMS V1 y durante los meses de noviembre y diciembre de 2010 se hicieron los de la versión MIVECO-PEMS V2.
11. Realización de ensayos en tráfico real MIVECO-PEMS V2 y análisis de resultados. Durante el año 2011, se realizaron una serie de ensayos para estudiar la influencia de los factores exógenos y endógenos sobre consumo y emisiones en tráfico real de turismos diésel en tráfico extraurbano y turismos gasolina en tráfico urbano, así como el estudio sobre el efecto del cambio de límite de velocidad en calles locales.
12. Preparación participación en congresos: Esta actividad engloba la redacción de las ponencias para los diferentes congresos en los que se ha participado tanto a nivel nacional como internacional.
13. Preparación solicitud de patente: Esta actividad incluye la redacción y la gestión de solicitud de la patente nacional.
14. Preparación de artículos en revistas científicas: Se han preparado y presentado tres artículos para revistas científicas indexadas, de las cuales dos ya están publicados.
15. Redacción documento de Tesis.

[illegible]

1.7 Estructura y organización de la tesis

La presente tesis doctoral está dividida en cuatro partes. En la primera parte “Introducción, estado del arte y fundamentos” se enmarca el tema de la tesis. En el primer capítulo “Introducción” se expone de forma general los antecedentes globales y específicos, así como la justificación, los objetivos y las hipótesis de la tesis doctoral. En el segundo capítulo “Estado del Arte” se presenta de forma resumida el estado del arte en los diferentes aspectos que se abordarán a lo largo de la tesis, incluyendo una relación de los principales proyectos de investigación a nivel mundial que se han desarrollado sobre medida de emisiones con equipos embarcados. En el tercer capítulo “Fundamentos” se presenta brevemente los fundamentos teóricos generales sobre formación de emisiones contaminantes en motores, sistemas de postratamiento y normativa de control de emisiones, fundamentos sobre los que se desarrolla la presente tesis doctoral.

En la segunda parte “Medida de emisiones con equipos embarcados” se desarrolla el primer objetivo general de la tesis, que consiste en el estudio de los problemas asociados a la medición embarcada en tiempo real de emisiones gaseosas y desarrollo de un equipo portátil de medida de emisiones PEMS. Esta parte está constituida por seis capítulos. En el capítulo 4 “Consideraciones generales sobre equipos portátiles de medida de emisiones – PEMS”, se exponen las generalidades de los PEMS en cuanto a los requerimientos específicos de estos equipos, ecuaciones básicas involucradas, subsistemas de los cuales se compone, así como las consideraciones generales de las normativas internacionales que regulan este tipo de equipos.

En el capítulo 5 “Subsistema de Analizadores de gas y partículas” se discuten las diferentes tecnologías de medida de gases y de masa de partículas, presentando los analizadores utilizados en el MIVECO-PEMS y los resultados de las pruebas de prestaciones de respuesta dinámica, exactitud, repetibilidad, precisión y ruido. Se discuten los diferentes problemas que se presentan en estos equipos y las soluciones adoptadas.

El capítulo 6 “Subsistema de medida de caudal y variables termodinámicas”, presenta los aspectos relacionados a la medida de temperatura, presión y de forma especial la medida de caudal, se muestra la experiencia con equipos comerciales genéricos y se presenta el caudalímetro MIVECO-PEMS. Se detalla la metodología desarrollada para la determinación del caudal medio en condiciones de ralentí del motor, donde el flujo es fuertemente oscilatorio.

El capítulo 7 “Subsistema de medida de variables del motor y vehículo, variables ambientales y variables de infraestructura”, presenta las tecnologías de medida de variables como régimen de motor, velocidad, distancia, aceleración, condiciones ambientales y el procedimiento para la determinación del perfil orográfico a partir de la presión atmosférica. Se detalla la metodología utilizada y los problemas que se presentan en la medida de estas variables.

En el capítulo 8 “Subsistema de adquisición, registro y posprocesamiento de datos” se estudian aspectos relacionados con la frecuencia de muestreo y con la propagación de

errores debidos a problemas de calibración de los equipos, tiempo de respuesta de los analizadores y falta de sincronismo en la determinación de las emisiones másicas instantáneas, consumo instantáneo y de los factores de emisión y factores de consumo.

Y como colofón final de esta segunda parte, en el capítulo 9 “Validación del equipo MIVECO-PEMS”, se presentan los resultados de los ensayos de validación del equipo portátil de medida de emisiones desarrollado en banco de rodillos con equipos de laboratorio para certificación de emisiones de vehículos.

En la tercera parte “Aplicación del equipo MIVECO-PEMS al estudio de emisiones contaminantes y consumo de vehículos en tráfico real” se desarrolla el segundo objetivo general de la tesis, que es el estudio de los factores que influyen sobre las emisiones y el consumo de combustible de vehículos turismo en tráfico real. Esta tercera parte incluye 3 capítulos. El capítulo 10 “Metodología de medida de emisiones en tráfico real”, se describe de forma general las diferentes etapas de la metodología de medida de emisiones en tráfico real. En el capítulo 11 “Influencia de Factores Exógenos sobre el consumo y emisiones”, incluye los aspectos específicos de la metodología utilizada para los diferentes estudios realizados. En este capítulo se incluyen son siguientes estudios: estudio de la influencia de los factores exógenos en vehículos turismo diésel en tráfico urbano y extraurbano y de vehículos gasolina en tráfico urbano. También se incluyen algunos otros estudios realizados como influencia del sistema Stop/Start en tráfico real urbano, influencia del contenido de biodiesel e impacto medioambiental de la reducción del límite de velocidad en el centro de las ciudades.

En el capítulo 12 “Influencia de los factores endógenos sobre el consumo de combustible y emisiones”, se incluye un estudio exhaustivo sobre los factores y condiciones de operación del motor y/o vehículo que influyen sobre el consumo y las emisiones de CO₂, NO_x, CO y HC en vehículos turismo diésel en banco de rodillos y en tráfico urbano y extraurbano y en vehículos turismo gasolina en banco de rodillos y en tráfico urbano.

En la cuarta parte, se presentan las conclusiones generales de la presente tesis, ya que las conclusiones específicas y más particulares se incluyen al final de cada uno de los capítulos de la parte II y parte III. En esta parte se incluye adicionalmente una propuesta sobre de continuación de esta línea de investigación.

Por último se presentará una relación general de la bibliografía citada en el documento y de la bibliografía consultada, aunque no citada explícitamente y por último la sección de anexos que incluye las publicaciones científicas que se han realizado como parte de este trabajo de tesis doctoral.

Capítulo 2

ESTADO DEL ARTE

Como se refirió en el capítulo 1, el creciente interés por la medida de emisiones contaminantes con equipos embarcados (en inglés Portable Emissions Measurement Systems – PEMS) surgió en los años noventa a raíz del lanzamiento de la normativa americana 40 CFR 1065, en la que se propuso la medida de emisiones en condiciones reales a utilización para los vehículos pesados. Este hecho hizo que inicialmente varias universidades y centros de investigación americanos y luego europeas, así como fabricantes de equipos de análisis de gases, principalmente americanos y japoneses, se lanzaran en la aventura de desarrollar sistemas universales de medida de emisiones que se ajustaran a los estándares de calidad requerimientos por la normativa. Como se puede ver en la Figura 2-1, en los últimos 15 años se observa un creciente interés de la comunidad científica internacional sobre este tema.

Figura 2-1: Publicaciones científicas relacionadas con la medida de emisiones con equipos embarcados.

En esta figura se observa de forma diferenciada las publicaciones internacionales de relevancia relacionadas con desarrollos concretos de equipos embarcados de medida de emisiones (PEMS) y las publicaciones referentes a la discusión de problemas y soluciones propuestas por los diferentes grupos de investigación sobre la exactitud en la medida instantánea de emisiones. Inicialmente se referían a la medida instantánea de emisiones en banco de rodillos, debido a la necesidad de este tipo de medida para determinar las emisiones de los hidrocarburos inquemados en los vehículos con motor diesel, que después ya se centró en los PEMS. Por último, se incluyen también las publicaciones de los diferentes estudios basados en medidas de emisiones en tráfico real o condiciones normales de servicio. Trabajos todos realizados por universidades o centros de investigación de gran prestigio mundial.

Con el fin de tener una idea general de los trabajos que hasta la fecha se han realizado a nivel mundial en cada uno de los tres aspectos anteriormente descritos, a continuación se relacionan separadamente las principales contribuciones realizadas por los diferentes grupos de investigación a lo largo de estos últimos 15 años. Cabe indicar que sobre estos temas en concreto, no hay publicaciones científicas de especial relevancia en los años anteriores.

2.1 Desarrollo de los sistemas embarcados de medida de emisiones - PEMS

A mediados del siglo pasado se desarrollaron los primeros sistemas embarcados de medida de emisiones PEMS, para conocer las emisiones contaminantes de los vehículos en tráfico real y lograr un mejor entendimiento del impacto ambiental. Estos sistemas fueron desarrollados principalmente por centros de investigación y usaban equipos convencionales de medida de emisiones utilizados en laboratorio (Shade, 2000) (ver Figura 2-2). Sólo hasta finales de los años noventa, con el fin de dar respuesta a la necesidad de realizar las pruebas de vehículos en uso NTE, se comenzaron a desarrollar estos equipos de medida de emisiones a nivel comercial. El objetivo planteado fue el de medir las emisiones reales de los vehículos en las condiciones normales de uso y compararlas con las emisiones medidas en los ciclos de prueba normalizados. El interés por los PEMS se incrementó aún más en el año 2002 cuando se promulgó la normativa Americana 40 CFR Part 1065 en la cual, como se dijo anteriormente, se establece el programa de control de emisiones para motores de servicio pesado en uso, con criterio Not-To-Exceed (NTE) que comenzó a regir en el 2007 (Gierczak et al., 2006).

En el año 2000 la firma Japonesa Honda, en colaboración con la Universidad de California desarrolló un primer PEMS basado en la técnica de espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR) y en el cálculo del caudal con base en los datos extraídos del sistema de gestión del motor (Jetter et al., 2000 y Truex et al., 2000). Las pruebas de validación de este PEMS se realizaron en el año 2008 utilizando un laboratorio móvil de medida de emisiones conforme a la normativa de emisiones en banco de rodillos (Johnson et al., 2008).

Figura 2-2: Sistema portátil de medida de emisiones. U.S.A. año 1956. CRC (Coordinating Research Council) Project CM-4-58. (Shah, 2007)

En el año 2001, Clean Air Technologies International desarrolló un PEMS que llamó OEM-2100TH con analizadores de CO y CO₂ de tecnología de infrarrojos no dispersivos-NDIR, célula electroquímica para NO_x y detectores de dispersión de rayos láser para la medida en tiempo real de partículas (Vojtisek-Lom & Allsop, 2001), que con ayuda de la Universidad del Estado de Carolina del Norte desarrolló la metodología para la toma y análisis de datos (Frey et al., 2001).

En el año 2002, la firma Horiba, desarrolló analizadores de infrarrojos no dispersivos en base húmeda (HNDIR) para la medida de CO y CO₂ en equipos embarcados (PEMS). Usando un analizador de H₂O para corregir la interferencia causada por el vapor de agua en los analizadores NDIR (Nakamura, 2002). Por su parte la Universidad de Alberta, desarrolló un sistema no intrusivo diseñado para ser instalado en cualquier vehículo. Este sistema se desarrolló con la capacidad de registrar condiciones ambientales, comportamiento del conductor, parámetros operativos del vehículo, consumo y emisiones en los gases de escape (Hawirko & Checkel, 2002). Así mismo, el Imperial College of Science, Technology and Medicine de Londres, desarrolló un PEMS al que llamó VPEMS y en el que se usó la ECU para obtener la información de la actividad del vehículo (Ochieng et al, 2002). Seguidamente, VITO (Flemish Institute for Technological Research) desarrolló un PEMS denominado “VOEMLow” en el que se utilizaron analizadores convencionales de laboratorio de última tecnología, logrando una exactitud del 10% con respecto a las medidas normalizadas (Lenaers et al., 2003).

Para el año 2004, los sistemas de medida de emisiones con equipos embarcados no estaban aceptados plenamente, debido al problema de falta de reproducibilidad y exactitud, así como a la dificultad de hacer un control de calidad sobre el proceso. En ese año, la firma Engine, Fuel, and Emissions Engineering, Incorporated, desarrolló un equipo de medida de emisiones embarcado que se dio a conocer con el nombre de RAVEM (Ride-Along Vehicle Emission Measurement). Este sistema incluyó un método

de control de calidad basado en el balance de carbonos, pero la característica más importante es que desarrolló un sistema de muestreo isocinético de flujo parcial proporcional de tal forma que el flujo másico de cada una de las sustancias es proporcional a su concentración en el flujo de escape, como ocurre en los sistemas convencionales de medida de emisiones en laboratorio (Weaver et al., 2004).

En el año 2004, la Universidad Politécnica de Madrid, presentó la comparación de dos sistemas embarcados no portátiles de medida de emisiones desarrollados por ellos. El primero, con analizadores de uso general de bajo costo y el segundo embarcando analizadores convencionales de laboratorio de mayor exactitud y precisión (Casanova, et al., 2004).

La compañía americana Ford en unión con la firma Sensors, Inc., NEXIQ y Richard Oliver, Ltd., desarrollaron un PEMS inicialmente llamado PREVIEW (Portable Real-time Emissions Vehicle Integrated Engineering Workstation), que utilizaba componentes desarrollados por la firma Sensors. Después del desarrollo del PREVIEW, la firma Sensors Inc., continuó desarrollando este equipo enfocado principalmente en medidas de emisiones instantáneas en motores diesel al que se le dio el nombre de SEMTECH-D, el cual incluye de forma novedosa un analizador de NO/NO₂ de absorción de rayos ultra violeta (Dearth et al., 2005).

En el año 2005, la empresa japonesa Horiba Instruments, lanzó la serie de PEMS conocida como OBS 2000. El OBS 2200 usa analizadores de vacío parcial, que disminuye el tiempo de respuesta, reduce el consumo de energía del sistema y el tamaño del conjunto. Incluye un analizador de HC de ionización de llama (HFID), un analizador de NO_x de quimioluminiscencia (HCLD) y analizadores en caliente de CO/CO₂ infrarrojos no dispersivos (HNDIR) (Akard, 2005). Este sistema se verificó finalmente de acuerdo con la norma 40 CFR parte 1065.920 en el año 2010 (Nakamura et al., 2007 y Bougher et al., 2010).

En el año 2005 también la Universidad inglesa de Leeds desarrolló su propio sistema embarcado de medida de emisiones basado en analizadores comerciales de espectroscopia de infrarrojos por transformada de Fourier (FTIR), con el que se puede obtener la concentración de hasta 51 compuestos diferentes en los gases de escape. Este equipo demostró estar dentro del 10% de error para las medidas en puntos estacionarios y dentro del 20% de error para las medidas en transitorios en comparación a los analizadores normalizados (Daham et al., 2005 y Li et al., 2006). El PEMS desarrollado por esta universidad fue validado en banco de rodillos para medida en transitorio en el año 2008 (Ropkins et al., 2008). Así mismo, la Universidad de West Virginia desarrolló su propio sistema embarcado de medida de emisiones al que llamó MEMS (Mobile Emissions Measurement System), en el cual se utiliza un medidor de caudal del tipo Annubar (Dietrich Standard AnnubarTM) con el cual se tienen errores en la medida de caudal entre el 4 y el 12% (Krishnamurthy & Gautam, 2005).

En el año 2006, la compañía Ford evaluó bajo condiciones de laboratorio la versión de gasolina del SEMTECH, llamada SEMTECH-G de la firma Sensors Inc., similar a su homólogo para motores diesel SEMTECH-D a excepción de que en este sólo se mide NO y no se utiliza línea precalentada para la medida de los THC (Gierczak, 2006).

2.2 Características de los principales sistemas PEMS desarrollados.

Como se comentó en el apartado 2.1, a nivel mundial se han desarrollado varios equipos PEMS, que se diferencian entre sí según ciertas características como pueden ser la toma y acondicionamiento de las muestras, la medición de caudal, los analizadores utilizados, las variables registradas, la instrumentación utilizada y el sistema de adquisición de datos.

Respecto a la toma y acondicionamiento de la muestra, existen en la actualidad dos maneras de llevarla a cabo, una es en *muestra diluida*, en donde se realiza la dilución de los gases de escape y se hace un muestreo a volumen constante – CVS, procedimiento utilizado en los laboratorios para la certificación de emisiones, y que tiene la ventaja de que la concentración de las especies en los gases de escape diluidos dentro del túnel, es proporcional al caudal másico de ese contaminante en el gas de escape. Este sistema tiene la desventaja del tamaño, por lo que se hace inviable para su utilización en equipos embarcados de medida de emisiones. Sin embargo, hay fabricantes como RAVEM (Weaver et al, 2004) que desarrollaron sistemas con el mismo principio de funcionamiento, pero adecuados para hacer parte de equipos embarcados. El sistema RAVEM, es un sistema de muestro a volumen constante, pero de flujo parcial, en el que sólo una parte del caudal de escape se diluye, usando un sistema de muestreo isocinético proporcional que continuamente ajusta el caudal de muestra que entra el mini-túnel de dilución al igualar la velocidad del gas muestreado a la velocidad del gas de escape en el punto de muestreo.

La otra forma de muestreo es el *muestreo directo*, en donde no se tienen los problemas de la muestra diluida, pero donde se hace indispensable la medida de caudal de gases de escape para el cálculo de las emisiones másicas instantáneas. En la actualidad la mayoría de los sistemas portátiles de medida de emisiones utilizan la toma directa de muestra conjuntamente con la medida de caudal de gas de escape.

En los equipos embarcados de medida de emisiones, para realizar la medida del caudal se utilizan mayoritariamente tres tipos de caudalímetros. El más comúnmente utilizado es el caudalímetro de presión diferencial, tipo tubo de Pitot convencional como el desarrollado por la EPA (Alphonse & Breton, 2000) o el anemómetro de hilo caliente usado para medir el caudal de aire de admisión inducido por un ventury sub-sónico ubicado en el tubo de escape o el anemómetro de hilo caliente para medir directamente el caudal de escape (EPA, 2005). Estas tres técnicas están dentro de los márgenes de exactitud y precisión que establece la normativa americana.

En cuanto a los analizadores de gas, se suele utilizar equipos de métodos espectroscópicos como el de absorción de infrarrojos no dispersivos (conocida por sus siglas en inglés NDIR) más usado para la medida de CO, CO₂ y HC o el de absorción de rayos ultravioleta no dispersivos (en inglés NDUV) usado comúnmente para la medida de NO y NO₂, también están los equipos de ionización de llama para la medida de HC, los equipos de quimioluminiscencia (CLD son sus siglas en inglés) y los sensores de estado sólido para la medida de los óxidos de nitrógeno. Donde cada una de estas

tecnologías tiene sus ventajas e inconvenientes para su uso en aplicaciones a bordo (on-board), como se verá en detalle en el capítulo 5.

De los equipos portátiles de medida de emisiones PEMS, disponibles en el mercado y en centros de investigación y universidades, se destacan los siguientes equipos, analizados de forma esquemática en la Tabla 2.1. (En el apartado 2.1, se muestra una relación más exhaustiva de los PEMS desarrollados a nivel mundial).

- **VPEMS.** Prototipo desarrollado por la Imperial Collage y SIRA para medir emisiones en los vehículos diésel y gasolina. Utiliza un analizador de 5-gases comercial, un GPS para determinar la posición y velocidad del vehículo, y obtiene información de la actividad del vehículo a través de la ECU (Ochieng et al, 2002 y North et al., 2004). Para tener información de la actividad del vehículo se recurre a una conexión OBD con las unidades del control electrónico ECU del vehículo. Mediante una conexión GSM se envían los datos a un centro de control remoto. Las concentraciones instantáneas medidas con el VPEMS fueron comparadas con las medidas tomadas en un banco de rodillos, demostrando que los analizadores sencillos “tipo taller” pueden ser usados en este tipo de medidas de emisiones a bordo con el uso de un coeficiente de compensación calculado por medio de una sencilla regresión lineal, obteniendo una precisión menor del 20% (Boulter et al., 2006).

Tabla 2.1 Características técnicas comparativas de PEMS disponibles en el mercado mundial

Nombre	Fabricante	Tipo de combustible			Emisiones						Lectura de parámetros de comportamiento del vehículo		Sensores adicionales (parámetros del entorno)				Sist. de comunicación con centros remotos
		Diésel	Gasolina	Combustibles alternat.	CO ₂	CO	HC	NO/NO _x	O ₂	PM	OBD	Sensores externos	Temp.	Humedad	Presión	GPS	
VPEMS	Imperial Collage /SIRA	✓	✓		✓ NDIR	✓ NDIR	✓ NDIR	✓ ECC	✓ ECC		✓						
MEMS	West Virginia University	✓			✓ HNDIR			✓ ZrO ₂			✓						
OBS 1000	Horiba	✓	✓	✓	✓ NDIR	✓ NDIR	✓ NDIR	✓ ZrO ₂			✓	✓	✓	✓	✓	✓	
OBS 2200	Horiba	✓	✓	✓	✓ HNDIR	✓ HNDIR	✓ HFID	✓ HCLD			✓	✓	✓	✓	✓	✓	
SEMTECH-DS	Sensors-Inc	✓	✓	✓	✓ NDIR	✓ NDIR	✓ HFID	✓ NDUV			✓		✓	✓	✓	✓	✓
AXION	Clean Air Technologies	✓	✓		✓ NDIR	✓ NDIR	✓ NDIR	✓ ECC	✓ ECC	✓ DL	✓	✓				✓	
TRL	TRL	✓	✓		✓	✓	✓	✓			✓					✓	
RAVEM	Energy Fuel & Emissions Engineering	✓	✓		✓ NDIR	✓ NDIR	✓ FID	✓ CLD		✓ filter						✓	

- **MEMS.** Diseñado por la Universidad de West Virginia para medir las emisiones de gases producidos por los camiones. Este sistema incorpora un sistema NDIR para la medida de CO₂, sensor de óxido de zirconio para la medida de NO_x, la medida del

caudal de gas de escape se realiza por medio de un caudalímetro tipo Pitot “Annubar”. Los datos de par motor y velocidad son extraídos de la centralita del vehículo (ECU) y toda la información la almacena en un sistema de adquisición que utiliza un software ad-hoc con una frecuencia de muestreo de 5Hz (Shade, 2000, Nine et al., 2004 y Krishnamurthy & Gautam, 2005).

- **Horiba OBS-series 1000/2000.** El modelo OBS-1000, diseñado para ser utilizado en actividades de investigación y desarrollo, utiliza analizadores NDIR (Non-Dispersive Infrared) para medir las concentraciones de CO, CO₂ y HC en los gases de escape, así como un sensor tipo ZrO₂ para medir NO_x y la relación aire/combustible. Este sistema utiliza un Caudalímetro Karman para medir el aire en la admisión e incorpora un GPS para la localización del vehículo (Kihara, 2004)

En el año 2005 Horiba presentó a la comunidad internacional este PEMS OBS 2200 (Akard, 2005) diseñado, concebido y validado con base en la normativa americana 40CFR part 1065-J (Bougher et al, 2010). Este sistema incluye un analizador para hidrocarburos inquemados por ionización de llama (HFID), un analizador de quimioluminiscencia (HCLD) para la medida de NO_x y un analizador CO/CO₂ tipo infrarrojo no dispersivo en caliente (HNDIR). Además, este equipo incluye la medida adicional de la concentración de vapor de agua para compensar la medida del HFID (Nakamura et al, 2007). El caudalímetro que utiliza este sistema es de tipo Pitot desarrollado por la EPA en el año 1999 (Alphonse & Breton, 2000). Este sistema tiene la posibilidad de medir emisiones en vehículos gasolina, diesel, y de combustibles alternativos (Irbid-fuel, LPG, y CNG). También puede ser utilizado para medir emisiones en vehículos no de carretera (off-road).

- **SEMTECH.** Sistema desarrollado por la firma Sensors Inc con dos variantes: SEMTECH QCM que utiliza la precipitación electrostática para medir emisión de partículas y MPS que es el complemento de SEMTECH permitiendo realizar medidas en los estados transitorios. Existen una versión para vehículos diésel y gasolina (SEMTECH-DS). Este modelo incluye un analizador de 5-gases, que se encarga de medir NO, NO₂, CO, CO₂ y THC con una precisión de $\pm 3.4\%$, lleva calefactada la línea de muestreo del sistema FID y el analizador ultravioleta no dispersivo-NDUV mide de forma discriminada el NO y el NO₂. La información de la velocidad del vehículo, rev/min del motor y el flujo de aire para la combustión, se registra accediendo a la lectura de la ECU, y mediante un GPS se define la posición del vehículo (Dearth et al, 2005 y Gierczak et al, 2006).
- **TRL GasScan.** Este sistema ha sido desarrollado por el “Transport Research Laboratory” inglés para medir las emisiones de gases producidas por el tráfico rodado en el centro de Londres. Este sistema incluye un analizador convencional de 5-gases marca Crypton, GPS situado en la parte delantera del vehículo y conectado a un ordenador a través de un puerto USB, interfaz OBD para a través de la ECU del vehículo obtener la velocidad del vehículo y los datos del motor. Este sistema incorpora 2 ordenadores, un para analizar las emisiones y el otro para la lectura de la ECU y recibir información del GPS (Boulter et al, 2006).

- **RAVEM.** El Ride-Along Vehicle Emissions Measurement puede medir emisiones de partículas además de las emisiones convencionales NO_x , CO y CO_2 con la opción adicional de medir los THC, SO_2 , NH_3 , N_2O , especies individuales de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y carbonilos como el formaldehído, acetaldehído y acroleína. El sistema RAVEM está basado en el muestreo de flujo parcial proporcional de los gases de escape del vehículo, de forma que la concentración medida de las diferentes especies en los gases de escape es proporcional al flujo másico de estas especies y por lo tanto la emisión másica total es igual a la integral de la curva de concentración. Debido a esta característica, este sistema no requiere la medida de caudal de gas de escape (Weaver et al, 2004).
- **AXION.** La firma Clean Air Technologies International Inc. desarrolló el PEMS Axion que sirve para medir las emisiones másicas de los vehículos con control electrónico de encendido por chispa (SI) y los motores de encendido por compresión. La unidad mide HC, CO, CO_2 , NO_x , O_2 en motores de gasolina y NO_x , CO, CO_2 , O_2 y PM en los vehículos diesel. Las emisiones másicas se obtienen a partir de la medida de concentración de cada especie con el caudal de gas de escape que se calcula con base en la información extraída de la unidad de control del vehículo (ECU). Los analizadores de HC, CO y CO_2 son del tipo infrarrojo no dispersivo (NDIR), la medida del NO_x se realiza por medio de una célula electroquímica (electrochemical cell -EEC) y para la medida de partículas se utiliza un equipo que usa el efecto de dispersión de luz láser (Gautam et al, 2004 y CATI web). Adicionalmente, la actividad del vehículo se obtiene a través de la ECU del mismo. En el caso de vehículos antiguos el sistema tiene prevista la incorporación de los sensores necesarios para medir la velocidad de giro del motor, así como la presión y temperatura del aire entrante para estimar la cantidad de aire y combustible consumidos. Por ultimo el sistema integra un GPS, para registrar la posición y velocidad del vehículo en un ordenador portátil. Este ordenador se encarga de sincronizar las lecturas, guardarlas y analizar el conjunto de datos: emisiones gaseosas, aire entrante, régimen del motor, y GPS.

Figura 2-3: Sistemas PEMS comerciales. a) SEMTECH-DS de Sensors. b) Axion de Clean Air Technologies International Inc. c) OBS-2200 de Horiba.

2.3 Problemas asociados a la medición dinámica de emisiones

Los problemas asociados a la medición dinámica instantánea de emisiones se comenzaron a estudiar a mediados de los años noventa, debido a la necesidad de medir las emisiones de hidrocarburos inquemados en los vehículos de encendido por compresión (diesel) durante los ciclos de prueba normalizados, para evitar la condensación de estos compuestos. Adicionalmente se tenía la necesidad de relacionar las emisiones instantáneas con la condición de operación del vehículo en los diferentes puntos de los ciclos de prueba normalizados. Messer y Clark de la Universidad de West Virginia (Messer et al., 1995 y Clark & Ganesan, 2001), Weilenmann y Ajtay del Laboratorio Federal Suizo (Weilenmann et al., 2001; 2003, Ajtay & Weilenmann, 2004 y Ajtay et al., 2005) y Bannister y Hawley (Bannister et al., 2004, Bannister et al., 2007, Hawley et al., 2003 y Hawley et al., 2004) de la Universidad inglesa de Bath estudiaron este problema para los equipos de medida de emisiones usados en banco de rodillos.

Martin Weilenmann define muy bien el problema de la medición dinámica instantánea, dice que a pesar de que los analizadores permitan frecuencias de muestreo de 1 Hz, las mediciones realizadas no reflejan la realidad, pues el tiempo de respuesta de los analizadores y la fluidodinámica de los gases de escape distorsionan las señales medidas haciéndose necesario su reconstrucción (Weilenmann et. Al, 2003). Para ello, Weilenmann inicialmente desarrolló un modelo simplificado de transporte de gases que usó para reconstruir la señal medida (Weilenmann, 2003), pero después utilizó un método basado en la teoría de señales (Ajtay & Weilenmann, 2004). Aríztegui de la Universidad Politécnica de Madrid trata el problema de la medición dinámica instantánea con equipos embarcados. En su tesis doctoral desarrolló un modelo fluidomecánico un poco más complejo que el desarrollado por Weilenmann (Weilenmann, 2003) que le permitió reconstruir los escalones de concentración pero sin llegar a reconstruir la medición instantánea real, por la complejidad de las ecuaciones obtenidas (Aríztegui, 2005).

Madireddy y Clark de la Universidad West Virginia compararon el método de reconstrucción de las señales propuesto por Ajtay & Weilenmann (Ajtay & Weilenmann, 2004) (differential coefficients method – DCM) con el método de inversión secuencial con el objetivo de mejorar la calidad de las medidas de los sistemas embarcado de medida de emisiones (PEMS) para las pruebas de vehículos en uso NTE. Demuestran que ambas técnicas sirven para reconstruir las señales, aunque es mejor el método DCM en unión con alguna técnica de sincronización (Madireddy & Clarkl, 2006). Por su parte Asano de la firma Horiba, comparó el método de deconvolución y el filtro inverso digital con medidas realizadas con analizadores de respuesta rápida y encontró que el método de deconvolución no es adecuado para compensar el tiempo de respuesta de los analizadores, pero si el filtro inverso digital (Asano et al., 2004). En contraposición a este estudio, la compañía Ford presentó en el año 2009 un modelo de reconstrucción de la señal de los analizadores basado en la técnica de deconvolución (Pakko, 2009).

Geivanidis y Samaras de la Universidad Aristóteles de Tesalónica (Grecia), desarrolla un modelo de compensación para todas las fuentes de distorsión de las señales de emisión

obtenidas utilizando los analizadores convencionales usados en los ciclos de prueba normalizados en banco de rodillos, basado en la teoría de sistemas de control. Los parámetros del modelo son estimados con base en la respuesta escalón del sistema y fue validado usando analizadores de muy alta velocidad de respuesta (Geivanidis & Samaras, 2008).

Por su parte, Manchur & Checkel de la Universidad de Alberta muestran la importancia de la resolución temporal de los analizadores sobre la exactitud de la medida de emisiones másicas y los beneficios de hacer una corrección en el posprocesamiento de los datos para corregir el efecto del bajo tiempo de respuesta de estos equipos. Sin embargo dice que a pesar de hacer la reconstrucción de la señal queda la incertidumbre de la concentración en los picos, con lo cual se introduce una incertidumbre en los resultados definitivos (Manchur & Checkel, 2005).

Además del problema que causa el tiempo de respuesta y el tiempo de retardo de los analizadores sobre la exactitud de la medida de emisiones másicas, la exactitud y precisión en la medida del caudal de escape juega un papel fundamental. Nakamura de Doshisha University de Japón, muestran que debido a que el caudal de gases de escape es pulsante, con fuertes cambios instantáneos, elevadas temperaturas, composición fuertemente variable y altos contenidos de partículas y vapor de agua, el caudalímetro requiere de un diseño especial, en donde es muy importante la sensibilidad y el tiempo de respuesta del equipo, así como el tiempo de muestreo, además de que es necesario un diseño físico especial del tubo de Pitot (Nakamura et al., 2004).

Debido a la imposibilidad de corregir todos los problemas en la medida dinámica de emisiones, la EPA en el año 2005, publicó un procedimiento para determinar la tolerancia de error en la medida de emisiones con equipos embarcados para las pruebas de emisiones de vehículos en uso NTE, basado en la técnica de Montecarlo (EPA, 2005). Adicionalmente en el 2006, la Universidad de California publicó los resultados del proyecto realizado para la CARB cuyo objetivo fue el de cuantificar la exactitud y la precisión de los PEMS disponibles en el mercado en relación a los métodos de referencia federal (FRM) usados en los ciclos de prueba normalizados (Miller et al., 2006).

Por su parte en Europa sólo hasta el 2006 se publicó, como parte del proyecto ARTEMIS (cuyo objetivo fue el de validar los modelos de emisiones del transporte y de inventario de emisiones), un informe sobre exactitud en las medidas de emisiones en banco de rodillo, en el que se incluyó dos metodologías para minimizar los diferentes errores presentes en las medidas instantánea de emisiones desarrolladas por el EMPA y TU-Graz (Le Anh et al., 2005) los cuales se basan principalmente en explicar los cambios en el valor de emisión que se presentan desde el sitio de formación hasta el punto de muestreo por medio de fórmulas e invertir estas fórmulas para transformar la señal de los analizadores en valores a la salida del motor o del sistema de postratamiento (Joumard et al., 2006).

En el año 2007, el instituto de investigación del automóvil de Polonia (BOSMAL), presentó un estudio sobre incertidumbre en la medida de emisiones gaseosas en banco de rodillo, en el cual desarrolló un modelo para calcular las incertidumbres basado en

análisis estadístico y técnica de propagación de errores (Szcotka & Bielaczyc, 2007). De igual forma, la compañía de petróleos de Brasil (PETROBRAS), presentó en el año 2008 un método para calcular las incertidumbres en la medida de consumo para turismos (Cavalcante & Nascimento, 2008).

En el año 2009, el Southwest Research Institute entregó a la comunidad científica los resultados del estudio sobre tolerancia en la medida de emisiones con equipos embarcados para las pruebas en uso de vehículos pesados que se comenzaron a realizar a partir del 2007. Se presentaron los procedimientos de evaluación, los modelos estadísticos y de simulación, así como los resultados obtenidos (Feist, 2009; Buckingham et al., 2009 y Sharp, 2009).

2.4 Metodología de medida de emisiones en tráfico real y de análisis de resultados

A finales de los años noventa, a medida que los sistemas embarcados de medida de emisiones se fueron desarrollando, los diferentes grupos de investigación empezaron a hacer estudios sobre emisión de gases contaminantes de vehículos en condiciones reales de funcionamiento. Los primeros trabajos fueron realizados por el instituto flamenco para la investigación tecnológica - VITO, por la Universidad de California y por el CARB. En estos primeros trabajos se buscó comparar los factores de emisión medidos en tráfico real con los medidos en los ciclos de prueba normalizados encontrando que las emisiones en tráfico real son en general más altas (Lenaers, 1996). También se buscó conocer el efecto del tipo de la calle, del comportamiento del conductor y del arranque en frío sobre las emisiones y el consumo de combustible, aunque la principal conclusión fue la de que no necesariamente los coches de bajas emisiones según la normativa de ese momento (91/441/EEC), tenían bajas emisiones en situaciones reales de tráfico (Vlieger, 1997). Con respecto al comportamiento del conductor, se demostró estadísticamente que las emisiones varían de conductor a conductor y que no depende de la frecuencia de operación a los distintos modos (ralentí, velocidad constante, aceleración, desaceleración, etc), sino de la intensidad de operación en cada modo de operación (Holmén & Niemeier, 1997). También se observó el efecto adverso de la pendiente de las carreteras sobre las emisiones (Cicero Fernandez et al., 1997). Adicionalmente, Vlieger del instituto flamenco para la investigación tecnológica-VITO, publicó en el año 2000 que el consumo de combustible aumentaba un 40% al realizar conducción agresiva y entre un 10 y 200% en condiciones de tráfico congestionado (Vlieger et al., 2000).

En el año 2002, el Departamento de Ingeniería Civil de la Universidad de Carolina del Norte hizo un estudio con el objeto de recomendar métodos para determinar factores de emisión con base en las medidas de emisiones con equipos embarcados, así como recomendar estrategias para realizar estas medidas en tráfico real. Entre los métodos recomendados de análisis de datos, se encuentra el análisis modal por modos de operación (velocidad constante, ralentí, aceleración, desaceleración), la elaboración de mapas de emisiones de los motores en condiciones estacionarias de operación y un método combinado de mapa de emisión basado en emisiones totales por modos de

operación (Frey et al., 2002). En el año 2003, ellos mismos publicaron que para realizar un estudio modal con equipos embarcados, es necesario caracterizar la variabilidad entre vehículos por medio de múltiples ensayos realizados con el mismo conductor, vehículo y recorrido, debido a la naturaleza observable pero incontrolable del tráfico real (Frey et al., 2003). También realizaron estudios sobre puntos de altas emisiones “Hot Spot” en dos recorridos arteriales, determinando estadísticamente un conjunto de variables que explica este fenómeno (Unal et al., 2004).

Así mismo, la Universidad de Carolina del Norte en colaboración con el Instituto de Tecnología de Georgia, realizaron un estudio modal sobre el efecto de la temporización y coordinación de los semáforos, encontrando que la coordinación de los semáforos y por lo tanto el control de la congestión de tráfico es un medio eficaz para controlar las emisiones (Unal et al., 2003). En el año 2008, publicaron un estudio sobre emisiones en maquinaria de obras públicas con equipos embarcados, estudiando de forma comparativa la maquinaria antigua y la nueva, así como el efecto de sustituir el combustible diesel por biodiesel. En este estudio se muestra que hay una despreciable reducción de emisiones al utilizar biodiesel, pero es significativa la reducción de emisiones en la maquinaria nueva (Frey et al., 2008a). En este mismo año, también publicaron un estudio en el que pretendió cuantificar la variabilidad que introduce el recorrido, hora del día, pendiente y el vehículo sobre las emisiones contaminantes. Se demostró que las pendientes positivas se asocian a un 20% de aumento en las emisiones locales y por lo tanto es un factor de importancia a tener en cuenta en los modelos de estimación de emisiones (Frey et al., 2008b).

Durante el 2003, en la Universidad de Alberta se adelantó un estudio con equipos embarcados de medida de emisiones para determinar el efecto de la temperatura ambiente sobre los factores de emisión en tráfico real. Se demostró que la temperatura ambiente juega un papel importante en la formación de emisiones que debe ser tenido en cuenta en el diseño del sistema de control del vehículo (Hawirko & Checkel, 2003). En el año 2007, esta misma universidad realizó un par de estudios con equipos embarcados. El primero fue sobre eficiencia energética con vehículos ligeros en el que se determinó que para una demanda de potencia por encima del 30% de la potencia máxima, la eficiencia energética es máxima, con lo cual se justifica la reducción de tamaño de los motores como estrategia para reducir las emisiones contaminantes de los vehículos (Gao & Checkel, 2007a). En el segundo estudio se analizaron factores de emisión (g/kW.h, g/km y g/kg combustible) en varios vehículos con el fin de desarrollar un modelo para calcular las emisiones máscas acumuladas en vehículos similares a los ensayados (Gao & Checkel, 2007b).

Otros estudios de emisiones con equipos embarcados, como el adelantado por el Imperial College de Londres en el año 2004, se enfocaron en buscar relaciones entre las emisiones con la velocidad y la aceleración (Noland et al., 2004). La Universidad Politécnica de Madrid, presentó en el año 2005 un estudio de validación de metodología de medida en tráfico real y un estudio sobre la influencia del estilo de conducción sobre las emisiones y el consumo (Casanova et al., 2005). La Universidad de Leeds (Reino Unido), por su parte, utilizó la medida embarcada de emisiones para estudiar el efecto de los reductores de velocidad, el efecto de los cruces, del conductor y el efecto de la pendiente de la vía, demostrando que en las cuestas arriba se consume más combustible

y son mayores las emisiones que en las cuestas abajo, la presencia de cruces ocasionan un aumento significativo en las emisiones y que ambientalmente es mejor forzar la reducción de la velocidad de forma suave con limitaciones de velocidad y cámaras de control que utilizar los reductores de velocidad porque se incrementan las emisiones de CO, CO₂, NO_x y THC entre un 100 y un 200% (Daham et al., 2005, Li et al., 2006, Li et al., 2007 y Li et al., 2010). Así mismo, en el año 2007, adelantaron un estudio sobre emisiones en arranque en frío de un vehículo EURO4, en el que además de las variables registradas por el PEMS, se midieron varias temperaturas a lo largo del tubo de escape y en el catalizador (Li et al., 2008).

En los últimos años también se han desarrollado modelos de emisiones en microescala, basados en medidas de emisiones en tráfico real con equipos embarcados, como el desarrollado por VITO como parte del proyecto DECADE del 5º programa Marco de la Comisión Europea (Pelkmans & Debal, 2006). También se ha determinado que la medida de emisiones con equipos embarcados es una manera alternativa más rápida y más rentable de medir el consumo de combustible en vehículos pesados, que normalmente se realiza por medio de medida gravimétrica en el tanque de combustible (Ensfield, 2006). La Universidad de Connecticut en el año 2006, realizó también un estudio con equipos embarcados de medida de emisiones para evaluar la variabilidad impuesta por el conductor sobre las emisiones en los diferentes tipos de vías, reafirmando que la variabilidad impuesta sobre las emisiones y sobre el consumo por el conductor es significativa y por lo tanto se hace necesario cuantificarla (Jackson et al., 2006).

En el año 2005, la Texas Southern University, reafirmó que no sólo la actividad del vehículo, sino que el tipo de vía y las especificaciones del vehículo afectan fuertemente sobre las emisiones (Qiao et al., 2005). Por su parte, la Universidad “La Sapienza” de Roma en el año 2007 mostró que durante los transitorios de operación y en particular durante las aceleraciones, las emisiones contaminantes y el consumo de combustible aumentan fuertemente debido al enriquecimiento de la mezcla (Ortenzi et al., 2007).

Durante el año 2009, el TNO publicó un informe basado en medidas de emisiones con equipos embarcados en el que dice, entre otras cosas, que se ha detectado que las emisiones de NO_x en vehículos pesados EURO5 en situaciones reales de tráfico urbano, son 3 veces más altas que los límites impuestos y son muchos más altas que las emisiones estimadas con base en los ciclos de prueba normalizados. Estos resultados ponen de manifiesto la necesidad de incluir pruebas con equipos embarcados en la legislación EURO6 (Ligterink, 2009).

Científicos de la Universidad de Aveiro (Portugal), North Carolina State University, Carnegie Mellon University y VITO, por su parte, realizaron un estudio para evaluar si la metodología basada en medidas de emisiones instantáneas con equipos embarcados desarrollada con anterioridad para vehículos a gasolina podía ser usada de igual forma en vehículos diesel, comparando así turismos de estos dos tipos. Se demuestra que las emisiones y el consumo de combustible puede ser explicado con base a la potencia específica y que esta metodología permite estimar el consumo y las emisiones para una gran variedad de ciclos de conducción (Coelho et al., 2009).

En el año 2009, La Universidad de California hizo un estudio sobre el impacto de la pendiente de la carretera sobre el consumo y las emisiones contaminantes con el fin de mejorar los algoritmos de navegación avanzada que selecciona el recorrido óptimo basado en el criterio de menor distancia, menor tiempo y menores emisiones y consumo (Boriboonsomsin & Barth, 2009). La Universidad de Viena, por su parte, utilizó medidas de emisiones con equipos embarcados para estudiar las prestaciones de un turismo de gas natural optimizado (Pucher & Cachón, 2009). La Universidad Tecnológica de Poznan, ha hecho un par de estudios con equipos de medida de emisiones embarcados para conocer la influencia de las propiedades dinámicas de un determinado motor sobre las emisiones y generar la matriz de emisión en la zona normal de funcionamiento del motor en tráfico urbano (Pielecha et al., 2009 y Pielecha et al., 2010). Adicionalmente, la Universidad Politécnica de Madrid realizó también un estudio con equipos embarcados para comparar diferentes tecnologías de postratamiento de gases de escape en autobuses urbanos funcionando con diesel y biodiesel (López et al., 2009).

En el último congreso de Transport and Air Pollution TAP 2010, llevado a cabo en Zurich, se presentaron varios trabajos con base en medidas de emisiones con equipos embarcados desarrollados por universidades y centros de investigación. Entre ellos tenemos un estudio de emisiones de camiones de basura en Milán desarrollado directamente por el Joint Research Centre de la Comisión Europea (Dilara et al., 2010), otro desarrollado por la Universidad de Leeds sobre influencia del tráfico sobre la emisión de NO₂ primario (Hardy et al., 2010). El TNO presentó un trabajo de investigación llevado a cabo con vehículos pesados EURO5 donde se comprobó, con equipos embarcados de medida de emisiones, algo tan sorprendente como que el sistema SCR de postratamiento de gases es ineficaz en tráfico urbano, con lo cual el NO_x emitido es tres veces mayor que el límite de emisión (Vermeulen et al., 2010).

2.5 Proyectos de investigación sobre PEMS

Debido al creciente interés mundial por realizar medidas oficiales de comprobación y/o certificación de emisiones de motores de combustión interna en condiciones reales de funcionamiento, se han llevado a cabo varios proyectos en Europa y en América con el fin de evaluar y validar las prestaciones de los PEMS disponibles con relación a los sistemas normalizados de medida de emisiones, así como determinar los procedimientos oficiales para los ensayos oficiales NTE. Los proyectos PEMS más importantes son:

- Proyecto Europeo sobre Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones: Proyecto “EU-PEMS”
- OSCAR: On-board emission measurements in Central London
- Proyecto americano de Evaluación de PEMS para inventario de emisiones y ensayos de certificación NTE en motores diésel de servicio pesado.

- Proyecto sobre determinación de errores de medida de factores de emisión usando PEMS para el programa de control de emisiones de motores pesados en uso (Heavy-Duty In-Use Testing – HDIUT).

Los objetivos y las principales aportaciones de estos proyectos se relacionan a continuación. De todas formas, los dos últimos proyectos relacionados son los más importantes, debido a la implicación normativa que ha tenido y por la profundidad y rigor con que se han realizado. Por lo tanto, los procedimientos y resultados obtenidos en estos proyectos, así como lo establecido en la norma americana 40CFR 1065, servirán de base para el desarrollo de los capítulos siguientes de esta segunda parte de la presente tesis doctoral.

2.5.1 Proyecto Europeo sobre Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones: Proyecto “EU-PEMS”

La Comisión Europea a través de la dirección general de Empresa e industria DG ENTR en cooperación con el JRC (Joint Research Centre) lanzó en enero del 2004 un programa de investigación para estudiar la factibilidad de usar PEMS en la inspección técnica de vehículos pesados en uso “in-use conformity checking” (IUC). Las actividades técnicas y experimentales empezaron en Agosto del 2004. (Bonnell, 2006)

Objetivos del Proyecto:

Los principales objetivos de este proyecto que culminó en el año 2006, fueron:

- Evaluar y validar entre sí la aplicación y prestaciones de los diferentes sistemas portátiles de medida de emisiones disponibles en el mercado mundial y en comparación con los sistemas estandarizados para el ensayo de uso en conformidad (IUC).
- Definir el protocolo de ensayo para el uso de la instrumentación portátil con el IUC de los vehículos pesados y su implementación.
- Evaluar la posibilidad de desarrollar un método simplificado del tipo NTE similar al desarrollado en EE. UU.
- Evaluar los sistemas PEMS en tráfico real, con el fin de recopilar datos de emisiones reales en diferentes lugares y en diferentes vehículos con motores comunes en el mercado europeo.

Requisitos de los PEMS ensayados:

Los requisitos generales, en cuanto a la instrumentación para las emisiones gaseosas, que debían cumplir los PEMS seleccionados para la primera etapa del proyecto EU-PEMS fueron:

- Ser pequeños, ligeros y fáciles de instalar
- Operar con bajo consumo de potencia de tal forma que al menos 3 horas de ensayo se pudieran realizar ya sea con un pequeño generador o con un conjunto de baterías.
- Medir y registrar las concentraciones de NO_x, CO, CO₂, THC en los gases de escape.
- Registrar los parámetros relevantes (información del ECU del motor, posición del vehículo desde un GPS, condiciones ambientales), todo incluido en un solo registrador.
- Ser robustos y que tuvieran la posibilidad de operar bajo condiciones ambientales demandantes, tales como variaciones de temperatura y vibraciones.

Los PEMS que fueron probados en este proyecto y que cumplieron con las especificaciones fueron el SEMTECH-D de Sensors y el OBS-1300 de Horiba.

Las principales conclusiones:

Las prestaciones (exactitud y repetibilidad) de los sistemas PEMS ensayados tanto para las medidas de emisiones como para el caudal de gases de escape es satisfactorio.

El cálculo del caudal de los gases de escape mediante el consumo de combustible y/o caudal de aire de admisión y/o el dosado debe ser permitido dado que la calidad de los valores obtenidos por estos procedimientos corresponde con las medidas en las pruebas de homologación.

En cuanto a la medida de emisiones gaseosas, la correlación entre los sistemas PEMS y los sistemas de referencia (laboratorio) es buena tanto para estado estacionario como para condiciones transitorias. Los instrumentos portátiles muestran tiempos de respuesta y exactitudes cercanas a los analizadores de laboratorio, aparte de la medida de CO. En este último caso, el analizador portátil tenía un rango ancho y fue comparado con dos analizadores de laboratorio –uno para rango alto y otro para el rango bajo.

Se debe tener mucho cuidado con la calibración y la verificación de ambos sistemas (la calibración tanto del PEMS como del sistema de referencia se debe hacer con el mismo gas de calibración). El muestreo de los gases de escape es un factor importante: se debe evitar el fenómeno de condensación de los HC, monitorizando la temperatura de los gases de escape en varios puntos de la línea caliente evitando así, la presencia de puntos fríos.

Para futuros proyectos, se prevé el estudio de la robustez de los PEMS para evaluar las bajas emisiones de los vehículos con nuevas tecnologías, la exactitud y precisión de los analizadores, los arranques en frío para los vehículos equipados con convertidores catalíticos y trampas de partículas, y por último los combustibles alternativos (Laguna & Pekár, 2007).

2.5.2 Proyecto OSCAR: On-board emission measurements in Central London (Boulter et al, 2006)

Como parte del programa “Energy, Environment and Sustainable Development – EESD desarrollado por Transport Research Laboratory – TRL, en Inglaterra, en el año 2002 comenzó la ejecución del proyecto titulado: Optimised Expert System for Conducting Environmental Assessment of Urban Road Traffic – OSCAR con la participación de varios países Europeos.

Dentro de este macroproyecto, el quinto subproyecto: “On-Board Emission Measurements in Central London” tuvo como objetivo encontrar un factor de emisión apropiado para las situaciones de circulación lenta y tráfico urbano congestionado. Esto se realizó basándose en las características de conducción de 4 ciudades típicas Europeas y el uso de estas en el desarrollo de ciclos de conducción para el uso dentro de un programa de medida de emisiones en 20 vehículos livianos.

El uso de un sistema embarcado de medida de emisiones PEMS en Londres fue incorporado dentro del proyecto para dar un acercamiento a la validación de esos factores de emisión obtenidos. Por lo tanto, el principal objetivo de esta sub-tarea fue revisar los sistemas de medida de emisiones a-bordo disponibles en el mercado y dar información de la distribución temporal y espacial de las emisiones típicas de un coche moderno al circular por el centro de una gran ciudad para comparar los datos de emisión en servicio con los datos obtenidos en las pruebas de laboratorio, y finalmente comparar los mapas de emisiones con los mapas de calidad de aire en un intento de dar información sobre los lugares de alta polución, pero esto ultimo no se logró realizar.

En términos absolutos, las emisiones medidas a bordo no correspondieron con las medidas normalizadas en bancos de rodillos (Euro III gasolina), sin embargo, para los ciclos OSCAR desarrollados estas medidas fueron similares, indicando que estos ciclos OSCAR están probablemente más cercanos a representar la realidad.

Para las condiciones de muy-baja-velocidad (Ciclo OSCAR H), las diferencias entre las medidas en banco de rodillos y las medidas a bordo fueron muy elevadas pues cualquier pequeña diferencia en la pauta de conducción tiene un efecto muy alto sobre las emisiones. Esto puede claramente tener implicaciones para el modelado de emisiones a baja velocidad siendo necesario seleccionar cuidadosamente los factores de emisión.

Revisión de los sistemas medidas ON-BOARD:

Se revisaron los sistemas PEMS disponibles en el mercado en el año 2006: VPEMS del imperial College/SIRA, MEMS de la West Virginia University, OBS-1000 de Horiba, SEMTECH QCD y SEMTECH-D de Sensors, PEMS de Clean Air Technologies, TRL GasScan del TRL, tanto en especificaciones técnicas como en costos y finalmente se decidieron por la compra de un equipo TRL, pues el alquiler de un equipo HORIBA o SEMTECH se les salía del presupuesto y técnicamente se justificó la compra por el estudio comparativo que hizo previamente TRL entre los equipos de HORIBA, VPEMS y TRL. (McCrae et al., 2006)

Vehículo de prueba y sistema de medición

Usaron para las pruebas un coche de gasolina (Ford Mondeo 2000 cm³) conforme a la normativa Euro III. El vehículo fue instrumentado con el sistema TRL para medida de emisiones On-board, usando adicionalmente la interfaz OBD y sistema GPS.

El software usado in OSCAR para leer las salidas del OBD (llamado Vehicle Explorer Scan Tool Browser, versión 1.06) está disponible en internet en <http://www.obd-2.com/#view>. Este software lee una multitud de parámetros en tiempo real, pero para poder tener una frecuencia de muestreo de menos de 2 Hz se tuvo que limitar a leer los datos más importantes como son la velocidad del vehículo (resolución 1 km/h), régimen de motor (resolución 1 min⁻¹), porcentaje de carga del motor y posición del acelerador.

Rutas de prueba

Se usaron 7 diferentes rutas del centro de Londres y las pruebas se hicieron en un periodo de 3 días (12 al 14 de julio 2005)

Comparación con medidas de banco de rodillos

Las medidas tomadas a-bordo del coche se compararon con el promedio de las medidas tomadas en un banco de rodillos con 3 coches similares y en ciclo de homologación estándar para coches EURO III gasolina y 10 ciclos OSCAR desarrollados para banco de rodillos.

Conclusiones

Algunas de las conclusiones de este sub-proyecto fueron: (Boulter & McCrae, 2006)

- Las pruebas llevadas a cabo permitieron demostrar que todos los PEMS ensayados, son adecuados para la medida en continuo de emisiones contaminantes en el gas de escape y características operacionales.
- Sólo las emisiones de CO₂ muestran una buena correlación con la velocidad del vehículo.
- En términos absolutos, las emisiones medidas en carretera no corresponden con las medidas en banco de rodillos para el ciclo de homologación estándar, sin embargo, para los ciclos OSCAR las medidas si fueron similares, lo que indica que estos ciclos desarrollados por OSCAR si son probablemente un mejor reflejo de la realidad.
- Para las condiciones de muy baja velocidad hubo grandes diferencias entre las medidas tomadas en banco de rodillos con las medidas en carretera, indicando una influencia muy marcada de la pauta de conducción, lo cual hace que haya que tener mucho cuidado en la selección del factor de emisión cuando se modela las emisiones a baja velocidad.

2.5.3 Proyecto sobre evaluación de PEMS para inventario de emisiones y ensayos de certificación NTE en motores diésel de servicio pesado

Este proyecto fue desarrollado en Estados Unidos por la Universidad de California para California Air Resources Board (CARB) y para la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) entre el año 2003 y el 2006 con el objetivo de medir las prestaciones de los métodos alternativos de medida de emisiones con respecto al método de referencia con banco de rodillo o en banco de motor establecido en la normativa americana (Miller et al, 2006). Con este fin, la mejor alternativa a la medición de laboratorio es el uso de sistemas portátiles de medida de emisiones (PEMS) que se convirtió en el foco de esta investigación. La intención de este proyecto era poner a prueba los PEMS en una amplia gama de condiciones de funcionamiento del motor de tal forma que se pudiera saber si estos sistemas son adecuados para proveer datos para inventarios de emisiones y para ensayos de certificación del tipo NTE (Not-To-Exceed). Los resultados del proyecto incluye la cuantificación de la exactitud y de la precisión de los PEMS disponibles en el mercado en relación con los métodos de referencia federal (FRM). Para ello se utilizó un laboratorio móvil con equipamiento conforme a los métodos de referencia federal, desarrollado por la Universidad de California, conocido con la sigla MEL (Mobile Emissions Laboratory).

Procedimiento utilizado

Se utilizaron dos tipos de ensayo, uno sobre medidas en estado estacionario utilizando un generador eléctrico para representar un estado de carga constante y un segundo tipo de ensayo realizado en un camión de servicio pesado equipado con motor diésel, en condiciones cuasi-estacionarias y en transitorios dentro de un rango de carga entre el 5 y el 100%. Para estos ensayos se midieron las emisiones de forma simultánea cada uno de los PEMS con el laboratorio móvil (MEL).

Las pruebas con fuente móvil (camión) se realizaron en un banco dinamométrico para vehículos de servicio pesado y los resultados se utilizaron para la determinación de las tolerancias establecidas por la EPA en la nueva regulación de control de emisiones de vehículos en uso NTE. Las pruebas realizadas incluyeron:

- 3 puntos de operación cuasi-estacionarios (régimen constante) dentro de la zona NTE,
- un ciclo denominado “Stepped NTE” diseñado con cambios entre puntos estacionarios de operación con aceleraciones suaves dentro de la zona NTE.
- El ciclo de conducción urbano (Urban Dynamometer Driving Schedule – UDDS)
- Ciclo a velocidad de crucero de 50 mph.

Estos dos últimos ciclos de conducción se incluyeron como mejor aproximación a la operación en condiciones de tráfico real y dato de referencia para los actuales inventarios de emisiones.

Los resultados de emisión medidos con el laboratorio móvil, sólo fue dado a conocer a los fabricantes del PEMS hasta el día en que se dieron los resultados finales, en los que se incluyó las desviaciones en concentración y en caudal entre los PEMS y el método de referencia federal, debido a que estos dos valores son independientes y críticos para el cálculo de los factores de emisión.

Resultados

En este proyecto se probaron ocho PEMS, tres de ellos solamente tenían medida de partículas (Laser Induced Incandescence LII de Artium, Photoacoustic Microsoot Sensor de AVL y DustTrak de TSI), tres solamente de gases (OBS-1300 y OBS-2200 de Horiba y el SEMTECH-D de Sensors) y sólo 2 de ellos medían tanto partículas como especies gaseosas (Montana System de Clean Air Technology y Ravem system de Engine, Fuels and Emissions Engineering).

Para las medidas de NO_x en estado estacionario, se observó que la exactitud de los equipos varia con el grado de carga del motor y los más precisos fueron el Horiba y el SEMTECH, el primero con una desviación máxima el aproximadamente el 12% y 8% respectivamente. El equipo Montana System de Clean Air Technology obtuvo en algunos casos desviaciones del 30% y el Ravem system, una desviación del -50% en condiciones de baja carga, pero en las otras condiciones de carga mostró desviaciones menores del 6%, debido principalmente a problemas con la dilución a flujo parcial con bajo caudal.

Para las medidas de CO_2 , sin tener en cuenta el excesivo error del sistema RAVEM en bajos grado de carga, los PEMS mostraron en general errores de exactitud menores del 14%. El Horiba mostró mejor exactitud a bajos grados de carga y no muy alta exactitud a altos grados (alrededor del 10%). El sistema Montana y el SEMTECH mostraron ser los mejores equipos para medida de CO_2 mostrando errores máximos del orden del 5%.

En cuanto a la medida de partículas, las medidas realizadas con PEMS fueron significativamente menores a las medidas con el sistema MEL. El sistema Montana mostró desviaciones mayores al 60% y el sistema RAVEM errores entre el 20 y el 65%. En cuanto a las emisiones de HC en estado estacionario, las diferencias entre la medida con PEMS y la medida con el equipo de laboratorio (MEL) fueron muy acusadas, sólo el equipo SEMTECH mostró errores menores del 75%.

En cuanto a las medidas realizadas en el camión, los resultados, de nuevo mostraron diferencias significativas entre los PEMS analizados. Las emisiones de NO_x medidas por los PEMS mostraron ser mayores a las de los equipos de laboratorio. El equipo SEMTECH mostró diferencias entre un 3 y 17% y el Horiba entre un 26 y 47%. Por su parte la medida de CO_2 , importante porque determina el consumo específico, mostró diferencias de alrededor del 5% para el SEMTECH y entre el 9 y el 30% para equipo Horiba. Con respecto a las medidas de CO, el equipo SEMTECH mostró una buena correlación con respecto a los equipos de laboratorio, aunque consistentemente mayor. En cuanto a la emisión de partículas, el sistema Ravem y el AVL mostraron las mejores correlaciones con diferencias entre el 15 y el 25%.

Conclusiones y recomendaciones

Con este proyecto se vio la importancia de medir la exactitud y la precisión de los PEMS ya que estos sistemas se usan para tomar datos de emisiones de vehículos en condiciones reales de uso para fines de inventario de emisiones y para llevar a cabo las pruebas de conformidad de emisiones de vehículos en uso (NTE). Además de que se constató la necesidad de medir emisiones tanto en laboratorio como en condiciones reales de uso para la correcta realización de los inventarios de emisiones. A raíz de este proyecto se formó un grupo de asesores para investigar sobre cómo mejorar los sistemas portátiles de medida de emisiones para que las medidas con PEMS se ajusten a los equipos convencionales de laboratorio. Además de que se constató la necesidad de establecer procedimientos de control para garantizar la calidad de las medidas realizadas con los PEMS.

Una observación importante es que debido a que los PEMS involucran instrumentos con diferentes principios de medida y en sí, metodologías de medida diferentes, los grados de ajuste con respecto al método normalizado de medida de emisiones varían de fabricante a fabricante y en un mismo equipo para los diferentes factores de emisión medidos. Por lo tanto, el resultado de este proyecto fue el de determinar el mejor equipo y la mejor metodología de los PEMS disponibles hasta ese momento.

Los resultados mostraron que entre los 4 PEMS de medida de gases el SEMTECH es el que más se ajusta a los resultados con respecto al método convencional de laboratorio. Con respecto a la medida de caudal, en general se observó un buen ajuste, y el método más creativo fue el utilizado por Clean Air Technology, basado en el cálculo del caudal de escape con base en los parámetros de funcionamiento del motor y principios termodinámicos, que mostró un buen ajuste sobre todo en condiciones estacionarias.

Para las emisiones de NO_x , el mejor grado de ajuste encontrado está entre un 5 y un 10% de diferencia con respecto al método normalizado. En cuanto al factor de emisión de CO_2 el equipo que más se ajustó mostró diferencias alrededor del 5%. Las medidas de HC mostraron diferencias muy grandes con los métodos normalizados, debido a los bajos valores de emisión, lo cual induce la necesidad de mejorar la exactitud de los equipos y procedimientos utilizados para la medida de HC en los PEMS.

Los grados de ajuste del CO en condiciones estacionarias dieron del orden del 5%, pero en las otras condiciones, los grados de ajuste fueron más bajos, llegando incluso a presentar diferencias de más del 50%. Con respecto a la medida de partículas no se consiguió la calidad de medida requerida, por lo cual se hace necesario un mayor desarrollo de los equipos de medida de partículas en tiempo real.

2.5.4 Proyecto sobre determinación de errores de medida de factores de emisión usando PEMS para el programa de control de emisiones de motores pesados en uso (Heavy-Duty In-Use Testing – HDIUT)

Este proyecto se desarrolló en Estados Unidos a continuación del proyecto sobre evaluación de PEMS, comentado en el apartado anterior. Este proyecto fue realizado por el Southwest Research Institute para la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos (USEPA) con el objeto de determinar los errores incrementales que existen entre la medida de emisiones bajo condiciones controladas en un laboratorio con equipos normalizados y la medida realizada con equipos portátiles de medida de emisiones (PEMS) (Fiest et al, 2008). Este proyecto se culminó satisfactoriamente en el año 2008, con la determinación de estos errores de medida "Measurement Allowances" que inmediatamente se plasmaron en la normativa americana (Federal Register Vol. 73 No. 50, 2008) (FR, 2008).

Este proyecto se realizó como respuesta a una demanda legal presentada contra la EPA en el 2001 por la asociación de fabricantes de motores (EMA) y algunos otros fabricantes individuales en relación con ciertas partes de la normativa NTE. Esta disputa se resolvió el 03 de junio 2003 y una parte de la sentencia dice:

“The NTE Threshold will be the NTE standard, including the margins built into the existing regulations, plus additional margin to account for in-use measurement accuracy. This additional margin shall be determined by the measurement processes and methodologies to be developed and approved by EPA/CARB/EMA. This margin will be structured to encourage instrument manufacturers to develop more and more accurate instruments in the future.” (Fiest et al, 2008)

El resultado final de este proyecto fue el determinar un conjunto de porcentajes de error correspondientes a la medida de los factores de emisión específica de cada uno de los contaminantes regulados (NMHC -Hidrocarburos sin incluir metano, NO_x y CO). El valor de error incremental (“measurement allowance”), por lo tanto, es igual al % de error multiplicado por el límite de emisión establecido para las pruebas NTE realizadas en laboratorio con equipos normalizados, de tal forma que el límite de emisión NTE para motores ensayados con PEMS es igual al límite establecido para ensayos normalizados en laboratorio más el error incremental determinado.

Tabla 2.2 Porcentajes de error en factores de emisión específica determinados experimentalmente para pruebas NTE medido con PEMS con relación a equipos de laboratorio normalizados.

Factor de emisión específica	% de error con respecto a límites NTE con equipos de laboratorio
NO _x	22,3
NMHC	10,08
CO	2,58

Los porcentajes de error, que en el caso de la presente tesis son los más relevantes, se muestran en la Tabla 2.2.

Metodología

Puesto que realizar las mediciones necesarias para determinar y cuantificar de forma directa todas las fuentes de error en las medidas con equipos embarcados es inviable, se optó por construir un modelo estadístico para la cuantificación de los errores de medida. Este modelo estadístico se basó en la metodología de Montecarlo (muestreo aleatorio) para simular la variación de los errores sobre medidas repetitivas. El modelo se ejecutó miles de veces con el fin de generar un conjunto amplio de datos usados para la determinación robusta de los “measurement allowances”.

El modelo incorporó varios componentes de error, que representan diferentes fuentes potenciales de error entre las medidas de laboratorio y los PEMS. Cada uno de los componentes de error está asociado a una prueba experimental en laboratorio diseñada para cuantificar el efecto de cada una de las fuentes potenciales de error. El resultado de cada experimento fue un modelo empírico, a menudo visualizado como una superficie en tres dimensiones y llamado superficie de error (“error surfaces”). Los errores individuales, llamados “deltas”, son la diferencia entre cada medida individual PEMS y su correspondiente medida de referencia (laboratorio), en donde valores positivos indican medidas del PEMS mayores que la de laboratorio.

El modelo incorporó un total de 37 superficies de error, que fueron agruparon en las siguientes categorías:

1. **Errores en estado estacionario.** Este término de error caracteriza la precisión y la exactitud que tiene el equipo sobre medidas repetidas en estado estacionario. Este error fue caracterizado por medio de ensayos en condiciones estacionarias en banco de motor. Se incluyen los errores de este tipo para la medida de concentración de cada una de los contaminantes regulados y para la medida de caudal.
2. **Errores en transitorios.** Este término de error caracteriza los errores de precisión en medidas repetidas de eventos NTE de 30-segundos. El error de exactitud no se incluye en este error debido a la incertidumbre que hay con respecto a la calidad de las medidas de emisiones en eventos NTE de 30 segundos con los equipos de laboratorio. Por lo tanto, estos errores se determinaron repitiendo las pruebas transitorias. Estas pruebas transitorias están formadas por una serie de eventos NTE de 30 segundos que se repiten de forma aleatoria. El modelo incorpora errores transitorios para los contaminantes regulados, la medida de caudal y para los datos tomados de la unidad de control del motor.
3. **Errores en medida de par y consumo de combustible.** Este tipo de error permite cuantificar la exactitud de las medidas de par y consumo específico de combustible que realiza la unidad del control del motor en varias condiciones de operación (altitud, temperatura, combustible, etc.) con respecto a las medidas de laboratorio. Todas las pruebas se realizan en condiciones estacionarias en banco de motor con capacidad para simular condiciones ambientales múltiples.
4. **Errores en la medida de caudal.** Este término incluye los errores debidos al carácter pulsante del caudal y los debidos a la instalación incorrecta del caudalímetro por la que el perfil de velocidad pueda no estar totalmente desarrollado. Las pruebas

para determinar este error se realizaron en varios motores probados en banco de motor comparando el caudal medido con el PEMS y el caudal medido con los equipos de laboratorio en condiciones estacionarias.

5. **Errores por efectos ambientales.** Este término de error fue usado para medir el efecto de las condiciones ambientales sobre los PEMS, como pueden ser la temperatura, presión, vibración, interferencia electromagnética, etc. Para determinar este error se realizaron una serie de ensayos en un laboratorio especial de la SwRI que permite controlar estas variables ambientales, mientras el PEMS medía gases de referencia calibrados. En este caso el delta fue el valor medido por el PEMS menos el valor de referencia del gas de calibración.
6. **Otros errores.** Se tuvieron en cuenta adicionalmente otras fuentes de error como son la falta de sincronización entre las señales, la variación en la carga del motor aún en condiciones estacionarias. Estos errores se determinaron como ejercicio computacional con base en los datos adquiridos en las otras pruebas experimentales.

Los ensayos para la determinación de estos errores fueron realizados sobre tres motores, uno Heavy Heavy-Duty (HHD), otro Medium Heavy-Duty (MHD) y otro Light Heavy-Duty (LHD), modelos 2005-2006. Para simular modelos posteriores a 2007 se utilizaron varios filtros de partículas de regeneración primaria pasiva que se instalaron en los motores.

El objetivo inicial era el determinar los errores incrementales con base en varios PEMS, pero esto no fue posible, ya que en aquel momento, sólo un fabricante Sensors estuvo en capacidad de suministrar varios equipos para la realización de las pruebas, el SEMTECH-DS y por lo tanto los errores incrementales determinados en este proyecto están basados en este PEMS, aunque el hecho de haber trabajado con varias unidades SEMTECH-DS permitió abarcar el error de variación entre equipos de un mismo fabricante. Al final del tiempo de ensayo estuvieron disponibles varias unidades del OBS-2200 de Horiba, pero las medidas realizadas con estos equipos se usaron sólo a manera de información.

Verificación de los equipos de medida

Como punto de partida, tanto los equipos de laboratorio (sistema de referencia) como los PEMS utilizados fueron revisados conforme a la normativa 40 CFR 1065, de acuerdo a los procedimientos que establece la norma y que se relacionan en la Tabla 2.3.

Las unidades de SEMTECH ensayadas, presentaron varios problemas, entre ellos la linealidad, particularmente en el analizador NDUV. Así mismo las pruebas de absorción de NO₂ por enfriamiento impropio dieron resultados negativos que hizo necesario el rediseño y cambio del sistema de muestreo. La calibración del caudalímetro fue uno de los principales problemas encontrados, debido en parte a la disparidad de procedimiento de calibración utilizado entre el equipo de referencia y el PEMS. En cuanto a la medida de CO, se observó una baja resolución del sistema NDIR, pero no fue necesario hacer ninguna mejora al analizador porque las emisiones observadas fueron muy bajas con respecto al límite de emisión establecido y por lo tanto, no es necesaria mayor exactitud.

Tabla 2.3 Pruebas de verificación para equipos de laboratorio y PEMS usados en Proyecto de determinación de errores de medida en programa HDIUT

Descripción	Referencia 40CFR	Lab muestra directa	Lab muestra diluída	PEMS
Linealidad	1065.307	x1	x1	x2
Medida de par	1065.310	x	x	
Caudal de combustible	1065.320	x		
Caudal de aire de admisión	1065.325	x		
Caudal de gases de escape	1065.330			x
Verificación sistema CVS	1065.341		x	
Interferencia de H ₂ O sobre CO ₂	1065.350	x	x	x
Interferencia de H ₂ O y CO ₂ sobre CO	1065.355	x	x	x
Optimización FID	1065.360	x3	x3	x3
Interf. de O ₂ sobre FID condic. no estequiom.	1065.362	x		x
Factor de corte de fracción No-metano	1065.365	x	x	
interferencia del H ₂ O y CO ₂ en sistema CLD	1065.370	x	x	
Interferencia de H ₂ O y HC en sistemas NDUV	1065.372			x
Absorción de NO ₂ por enfriamiento impropio	1065.376			x
Revisión del conversor NO ₂ -a-NO	1065.378	x	x	

1 En analizadores de gases, caudalímetros, medidor de par, presiones y temperaturas

2 En analizaores de gases y caudalímetro de gas de escape.

3 Verificación del factor de respuesta al metano sólo para THC.

Errores individuales

Los resultados más importantes de las pruebas realizadas para determinar de manera individual el porcentaje de error debido a los diferentes factores estudiados, se pueden observar en la Tabla 2.4, Tabla 2.5, Tabla 2.6 y Tabla 2.7.

Tabla 2.4 Magnitud del término de error en condiciones estacionarias

Percentil	NMHC, % LE (1)	CO, % LE (1)	NO _x , % LE (1)	CO ₂ , % LE (1)	Caudal escape, % máx (2)
5	0%	0,3%	-5% (3)	0,3%	-1%
50	1%	1,1%	0%	0,4%	5%
95	7%	2,0%	5%	0,8%	11%

(1) % LE = porcentaje de concentración media con respecto al límite de emisión establecido o valor medio para un evento NTE (NMHC = 60 ppm, CO = 4450 ppm, Nox = 290 ppm, CO₂ = 8%).

(2) % máx = porcentaje con respecto al máximo valor, varía con el tamaño del caudalímetro.

(3) Por encima de 400ppm, NO_x en el 5 percentil muestra una dependencia con el rango de -14%

Tabla 2.5 Magnitud del término de error en condiciones transitorias

Percentil	NMHC, %	CO, %	NO _x , %	CO ₂ , %	Caudal escape, % máx (1)
5	-0,03%	0,0%	-2,5%	1%	-0,7% (2)
50	0%	0,0%	0%	0%	0%
95	3%	0,0%	2,5%	1%	0,6% (2)

(1) % máx = porcentaje con respecto al máximo valor, varía con el tamaño del caudalímetro.

(3) Valores representan promedio sobre todo el rango de medida de caudal

Tabla 2.6 Magnitud del término de error en la medida de caudal.

Percentil	Error por pulsación %máx (1)	Error por no- uniformidad del perfil, %máx (1)
50	0,5% a 2%	0,1% a 0,9%
Total entre el 5 y 95 (2)	0,2% a 0,8%	0,1 % a 0,5%

(1) %máx = porcentaje sobre el caudal máximo, varía con el tamaño del caudalímetro

(2) Este valor corresponde al ancho total de la banda de error entre el percentile 5 y el 95.

Tabla 2.7 Magnitud del término de error debido a la falta de sincronización entre las señales.

Método de cálculo	Percentil	CO, %	NOx, %
5	5	-7,5%	-3,2%
	50	0,0%	-0,1%
	95	4,6%	1,5%
2	5	-5,4%	-1,3%
	50	0,0%	0,0%
	95	5,1%	1,5%
3	5	-5,2%	-1,4%
	50	0,0%	0,0%
	95	12,3%	2,9%

Resultados y validación

El modelo Montecarlo, se ejecutó con base a un conjunto de 195 eventos NTE de referencia y cada evento se ejecutó en el modelo al menos 10 mil veces. En cada repetición, todos los errores estudiados fueron muestreados de forma aleatoria, y aplicados en las variables correspondientes para calcular el factor específico de emisión en cada iteración por medio de los 3 métodos de cálculo establecidos en la normativa americana. Con todas las iteraciones realizadas se formó un conjunto de datos “perturbados” que fueron comparados con el resultado ideal (factor específico de emisión) calculado con los datos sin perturbar, para calcular los “deltas”, que luego considerados al percentil 95, sirvieron para determinar los valores presentados en la Tabla 2.8.

Tabla 2.8 Resultados del modelo Montecarlo y de la validación.

Factor de emisión específica	% de error con respecto a límites NTE con equipos de laboratorio		
	Método 1 "Par - régimen"	Método 2 "Consumo específico de la unidad de control"	Método 1 "Consumo específico por balance de carbonos"
NOx	22,3	4,45	6,61
NMHC	10,08	8,03	8,44
CO	2,58	1,99	2,11

Con el fin de validar los resultados del modelo se realizaron una serie de ensayos en tráfico real, midiendo el PEMS de manera simultánea con el laboratorio móvil de la

Universidad de California, MEL y que había sido usado en el proyecto de evaluación de PEMS presentado en el apartado 2.5.3 de la presente tesis doctoral (Miller et al, 2008 y Johnson et al, 2009). Se realizó adicionalmente otra serie de ensayos en banco de motor, reproduciendo los ensayos realizados en tráfico real con el fin de tener una medida de par y consumo de combustible de referencia, ya que el MEL no dispone de esta medida.

Los resultados de estos ensayos permitieron validar sólo los factores de emisión de NO_x según el método de cálculo 1 y del NMHC en todos los métodos de cálculo. Con respecto al CO no fue posible validar los resultados del modelo, pero debido a que los factores de emisión de CO medidos estaban varios órdenes de magnitud por debajo del límite de emisión establecido para este contaminante, no se dio mayor importancia a la falta de validación. Por lo tanto se escogió como método validado de cálculo de los factores de emisión al método 1, basado en las medidas de par y régimen de motor, para los tres factores de emisión y cuyos resultados se mostraron en la Tabla 2.2.

Capítulo 3

FUNDAMENTOS

3.1 Formación de emisiones contaminantes en motores de combustión interna

La combustión en los motores de combustión interna es una fuente importante de contaminación del aire, debido a que genera emisiones de monóxido de carbono (CO), hidrocarburos inquemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), partículas y otros productos que dependen de la composición del combustible. En la combustión de combustibles que solo contengan carbono, hidrógeno y oxígeno, la mayoría de estas emisiones se originan por fenómenos asociados a combustión incompleta dentro de los cilindros, excepto los óxidos de nitrógeno.

La cantidad de emisiones depende de varios factores como son el diseño del motor, las condiciones de operación, las condiciones atmosféricas, el tipo de combustible y el sistema de postratamiento de gases empleado. Por ejemplo, dependiendo de las condiciones de operación, un motor de gasolina de cuatro tiempos sin sistema de postratamiento puede emitir alrededor de 0,2 a 5 % en volumen de CO, 300 a 6000 ppmV de HC (base metano C₁) y hasta 2000-3000 ppmV de NO_x (Pundir, 2007). Sin embargo, en los motores a gasolina con catalizador de tres vías y sonda lambda, las emisiones de CO y HC se reducen significativamente, excepto en condiciones transitorias de aceleración debido a que el motor utiliza dosados un poco superiores al dosado estequiométrico, como se comentará más adelante en el apartado 3.2.2.

Por su parte, en los motores de encendido por compresión, sin postratamiento de gases, las emisiones de CO son relativamente bajas, aproximadamente entre un 0,02 y 0,1% en volumen. De igual manera las emisiones de HC están entre una quinta y una décima parte de las emisiones de HC en los motores de encendido provocado. A diferencia de las emisiones de NO_x que son comparables para los dos tipos de motores (Pundir, 2007). Como se verá más adelante, en el apartado 3.2.2, los sistemas de postratamiento,

por mecanismos químicos o físicos, permiten reducir las emisiones contaminantes que finalmente se expulsan a la atmósfera.

El mecanismo de formación de las emisiones contaminantes en los motores de combustión interna, está gobernado tanto por el proceso físico como por la química de la combustión, como se verá en los siguientes dos apartados.

3.1.1 Mecanismo de formación de emisiones en los motores de encendido provocado

Como se puede observar en la figura 3.1, después de que la chispa enciende la llama en la mezcla aire/combustible comprimida, la llama se propaga rápidamente por la cámara de combustión. El monóxido de nitrógeno (NO) se forma en las zonas de alta temperatura de los gases quemados, debido a la oxidación del nitrógeno presente en el aire admitido. En este tipo de motores, las emisiones de dióxido de nitrógeno (NO_2) son muy bajas, debido a que esta sustancia se forma por oxidación de monóxido de nitrógeno cuando hay exceso de oxígeno, que en condiciones normales de funcionamiento es muy escaso o no hay.

Figura 3-1: Resumen del mecanismo de formación de emisiones en motores de encendido provocado. Adaptación de (Heywood, 1988).

El CO se forma principalmente por dos razones:

- La falta de oxígeno en algunas zonas dentro de la mezcla aire/combustible. En estas zonas sólo se alcanza la oxidación parcial de las moléculas de combustible y por lo tanto, cuando la relación aire/combustible es menor que la estequiométrica, la formación de CO crece rápidamente al aumentar el dosado. Como se indicó anteriormente, en este tipo de motores, la mezcla suele ser rica en condiciones de arranque en frío y calentamiento del motor, así como en transitorios como las aceleraciones. Por lo tanto, estas condiciones de funcionamiento contribuyen de forma importante sobre las emisiones totales de CO.

- La cinética lenta de las reacciones de oxidación del CO que se ha formado por equilibrio químico a alta temperatura en las reacciones de combustión.

Durante la carrera de expansión, los gases producto de la combustión se enfrían rápidamente, causando la congelación de las reacciones químicas elementales involucradas en la destrucción del CO y del NO hacia su equilibrio químico a baja temperatura y por lo tanto, las emisiones reales de CO y NO son más altas que las esperadas de acuerdo a las consideraciones del equilibrio químico. Los gases de escape no están en equilibrio químico, pero llegarían al mismo en tiempos de residencia muy superiores.

Por otro lado, las emisiones de hidrocarburos inquemados (HC) se deben a varios motivos. El primero es el apagado de la llama cuando ésta entra en contacto con las paredes de la cámara de combustión, que están a baja temperatura, formando una capa delgada de mezcla aire/combustible que permanece inquemada. También se forma HC en los pequeños resquicios que hay en la cámara de combustión (entre la corona del pistón y la pared del cilindro, alrededor de la bujía y en la zona de la junta de culata), debido a que la llama es incapaz de propagarse en estos sitios tan estrechos. Adicionalmente, en la capa de aceite lubricante que se encuentra en las paredes del cilindro y en depósitos de la cámara de combustión se adsorben vapores de combustible que son liberados en la carrera de escape y llevados en forma de bucles sobre la cabeza del pistón hacia la válvula de escape. Por último, también se forman hidrocarburos inquemados en el arranque en frío por la presencia de combustible líquido en la cámara de combustión.

El combustible inquemado que queda atrapado dentro de los resquicios de la cámara de combustión durante las carreras de compresión y combustión, sale de estos sitios durante la carrera de expansión debido a la baja presión. La mayor cantidad de HC que se libera durante la carrera de expansión, se mezcla con los gases de combustión y son parcial o totalmente oxidados antes de salir del motor. Durante la carrera de escape, los hidrocarburos inquemados, así como el CO y el NO_x salen del motor formando parte del los gases de escape.

De lo anteriormente expuesto, se ve que la formación del NO y del CO se debe principalmente a fenómenos asociados a la química y cinética de la combustión (Mecanismo de Zeldovich para la formación de NO), mientras que la formación de HC se debe principalmente a fenómenos físicos de apagado de llama en las paredes del cilindro, atrapamiento de combustible en los pequeños resquicios del motor y al fenómeno de adsorción y desorción de vapores de combustible en el aceite lubricante, es decir su composición es en buena parte combustible no quemado y pequeñas porciones de combustible parcialmente oxidado.

La relación aire/combustible es el parámetro que más influye en las concentración de las emisiones de escape de un motor. Las tendencias que existen sobre la influencia del dosado relativo sobre la concentración de CO, HC y NO_x en los gases de escape en un motor de encendido provocado convencional de mezcla homogénea se puede observar en la figura 3.2. Las emisiones de NO_x son máximas para un dosado ligeramente pobres, debido a que se conjuga una alta temperatura de combustión con un relativo

exceso de oxígeno. CO y HC se reduce para bajos dosados, aunque para dosados por debajo de un valor crítico, las emisiones de HC vuelven a incrementarse debido a problemas de apagado de llama en algunas zonas de la mezcla que conducen adicionalmente una mala operación del motor.

Figura 3-2: Variación de la concentración de HC, CO y NO en los gases de escape de un motor convencional de encendido provocado. Adaptación de (Pundir, 2007).

Durante el arranque en frío y el calentamiento del motor, se emiten grandes cantidades de HC y CO debido a la baja evaporación del combustible y al mayor dosado que se requiere para que el motor arranque.

Normalmente, para reducir las emisiones sería deseable operar los motores en mezcla pobre, pero los catalizadores usados para el control simultáneo del NO_x, el CO y los HC requieren que el motor opere en dosados cercanos al estequiométrico.

3.1.2 Mecanismo de formación de emisiones en los motores de encendido por compresión (motores diesel)

En este tipo de motor, el combustible se inyecta a alta presión de forma atomizada directamente dentro de la cámara de combustión al final de la carrera de compresión, cuando el aire dentro de la cámara está a una temperatura y presión por encima del punto de inflamabilidad del combustible. El combustible se distribuye de forma no homogénea dentro de la cámara de combustión, por lo que el dosado dentro de la cámara de combustión no es uniforme, generándose zonas de mezcla rica, dentro del núcleo del chorro y zonas de mezcla pobre, en las zonas más alejadas del centro del mismo. El proceso de mezcla es controlado fundamentalmente por parámetros relativos a la inyección, a la turbulencia del aire y a las propiedades de evaporación del combustible (Pundir, 2007).

El control del grado de carga en un motor de encendido por compresión, se realiza mediante la variación de la cantidad de combustible inyectado dentro de la cámara de combustión que previamente ha sido llenada de aire durante la carrera de admisión. En este tipo de motores, la formación de contaminantes está influenciada principalmente por los dosados locales, que varían a lo largo del proceso de combustión y localmente dentro de la cámara de combustión.

El proceso de combustión de un motor de encendido por compresión se realiza en tres fases: tiempo de retraso, combustión premezclada y combustión por difusión (Muñoz & Payri, 1989). El tiempo de retraso, es el tiempo que transcurre entre el comienzo de la inyección de combustible y el comienzo de la autoinflamación. En este tiempo el combustible inyectado a alta presión se mezcla con el aire y parte se evapora. El combustible evaporado en contacto con el aire empieza a desarrollar reacciones de precombustión, hasta que una parte de la mezcla entra en combustión de forma espontánea. La autoinflamación de la llama ocurre en la punta del chorro de combustible, en la zona en donde el dosado es ligeramente pobre. Con la primera reacción de autoinflamación se entra en la segunda fase de combustión premezclada. En esta fase, las zonas dentro de la cámara de combustión que tienen una mezcla aire/combustible dentro del rango de inflamabilidad y por lo tanto tienen un dosado alrededor del valor estequiométrico, entran en combustión de forma rápida, casi instantánea, generando grandes gradientes de presión. Una vez se consume todo el combustible premezclado, se entra en la última fase de combustión por difusión. En esta fase, el combustible líquido o evaporado entra en combustión al entrar en contacto con el aire que avanza por difusión entre los gases ya quemados. Esta combustión ocurre en las zonas periféricas del chorro de combustible, donde el dosado es estequiométrico. En general, en los motores de encendido por compresión, a elevados grados de carga, la mayor parte del combustible se quema en esta última fase.

Figura 3-3: Resumen del mecanismo de formación de emisiones en motores de encendido por compresión. Adaptación de (Heywood, 1988).

En la figura 3.3, se observa cómo las diferentes regiones dentro del chorro de combustible y de la llama contribuyen a la formación de HC, CO y NO_x. La emisión de hidrocarburos inquemados se debe al no encendido de la llama en las regiones de mezcla muy pobre y al combustible que entra a la cámara de combustión hacia el final de la combustión, en donde no se dan las condiciones propicias para tener una adecuada mezcla de aire con el combustible.

Por su parte, las partículas se forman en la llama de difusión por la deshidrogenación del combustible en zonas de alta temperatura y ausencia de O₂ y, por lo tanto, en zonas de dosado local excesivamente rico. Las partículas (PM) que se generan en la combustión diesel se componen de hollín (básicamente carbón) y de algunos hidrocarburos de muy alto peso molecular adheridos a éste, una fracción orgánica soluble (FOS, entre el 20 y el 50 % de la masa total del PM) y una fracción de otros insolubles (ISF) compuesta por sulfatos, agua y una pequeña cantidad de cenizas. (Payri et al, 2011)

Las emisiones de CO se producen en zonas con dosado excesivamente pobre por oxidación parcial del combustible y en zonas de dosado local excesivamente rico en condiciones de alto grado de carga, sobre todo en la etapa de combustión premezclada, pero también algo en la de difusión.

La formación de NO ocurre principalmente durante la combustión en las etapas de alta temperatura de los gases, que coincide con la etapa final de la combustión premezclada en el entorno del punto muerto superior, en donde las reacciones químicas de formación del NO tienen una elevada velocidad. Posteriormente, ya en la etapa de expansión, los gases quemados se mezclan muy rápidamente con aire a menor temperatura, lo que ocasiona que la velocidad de destrucción del NO se reduzca, causando emisiones totales de NO que son generalmente mayores que las de los motores de encendido provocado (Pundir, 2007).

Los motores diesel de inyección indirecta (IDI), han sido desplazados del sector de los automóviles debido a su baja eficiencia energética frente a los de inyección directa (DI), pero debido a que aún circulan vehículos con este tipo de motor, considero importante tratarlos brevemente. Este tipo de motores tienen una precámara de combustión y la combustión se desarrolla en dos etapas. Inicialmente una mezcla rica aire/combustible entra en combustión en la precámara, en donde todo el combustible es inyectado. La mezcla parcialmente oxidada, en forma de chorro, entra en la cámara de combustión principal donde hay exceso de aire, generando una alta turbulencia que mejora la mezcla con el aire. En este tipo de motor el NO se forma principalmente en la precámara, aunque en condiciones de plena carga también puede haber alguna formación adicional en la cámara de combustión principal. A pesar de que la temperatura en la precámara es muy alta, la formación de NO en este tipo de motor, con respecto a los motores de inyección directa, es menor debido al hecho de que en esta precámara normalmente se mantiene el dosado medio por encima del estequiométrico y por lo tanto hay insuficiencia de aire, necesario para la formación del NO, excepto en condiciones de baja carga, como se puede observar en la figura 3.4.

Figura 3-4: Comparación de emisiones de NO_x y CO entre motores diesel de inyección directa (DI) e inyección indirecta (IDI). Adaptado de (Pundir, 2007).

Las emisiones de monóxido de carbono, como se observa en la figura 3.4, son mayores en los motores de inyección directa que en las de los motores de inyección indirecta. Cuando el dosado relativo medio es aproximadamente igual a 0,8, se produce un mínimo de emisiones de CO en los motores de inyección directa, pero en dosados mayores, las emisiones de CO aumentan bruscamente por la creciente falta de oxígeno que origina una combustión incompleta.

Para el caso de los motores diesel de inyección directa, en la figura 3.4, se observa también la tendencia contraria en la formación del CO y la formación del NO_x . Debido a que las emisiones de óxidos de nitrógeno tienen su origen a altas temperaturas de combustión y contenido de oxígeno, condiciones en las que la formación de CO es baja. En contraposición, a las condiciones de mezcla global muy pobre y baja temperatura, en donde las emisiones de CO son mayores, mientras que las emisiones de NO_x son mínimas.

3.2 Técnicas para reducir las emisiones contaminantes en motores de combustión interna

Como se mostró en el apartado anterior, los mecanismos físicos y químicos de formación de emisiones en los motores de encendido provocado y en los motores de encendido por compresión son muy diferentes. Mientras que en los primeros la mezcla es homogénea y formada antes de la combustión, con dosado normalmente cercano al estequiométrico y bajas relaciones de compresión, en los segundos la mezcla es simultánea con la combustión que conjuga la autoinflamación de una premezcla y una llama de difusión con altas relaciones de compresión y contenido de oxígeno en los gases de escape. Ello hace que en los primeros la dificultad está en reducir las emisiones de CO y HC, mientras que en los segundos predomina el problema de las partículas y las emisiones de NO y NO_2 .

Figura 3-5: Curva de tendencia ("trade-off") de emisiones de NO_x y de partículas en un motor diesel y soluciones técnicas para su reducción.

También se mostró anteriormente que la tendencia en cuanto a la formación de las diferentes emisiones en los motores de combustión interna es contradictoria, porque si se quiere reducir el NO_x emitido con base en cambiar los parámetros de funcionamiento del motor, se aumentan las emisiones de CO y partículas y viceversa, lo que causa grandes dificultades para cumplir con la reducción simultánea de todas las emisiones reguladas (CO, NO_x , HC y partículas) que exige la normativa de emisiones (ver Figura 1-2 – evolución de los límites de emisión para los turismos diesel). Por esta razón, para lograr la reducción de emisiones exigida, se hace necesario la utilización de una o varias técnicas de reducción de emisiones, como se observa en la Figura 3-5.

Hay dos tipos de soluciones técnicas utilizadas para reducir las emisiones contaminantes en los motores de combustión interna. El primer tipo de solución tiene que ver con variaciones en el diseño del motor o de sus componentes y el segundo tipo tiene que ver con sistema de postratamiento de gases a la salida del motor para eliminar o reducir la emisión final a la atmósfera.

3.2.1 Tecnologías que afectan el diseño del motor

En motores de encendido provocado

Las técnicas más utilizadas para reducir las emisiones contaminantes en los motores de encendido provocado, que afectan el diseño del motor, son:

- **Diseño de la cámara de combustión:** Una reducción efectiva de HC en los motores de encendido provocado, se puede llevar a cabo por un adecuado rediseño de la cámara de combustión, reduciendo al mínimo los intersticios, ranuras y zonas estrechas, donde se quedan atrapados los hidrocarburos en la etapa de combustión. También se pueden reducir las emisiones de HC reduciendo la relación superficie/volumen de la cámara de combustión para reducir el apagado de llama en la superficie. Por otro lado, reducir la relación de compresión reduce las emisiones de CO y HC, y menores temperaturas de combustión reducen las de NO_x .
- **Sistema de formación de la mezcla:** La inyección multipunto, mejora la mezcla del combustible con el aire y permite regular de forma más precisa el dosado estequiométrico, punto de operación que garantiza el buen funcionamiento del catalizador de oxidación. La inyección directa, permite el funcionamiento del motor en mezclas pobres ($\sim 0,8$) en donde las emisiones de CO, HC y NO_x son menores.
- **Sistema de distribución:** El uso de un sistema de distribución variable permite reducir las emisiones contaminantes, debido a que la formación de estas es variable con el grado de cruce de válvulas para los diferentes grados de carga del motor y de esta forma se puede controlar las emisiones en valores razonables. La flexibilidad en la apertura de la válvula de admisión, permite hacer una regulación de carga sin el uso de la válvula de mariposa, reduciendo la cantidad de gases residuales en bajos grados de carga. La posibilidad del cierre simultáneo de la válvula de admisión y de

escape de cada cilindro de forma independiente, permite sacar de funcionamiento uno o varios cilindros en condiciones de baja carga.

- **Reducción del tamaño del motor y sobrealimentación.** Los motores con sobrealimentación y menor cilindrada unitaria, tienen menores emisiones de HC y a baja carga, se reducen también las de CO.
- **Recirculación de gases de escape (EGR):** La recirculación de gases de escape, interna (retenido a la final de la carrera de escape) o externa (por medio de la válvula EGR), reduce la temperatura de llama y por lo tanto reduce las emisiones de NO, debido al mayor calor específico de los gases de escape con respecto al aire.

En motores de encendido por compresión

Las técnicas de diseño de motor utilizadas para reducir las emisiones contaminantes, principalmente NO_x y partículas, en este tipo de motores son:

- **Cámara de combustión:** La posición y forma de la cámara de combustión tallada en el pistón permite modificar el mecanismo de mezcla del combustible en el aire, y por lo tanto controlar el reparto de combustible que entra en combustión en la etapa de premezclada y en la etapa de difusión, pudiéndose reducir las emisiones de CO, HC y NO_x. Reducir la relación de compresión, también permite reducir un poco las emisiones de NO_x.

Figura 3-6: Zonas de emisión de NO_x y partículas en la gráfica de dosado relativo local – temperatura local. Adaptado de (Payri et al, 2011).

- **Combustión a baja temperatura:** Reducir la temperatura de llama permite reducir las emisiones de NO_x, aunque pueden aumentar los hidrocarburos inquemados. En la figura 3.6 se muestran, en la gráfica de dosado relativo local contra temperatura local, las zonas en las que las emisiones de partículas y NO_x se producen, por lo que en la regulación del motor ha de ser tal que se eviten estas condiciones locales dentro de la cámara de combustión, tanto en la fase de combustión premezclada como en la de difusión. La combustión a baja temperatura, en inglés Low

Temperature Combustion (LTC), es una técnica que se basa en aumentar la cantidad de combustible que reacciona en la etapa de combustión premezclada reduciendo la temperatura local mediante la recirculación de gases de escape (EGR), de tal forma que no hayan emisiones de NO_x ni de partículas. La combustión PCCI (carga premezclada con encendido por compresión), es otro tipo de combustión a baja temperatura, en donde las emisiones de NO_x y partículas son mínimas, pero con un aumento significativo del CO y de los hidrocarburos inquemados, con el inconveniente adicional de que al bajar la temperatura de los gases de escape, la eficiencia de los catalizadores se reduce.

- **Sistema de inyección:** En la Tabla 3.1, se relacionan las principales técnicas usadas para la reducción de emisiones con base en el ajuste del sistema de inyección. Para tener bajas emisiones en cada condición operativa del motor, es necesario el control electrónico que permita ajustar el punto, la presión y de ley de inyección.

Tabla 3.1 Técnicas de reducción de emisiones con base en el sistema de inyección

<i>Acción</i>	<i>Efecto</i>	<i>CO</i>	<i>HC</i>	<i>NO_x</i>	<i>PM</i>
Uso de inyectores sin saco			↓↓		↓↓
Aumentar presión de inyección	Mejora la atomización y mezcla del combustible con el aire			↑	↓↓
Adelantar la inyección	Eleva las presiones y temperaturas de llama	↓	↓	↑↑	
Inyección escalonada, piloto o múltiple (para reducir el combustible inyectado en el tiempo de retraso)	Reduce el calor liberado en la fase de combustión premezclada. Se reduce el ruido y desplaza la curva “trade-off” NOX - PM al origen.			↓	↓

- **Enfriamiento del aire de inyección:** En los motores sobrealimentados, el uso de un enfriador del aire a la salida del compresor del turbo (intercooler) permite reducir la temperatura de combustión y por lo tanto las emisiones de NO_x .

Figura 3-7: Recirculación de gases de escape en motores diésel con turbo-sobrealimentación.

- **Recirculación de los gases de escape:** En los motores sobrealimentados, la recirculación de gases de escape puede hacerse de dos modos: el primero llamado ruta de baja presión, en donde los gases de escape a la salida de la turbina se inyectan en el aire a la entrada al compresor. En la ruta de alta presión, los gases de escape a la entrada de la turbina se inyectan en el aire a la salida del compresor, como se puede observar en la figura 3.7. Al igual que en los motores de encendido provocado, recircular hasta el 50% de los gases de escape permite reducir las emisiones de NO_x . Esta técnica sólo se puede usar a bajos o medios grados de carga del motor, porque a altos grados las emisiones de HC y partículas aumentan considerablemente.

3.2.2 Tecnologías de postratamiento de gases

Los gases de escape a la salida del motor incluyen sustancias contaminantes que están en desequilibrio químico por congelación de las reacciones de equilibrio por el enfriamiento de los gases, productos debidos a fallos en la combustión, oxidación parcial del combustible y partículas de pirólisis y deshidrogenación. Estas sustancias se pueden clasificar en oxidantes, como el O_2 y los NO_x , y en reductores, como el CO, el H_2 y los HC.

Para evitar o reducir la emisión a la atmósfera de estas sustancias contaminantes, se usan los sistemas de postratamiento de gases de escape, que hablando genéricamente son de tres tipos: catalizadores, reactores y filtros.

Catalizadores

Gracias a la presencia de una sustancia catalizadora en contacto con los gases de escape, se aceleran las reacciones de oxidación o reducción a baja temperatura, caso del CO y del NO, hasta alcanzar el equilibrio a la temperatura del escape, donde se desplaza hacia CO_2 , N_2 y O_2 . Los catalizadores de oxidación tienen mejor rendimiento y necesitan menores temperaturas que los reactores térmicos.

Figura 3-8: Estructura de un catalizador de escape de monolito cerámico.

Como se observa en la figura 3.8, el producto catalizador se deposita sobre un sustrato o soporte por el interior del cual circulan los gases de escape en contacto cercano con el catalizador. El sustrato suele ser de monolito cerámico o matriz metálica y como

catalizadores se utilizan algunos metales como el platino, Pt, paladio, Pd, o rodio, Rh, y mezclas entre ellos. Cada uno de los metales oxida o reduce mejor una especie química, por lo que los catalizadores de tres vías usan una mezcla Pt+Pd con Rh para oxidar CO y HC simultáneamente con la reducción del NO_x .

Un catalizador puede comportarse como de oxidación o de reducción según el contenido de oxígeno en el escape, es decir según el dosado de la mezcla en el proceso de combustión. La figura 3.9 muestra el rendimiento en la conversión de CO, HC y NO_x de un catalizador en función del dosado relativo.

Figura 3-9: Rendimiento de la conversión de CO, HC y NO_x de un catalizador con mezcla homogénea.

Como se puede observar en la figura 3.10, la eficiencia de los catalizadores es muy reducida a bajas temperaturas. Por lo tanto, los fabricantes para reducir las emisiones durante el arranque en frío, utilizan catalizadores adicionales de menor tamaño y precalentados con resistencias eléctricas, normalmente fabricados de malla metálica para reducir la inercia térmica y suelen ser ubicados lo más cerca del motor. También se usan sistemas de retención de HC que los libera cuando el catalizador alcanza la temperatura óptima de trabajo.

Figura 3-10: Rendimiento de conversión de catalizadores de oxidación típicos. Adaptado de (Pundir, 2007).

Reactores

Los reactores se basan en disminuir la concentración de ciertos productos contaminantes por reacciones químicas en los gases de escape. Provocan reacciones químicas de oxidación, caso de los HC o del hollín, y de tipo redox con otros compuestos. Los reactores pueden ser térmicos, en los que se produce oxidación a alta temperatura, o químicos, en donde se fuerza una reacción química por medio de un reactante para que la sustancia contaminante desaparezca. El sistema de reducción catalítica selectiva (en inglés SCR - Selective Catalytic Reduction) es el sistema de reacción química más conocido para reducir los NO_x en los gases de escape, en donde se inyecta amoníaco o urea en los gases de escape y esta mezcla se hace pasar por un lecho catalítico formado por una mezcla de óxidos de vanadio y de titanio. Las reacciones químicas más importantes que ocurren en los sistemas SCR son:

Filtros

Los filtros impiden la salida a la atmósfera de ciertos componentes del gas de escape, reteniéndolos y acumulándolos por vía química y física, como en el caso de algunos sistemas para NO_x y para partículas. Estos filtros necesitan un proceso de regeneración periódico, para evitar la obstrucción.

Los filtros químicos almacenan los óxidos de nitrógeno en forma de nitratos cuando el motor trabaja en mezcla pobre y los libera en mezcla rica. En los motores de encendido provocado, el NO se oxida previamente en NO_2 y este es atrapado en forma de nitrato en un óxido metálico alcalino que se adiciona al catalizador convencional de tres vías. Cuando el sistema se satura, es necesario regenerar el filtro manteniendo combustión en mezcla rica durante un corto periodo de tiempo (aprox. 1 s). En esta condición el óxido metálico alcalino libera el NO_2 por su reducción a $\text{N}_2 + \text{O}_2$ en el catalizador de tres vías, que bajo condiciones de mezcla rica tiene un alto rendimiento.

En los motores de encendido por compresión, los sistemas de almacenamiento y reducción de NO_x se conocen como NSR (NO_x Storage - Reduction). En estos sistemas, debido a la imposibilidad de desarrollar combustión en mezcla rica, la regeneración se realiza inyectando un combustible adicional a la salida del motor que se inflama en mezcla rica, o directamente en el cilindro durante el final de la etapa de expansión.

El filtro de partículas (DPF: Diesel Particulate Filter), es usado en los MEC y en los MEP de inyección directa sometidos a una normativa estricta de emisiones. En este tipo de filtro, el gas de escape se hace pasar por material poroso o por orificios pequeños, donde se quedan atrapadas las partículas. Los materiales más usados son las cordieritas cerámicas o de carburo de silicio, cartuchos de fibras, bobinas tejidas de fibras de sílice, mallas o esponjas de alambre y materiales sintéticos. Los revestimientos suelen ser a

base de metales preciosos (habitualmente platino), los cuales actúan como catalizador de la oxidación de las partículas depositadas, reduciendo la temperatura de inicio de la reacción, con el consiguiente encarecimiento del filtro. El filtro de partículas tiene el inconveniente de producir contrapresión de escape cuando se van colmatando lo que afecta el proceso de renovación de carga del motor y limita la eficiencia en el filtrado.

La eficiencia en la retención del filtro de partículas depende de la configuración interna, en el caso de los “Flow-Through”, formado por canales simétricos, se alcanza entre un 40 y un 60% de retención de partículas en tamaños comprendidos entre 100 y 400 μm en los filtros de espuma y en torno a los 10 μm en los de fibra. Para el caso de los filtros “Wall-flow”, de canales asimétricos, de alcanzan eficiencias de retención mayores de hasta el 90% en partículas en torno a los 10 μm .

La regeneración del filtro (oxidación del hollín) se realiza de forma espontánea cuando los gases de escape alcanzan los 500°C, pero en condiciones de operación donde esta temperatura no se alcanza, es necesario realizar una regeneración forzada. Esta regeneración forzada puede ser de tres tipos: activa, en la cual se aporta energía adicional hasta alcanzar la temperatura en la cual se oxida el hollín, sea por una post-inyección de combustible al final de proceso de expansión o por el uso de resistencias eléctricas, microondas. La regeneración pasiva en la que se usan catalizadores para reducir la temperatura de oxidación del hollín, y por último la regeneración activo-pasiva que combina los dos tipos anteriores para obtener un control más preciso sin aumentar en demasía el consumo de combustible. Este último es el tipo más utilizado actualmente. (Payri et al, 2011).

Tabla 3.2 Comparación de las tecnologías de postratamiento

<i>Tecnología de postratamiento</i>	<i>Rend. %</i>	<i>Temp.</i>	<i>CO</i>	<i>HC</i>	<i>NO_x</i>	<i>PM</i>	<i>Inconvenientes</i>
Reactores térmicos	90%	>850°C	√√	√√	-	√	· Necesidad de inyectar aire adicional en mezcla rica. · Bajo rendimiento en mezclas pobres. · Elevado coste.
Reactores químicos - SCR	90%	>400°C	-	-	√√	-	· Tamaño del sistema. · Toxicidad del amoníaco.
Catalizador de oxidación	80%	>300°C	√√	√√	-	√	· Rendimiento muy bajo a temp <200°C · Desactivación por presencia de azufre
Catalizador de reducción	90%	>300°C	-	-	√√	-	· Requiere mezcla rica · libre de oxígeno · Rendimiento muy bajo a temp <200°C
Catalizador de tres vías	80%	>300°C	√√	√√	√√	-	· Requiere mezcla estequiométrica estrecho rango dosado entre [0,998 y 1,007] · Sólo usar en MEP mezcla homogénea
Filtro químico de NOx	90%	350-450°C	-	-	√√	-	· Envenenamiento por contenido de azufre en combustible. · Problema con la presencia de agua líquida · Rango de temperatura de operación limitado 350-450°C
Filtro de partículas	85%	500°C	√	√	-	√√	· Difícil compromiso entre eficiencia de filtrado y contrapresión de escape. · Requiere regeneración forzada, con aporte adicional de energía y/o uso de catalizadores, cuando la temperatura de los gases de escape no alcanza los 500°C.

Cada motor según su tipo, aplicación, límites de emisiones que debe cumplir y el coste asumible tendrá el sistema de postratamiento más adecuado. Por lo tanto, la selección del postratamiento para cada motor, se hace con base a criterios como el peso, volumen disponible, comportamiento en transitorios de carga y régimen de giro, temperatura de

gas de escape, dosado relativo y contenido de oxígeno, entre otros. En la Tabla 3.2 se muestra un cuadro comparativo entre los sistemas más comunes de postratamiento de los gases de escape, con su respectivo porcentaje de rendimiento en la conversión a la temperatura de trabajo óptima, mostrando sus principales desventajas.

3.3 Normativa de control de emisiones

Como se comentó en el capítulo 1, desde finales de los años noventa a nivel mundial se han promulgado diferentes normativas para el control de emisiones de vehículos de carretera, motores estacionarios y otras aplicaciones. Las normativas más importantes son la americana, la europea y la japonesa. En todas estas normativas, se establecen tanto los procedimientos de medida como los límites de emisión.

Normalmente las medidas normalizadas de emisiones se dan en forma de "factor de emisión" (*FE*) en gramos por unidad de trabajo realizado. Para el caso de los motores de vehículos pesados o de motores estacionarios, el factor de emisión se da como emisión específica en gramos por unidad de energía efectiva producida ($\text{g/kW}\cdot\text{h}$) y en el caso de motores de vehículos de transporte por carretera, se dan en gramos por kilómetro recorrido (g/km). En el capítulo 4 se presenta más en detalle la forma de calcular estos factores de emisión.

Las limitaciones de emisiones de los vehículos ligeros (motocicletas, turismos y furgonetas) se dan en g/km para cada contaminante regulado y se miden en bancos de rodillos con resistencia e inercia equivalente al vehículo a ensayar y siguiendo un ciclo de conducción regulado, mientras que en los vehículos pesados (furgones, camiones y autobuses) y otros motores estacionarios y para otra maquinaria no de carretera se limitan las emisiones en $\text{g/kW}\cdot\text{h}$ medidas en banco de pruebas de motor (con o sin inercia) y promediadas entre varias condiciones estacionarias prefijadas o en condiciones dinámicas siguiendo un ciclo regulado. En este segundo la normativa permite emitir más caudal de emisión a medida que el motor tiene más potencia.

En este apartado expongo los aspectos básicos de la normativa europea de control de emisiones aplicada a la certificación de los vehículos ligeros nuevos, porque son el tipo de vehículos que se han utilizado para la realización de los ensayos involucrados en la presente tesis doctoral. Adicionalmente, expongo los aspectos más relevantes de la normativa americana para vehículos pesados que incluye la medida de emisiones con equipos embarcados, puesto que esta normativa es la más desarrollada a nivel mundial y que ha dado lugar al desarrollo técnico y comercial de este tipo de equipos. No se tratará la normativa Europea sobre medida de emisiones con equipos embarcados, debido a que sólo en el año 2007 se pusieron las bases reglamentarias para incluir este tipos de medidas de verificación en motores pesados (Directive COM(2007) 851), y su aplicación no será hasta el 1 de abril de 2013. Además, la normativa que define los procedimientos de medida de emisiones con PEMS sólo hasta mediados del presente año (2010) se decretará, a pesar de que desde el año 2007 se vienen adelantando programas piloto con el uso de estos equipos (Rubino et al, 2007 y Laguna & Pekár, 2007).

3.3.1 Normativa europea de emisiones para vehículos ligeros

La regulación de emisiones para vehículos nuevos se inició en Europa en el año 1970 con la directiva 70/220/CE de la que derivan casi todas las posteriores y que ha sido sustituida en el año 2007 por la 715/2007 y la 692/2008 para su implementación. Según esta directiva, los ensayos de emisiones en los vehículos ligeros (vehículos de pasajeros de menos de 9 plazas y vehículos industriales de menos de 3500 kg) se hacen en un banco de rodillos simulando una conducción en carretera y mediante la medida de las emisiones de forma diluida y acumuladas en una bolsa o integradas a lo largo del ciclo, según el esquema de la Figura 3-11 para motores diésel y Figura 3-12 para motores de gasolina. A diferencia de los ensayos para motores a gasolina, en los motores diesel, se miden los hidrocarburos inquemados en caliente mediante la integración del valor de emisión instantáneo, y se mide la masa de partículas por medio del pesaje de filtros.

Figura 3-11: Esquemas de las instalaciones y equipos para medida de emisiones de vehículos ligeros con motor diésel. Adaptado de (Payri et al, 2011).

Figura 3-12: Esquemas de las instalaciones y equipos para medida de emisiones de vehículos ligeros con motor gasolina. Adaptado de (Payri et al, 2011).

El banco de rodillos actúa sobre las ruedas tractoras, por medio de un sistema de frenado que simula la resistencia al avance (aerodinámica y rodadura) del vehículo y una

inercia que simula su peso. En el banco de rodillos se reproduce un ciclo de conducción en forma de velocidad – tiempo. En la normativa europea, el ciclo de conducción oficial (New European Driving Cycle - NEDC) se inicia con el arranque en frío (21°C ambiente) del motor, incluye una parte urbana (Urban Driving Cycle - UDC) que dura 13 minutos y recorre un poco más de 4 km, formada por 4 ciclos iguales, que se conocen como el ciclo de conducción ECE-15 y que se representan en la Figura 3-13.a) y por una parte extraurbana (Extra-Urban Driving Cycle EUDC) de aproximadamente 7 km y casi 7 minutos que se representa en la Figura 3-13.b).

Figura 3-13: Ciclo europeo de medida de emisiones NEDC. a) Parte urbana UDC. b) Parte extraurbana EUDC

La normativa de emisiones ha impuesto de manera progresiva una serie de límites de emisión que se han denominando sucesivamente desde Euro 1 a Euro 6. Estos límites se aplican sobre la media ponderada de emisiones del ciclo completo. La normativa correspondiente a la Euro 1 (también conocida como la EC 93) se estableció mediante las directivas 91/441/EEC (sólo turismos) y 93/59/EEC (turismos y vehículos industriales de menos de 3500 kg). La Euro 2 (EC 96), mediante la directiva 94/12/EC y 96/69/EC. La Euro 3 y Euro 4, mediante las directivas 98/69/EC y 2002/80/EC. Y, por su parte, la Euro 5 y 6, se establecieron mediante la Regulación 715/2007 y la Regulación 692/2008, en la que se estableció la forma de implementarla.

La normativa también introduce diferentes límites de emisión para los vehículos con motor de encendido por compresión (motores diésel) que para los de encendido provocado (gasolina, GLP, LPG, etanol, etc) como se muestra en la Tabla 3.3, que incluye los límites que se han establecido hasta el año 2014.

Tabla 3.3 Límites de emisión en g/km. Normativa europea para vehículos turismo (Categoría M1)

Fase	Fecha	CO	HC	HC+NO _x	NO _x	PM
Motor de encendido por compresión (diésel)						
Euro 1	jul 1992	2,72	-	0,97	-	0,14
Euro 2, IDI	ene 1996	1	-	0,7	-	0,08
Euro 2, DI ^a	ene 1996	1	-	0,9	-	0,1
Euro 3	ene 2000	0,64	-	0,56	0,5	0,05
Euro 4	ene 2005	0,5	-	0,3	0,25	0,025
Euro 5 ^b	sep 2009	0,5	-	0,23	0,18	0,005 ^c
Euro 6	sep 2014	0,5	-	0,17	0,08	0,005 ^e
Motor de encendido provocado (gasolina)						
Euro 1	jul 1992	2,72	-	0,97	-	-
Euro 2	ene 1996	2,2	-	0,5	-	-
Euro 3	ene 2000	2,3	0,2	-	0,15	-
Euro 4	ene 2005	1	0,1	-	0,08	-
Euro 5 ^b	sep 2009	1	0,1 ^c	-	0,06	0,005 ^{d,e}
Euro 6	ene 2014	1	0,1 ^c	-	0,06	0,005 ^{d,e}

a- Hasta el 30/09/1999 (después de esta fecha los DI deben cumplir los límites de IDI.

b- Entra en vigor para todos los vehículos en enero de 2011.

c- y NMHC = 0,068 g/km

d- Aplicable sólo a vehículos con motor de inyección directa (DI)

e- 0,0045 g/km usando el procedimiento PMP de medida de partículas

3.3.2 Normativa americana para vehículos pesados con equipos embarcados

Normativa “Not-to-Exceed”

Como se comentó anteriormente, en el año 2000, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de los Estados Unidos introdujo como parte de la normativa de protección del medio ambiente 40 CFR, una nueva metodología conocida con el nombre “Not-to-Exceed – NTE” para el control de las emisiones de los motores de servicio pesado (heavy duty) de los vehículos de carretera (40 CFR part 86.1370–2007 (FR, 2000)). Esta metodología se basa en el control de las emisiones en todo el rango de régimen de giro y carga del motor que experimenta en uso real.

La prueba NTE para los vehículos pesados, a diferencia de los ciclos de conducción normalizados para vehículos ligeros, no implica un ciclo específico de conducción, ni tiempo, ni distancia. Por el contrario, implica la conducción del vehículo en cualquier recorrido, de tal forma que el motor esté bajo condiciones de operación dentro de una zona determinada de su curva característica (par & régimen), zona conocida con el nombre de “zona NTE”. Dentro de la zona NTE se puede incluir la operación en estado estacionario o en condiciones transitorias y bajo distintas condiciones

ambientales. El promedio de emisiones, durante un periodo mínimo de treinta segundos de operación continua dentro de la zona NTE, no debe exceder un determinado límite de emisión, llamado límite de emisión NTE.

La zona de control NTE representa las velocidades y las cargas del motor en las que opera cuando el vehículo está funcionamiento en condiciones normales de uso. En la figura 3.14, se puede observar el esquema básico de las zonas NTE.

Figura 3-14: Zona básica de control NTE.

En esta zona, se incluyen todos los regímenes del motor por encima del 15% de las velocidades que se han adoptado en el ciclo europeo estacionario (European Stationary Cycle – ESC) para homologación de motores de vehículos pesados, de la siguiente forma:

$$\text{Régimen inferior Zona NTE} = \eta_{lo} + 0,15 \times (\eta_{hi} - \eta_{lo}) \quad (3-3)$$

donde, η_{hi} es la velocidad más alta en la curva de potencia donde el 70% de la potencia máxima del motor sigue siendo alcanzable, η_{lo} es la velocidad más baja en la curva de potencia donde el 50% de la potencia máxima del motor sigue siendo alcanzable. Se incluyen también todos los puntos de operación del motor por encima del 30% del par máximo y del 30% de la potencia máxima.

Las especificaciones técnicas de los equipos de medida de emisiones utilizados para la realización de este tipo de ensayos, los detalla la norma americana en el 40 CFR Parte 1065, Subparte J. (40 CFR part 86.1375–2007 (FR, 2005))

Normativa sobre sistemas portátiles de medida de emisiones “PEMS”

La normativa americana que regula y establece el procedimiento para la medida embarcada de emisiones de motores de vehículos de carretera es la 40 CFR “Protección del medio ambiente”, subcapítulo U “Control de contaminación del aire”, parte 1065 “Procedimientos de ensayo de motores”, subparte J “Ensayos en campo y Sistemas portátiles de medida de emisiones”. Esta normativa apareció por primera vez en el año 2002, estableciendo unas especificaciones técnicas para la medida “en campo” de

emisiones en motores en uso, de gran potencia, de encendido provocado y de aplicación industrial (FR, 2002).

En el año 2004 se perfeccionaron las especificaciones técnicas de los sistemas portátiles de medida de emisiones y se amplió su uso a motores diesel (FR, 2004b). En el año 2005, la norma introduce el término “Portable Emission Measurement Systems” y el acrónimo PEMS y estos equipos se acercan a las especificaciones técnicas de los equipos normalizados de medida de emisiones, por lo que se permitió su uso también en ensayos de laboratorio normalizados, aunque no para ensayos de certificación, porque las exigencias son menores que las de los equipos normalizados de laboratorio (FR, 2005b).

Esta normativa regula el procedimiento para la realización de los ensayos en campo, establece las características técnicas que deben cumplir los instrumentos de medida y equipos auxiliares que integran el sistema de medida de emisiones, así como las instrucciones de montaje, procedimiento de calibración y verificación y los procedimientos de cálculo que deben utilizarse.

Debido a que esta normativa se utiliza de referencia para el desarrollo de la parte II de la presente tesis doctoral, las características principales se tratarán en el capítulo 4 y los diferentes detalles se irán introduciendo en los diferentes capítulos de esa parte.

Parte II.

Medida de emisiones con equipos embarcados

Capítulo 4

CONSIDERACIONES GENERALES SOBRE EQUIPOS PORTÁTILES DE MEDIDA DE EMISIONES - PEMS

Los equipos portátiles para medida de emisiones en vehículos, PEMS, son en esencia un pequeño "laboratorio" portátil que se utiliza para medir y evaluar las emisiones de fuentes móviles (por ejemplo: automóviles, camiones, autobuses, equipos de construcción, generadores, trenes, grúas, etc) a efectos de certificación, toma de decisiones y de forma más general, para el estudio del fenómeno de emisiones en condiciones reales de uso de los motores. Por lo tanto, el uso de los PEMS se ha extendido en los últimos años no sólo a entidades gubernamentales como la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) o a la Dirección General de Medioambiente de la Comisión Europea, sino a centros de investigación y entidades del sector privado. Varias agencias estatales, federales e internacionales comenzaron a referirse a este término abreviado a principios del 2000 y ahora hace parte de la jerga industrial.

Como se indicó en el capítulo 2, los sistemas portátiles de medida de emisiones (en adelante PEMS) comenzaron a desarrollarse a nivel comercial a finales de los años noventa y están diseñados para medir las emisiones producidas por un motor de combustión interna durante el uso real del vehículo, de manera similar a la que se puede realizar en un banco de rodillos. También, en el capítulo 3, subapartado 3.3.2, se describió a grandes rasgos, la normativa americana "Not-to-Exceed" para la verificación del cumplimiento de los límites de emisión en los vehículos pesados, normativa que

implica la medida de emisiones con equipos portátiles y embarcables en el caso de vehículos.

Las características particulares de los PEMS son las de ser sistemas de medida mínimamente intrusivos, de fácil instalación y puesta a punto en cualquier vehículo de carretera o maquinaria no de carretera, independientemente de marca, tipo, combustible, sistema de diagnosis, etc. y ser utilizado mientras el vehículo realiza su función en condiciones reales, como puede ser el de circular por calles urbanas, carreteras interurbanas, caminos, autopistas o desempeñar otras funciones como en el caso de la maquinaria móvil. Adicionalmente, la operación del sistema no debe influir significativamente en los parámetros de funcionamiento del vehículo, como pueden ser la masa (el peso del equipo debe ser pequeño) o el volumen (el equipo debe caber dentro del espacio trasero incluso de un turismo pequeño), y no afectar a las condiciones de conducción del mismo, maniobrabilidad, visibilidad etc.

Por su parte, la principal característica de los PEMS utilizados para certificación de emisiones, es la exactitud y la fiabilidad de los niveles de medida de los constituyentes del gas de escape. La medida debe tener repetibilidad y deben estar correlacionadas adecuadamente con las medidas realizadas en laboratorio, sea en pruebas en banco de motor o en banco de rodillos, con instrumentos y métodos certificados. Además, es esencial que los equipos y los métodos utilizados por los PEMS tengan la exactitud y fiabilidad para su uso en condiciones de “campo” y por lo tanto, el método de calibración y los procedimientos de medida deben hacer parte del sistema de medida.

Los tiempos de retraso y la función de respuesta de cada uno de los instrumentos de medida utilizados deben ser conocidos y tenidos en cuenta para el análisis de los resultados. Algunos parámetros, como la velocidad y el par motor (si aplica) se miden de forma instantánea en el motor, mientras que otros parámetros como el caudal de gas de escape y los niveles de concentración de las especies, suelen tener un retraso causado por el tiempo que transcurre desde que los gases de escape abandonan la cámara de combustión del motor y llegan al punto de muestreo y de allí, a través de conductos, a los analizadores y otro causado por el propio tiempo de retraso en la respuesta de los analizadores que es causado directamente por la tecnología de medida utilizada. Por lo tanto para que la medida de las diferentes variables estén entre sí sincronizadas, es necesario tener en consideración los tiempos de retraso de cada señal.

Debido a que el objetivo general de esta segunda parte, es el estudio de los problemas asociados a la medida instantánea de emisiones másicas con equipos embarcados, aplicado al desarrollado de un equipo concreto llamado MIVECO-PEMS, en el apartado 4.1 se hace una pequeña introducción sobre los objetivos específicos que se plantearon para su desarrollo y que explican las diferentes soluciones adoptadas y que se irán relacionando en los capítulos siguientes.

En el apartado 4.2, se plantean las ecuaciones básicas que se involucran en el desarrollo de los equipos portátiles de medida de emisiones y en el apartado 4.3 se relacionan los diferentes subsistemas que componen un PEMS y que en los capítulos siguientes serán tratados de forma independiente por la complejidad que tiene cada uno de los subsistemas y el conjunto en sí.

Por su parte, en el apartado 4.4, se relaciona las principales características y requerimientos establecidos en la normativa americana 40CFR para los equipos portátiles de medida de emisiones – PEMS. No sobra recordar, que anteriormente en el capítulo sobre Estado del Arte, en el apartado 2.2, se detallaron las características técnicas de forma comparativa de los principales equipos PEMS desarrollados a nivel mundial y en el apartado 2.5, se relacionaron los proyectos a nivel mundial más importantes que se han desarrollado con el fin de evaluar y validar las prestaciones de los PEMS disponibles con relación a los sistemas normalizados de medida de emisiones, así como determinar los procedimientos oficiales para los ensayos oficiales NTE.

4.1 Generalidades del MIVECO- PEMS

Como se indicó en el apartado 1.3, el desarrollo del equipo MIVECO-PEMS ha hecho parte de un proyecto subvencionado por el Ministerio de Medio Ambiente, Rural y Marino de España, llevado a cabo de forma conjunta por la Universidad Politécnica de Madrid, la Universidad de Alcalá y el CIEMAT. El objetivo general ha sido desarrollar un equipo de medida y una metodología de ensayo para estudiar los efectos de las condiciones reales de utilización de los vehículos de transporte por carretera en las emisiones contaminantes. Así como acometer estudios con el fin de conocer y comprender la influencia de las condiciones reales del tráfico en entornos urbanos o extraurbanos sobre las emisiones que afectan al medio ambiente, como pueden ser la influencia del tipo de carburante, el efecto de las infraestructuras y el urbanismo, la influencia de la pauta de conducción o de la congestión del tráfico.

Para esto, se determinó que el equipo debería ser capaz de determinar de forma dinámica los siguientes parámetros:

- Las emisiones másica instantáneas y promediadas en forma de gramos por kilómetro de componentes gaseosos (CO, HC, NO_x, O₂, CO₂, etc) y de partículas por el tubo de escape.
- El consumo mediante cálculos basados en el balance de carbonos en los gases de escape y del caudal de gases de escape.
- Los parámetros de utilización y funcionamiento del vehículo como velocidad, aceleración, pendiente, régimen del motor, condiciones atmosféricas y temperaturas.

Es importante tener en cuenta que la finalidad del equipo MIVECO-PEMS es ser un equipo para investigación, no para ensayos de certificación de emisiones, por lo tanto los requerimientos son diferentes, aunque para la determinación de los errores y caracterización del equipo, se utilicen los criterios establecidos en la normativa americana 40CFR 1065 parte J desarrollada para equipos portátiles en ensayos de certificación de emisiones de motores en uso real.

En la Tabla 4.1 se muestra la relación de los instrumentos de medida individuales que hacen parte del equipo MIVECO-PEMS, con las características técnicas suministrada

PARTE II: Medida de emisiones con equipos embarcados

por los diferentes fabricantes. En los siguientes capítulos se hará referencia de forma independiente a cada uno de los instrumentos aquí relacionados.

Tabla 4.1 Características técnicas de los instrumentos de medida utilizados en el equipo MIVECO-PEMS

Señal	Equipo de medida		Tipo de medida	Rango de medida	Tiempo de respuesta	Medidas (mm) W x D x H	Peso Kg
	Marca	Modelo					
NOx (MEC)	HORIBA	Mexa 720	Sensor estado sólido óxido de zirconio	0-3K ppm	T63:0,7 s	130 x 200 x 75	1
O2				0-50% vol			
CO	SIGNAL	9000 MGA	NDIR (Infrarojos no dispersivos)	100/500/1000/5000/10 000 ppm	<15 seg al 95%	19" rack 3U high	19
CO2							
HC	MESS ANALYSENTECHNIK GMBH	Thermo FID PT	FID (Flame-Ionization- Detector)	0-1,500000mgC- ong/m3	<0.5 s al 90%	342 x 266 x 271	9 (sin botellas de gas)
Lambda	ETAS	LA4	Sonda Lambda	0,7 a 32,767	2 ms	119 x 48 x 62	0,23
NOx MEP	SENSORS	AGM 400	NDUV	0-100 ppm hasta 0- 10000 ppm	< 1 s	170 x 420 x 100	3,7
Partículas	MAHA	MPM4	Dispersión de rayos láser	0,01...700 mg/m3		160 x 220 x 350	6
Presión diferencial	BD SENSORS	DPS100-200- 050-2-3-5-Y00	Sensor piezoresistivo de silicona	0-50 mbar	T90 0,02s	120 x 80 x 55	0,3
Presión absoluta	BD SENSORS	DPS100-200- B100-2-3-B- 00Y-0-000	Sensor piezoresistivo de silicona	900-1100 mbar	T90 0,02s	120 x 80 x 55	0,3
Temperatura	PMA	UNIFLEX RISO	Termopar tipo K	0-300 °C		62 x 88 x 24	0,12
Manguera calefactora	Eltherm	ELH/AIW- 200°C		0-200°C		2 m	
Bomba de vacío	SIGNAL	327983	Bomba de diafragma				
Filtro línea fría	PARKER	58N				70 X 160	0,5
Filtro línea calefactada	PARKER	38/12				60 x 240	2,3
Tarjetas de adquisición de datos	National Instruments	NI USB-6211	Analógica	-10 a 10 V			

4.2 Ecuaciones básicas involucradas en los sistemas portátiles de medida de emisiones-PEMS

Como se indicó anteriormente (apartado 3.3), el objetivo en general de la medida de emisiones, y en nuestro caso con equipos embarcados, es determinar los factores de emisión en gramos por unidad de distancia (g/km) o en gramos por unidad de energía efectiva producida (g/kW.h). La determinación de estos factores, implica por un lado la medida de las emisiones máscas y por otro lado la medida de los factores de utilización real, que en este caso son la distancia total recorrida y la energía efectiva producida.

De forma general, el factor de emisión para los motores estacionarios y motores de vehículos pesados, de cada uno de los contaminantes (FE_i), se puede calcular por medio de la siguiente expresión:

$$FE_i [\text{g/kW} \cdot \text{h}] = \frac{\dot{m}_i [\text{g/h}]}{N [\text{kW}]} \quad (4-1)$$

donde $\dot{m}_i$ es el caudal másico de emisión de cada contaminante y N la potencia efectiva desarrollada por el motor en una condición de funcionamiento estacionaria determinada.

Para el caso del transporte por carretera, el factor de emisión en g/km, para cada uno de los contaminantes, se puede calcular con base en el caudal másico de emisión del contaminante ($\dot{m}_i$) y de la velocidad media del vehículo (v) en km/h, según la siguiente expresión:

$$FE_i [\text{g} / \text{km}] = \frac{\dot{m}_i [\text{g/h}]}{v [\text{km/h}]} \quad (4-2)$$

El caudal másico de emisión de cada contaminante ($\dot{m}_i$), es la magnitud más importante, debido a que es la cantidad de contaminante que se emite por unidad de tiempo a la atmósfera. Este caudal másico de emisión, al no existir equipos que midan de forma directa esta magnitud, se calcula con base en la concentración molar de cada especie (χ_i en % V. o ppm V según su valor), medida por medio de los analizadores de gases y del caudal total de gases de escape ($\dot{m}_E$), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_i = \chi_i \cdot \dot{m}_E \cdot \frac{M_i}{M_E} \quad (4-3)$$

Siendo M_i y M_E los pesos moleculares del contaminante i y del gas de escape respectivamente (muy similar al del aire).

Por otro lado, en el caso de motores de vehículos, si no se cuenta con una medida directa de par motor, la potencia (N) se puede calcular con base en la fuerza de tracción F_p , la velocidad del vehículo (v) y el rendimiento del sistema de transmisión (η_{TR}), de la siguiente manera:

$$N = \frac{1}{\eta_{TR}} v \cdot F_t = \frac{1}{\eta_{TR}} v \left(F_{\text{aceleración lineal}} + F_{\text{ascensión}} + F_{\text{rodadura}} + F_{\text{rozamiento aire}} \right) \quad (4-4)$$

En donde la fuerza de resistencia a la tracción se compone de la resistencia debida a la aceleración lineal ($F_{\text{aceleración lineal}}$), a la componente vertical del peso ($F_{\text{ascensión}}$), a la rodadura

(F_{rodadura}) y a la resistencia aerodinámica ($F_{\text{rozamiento aire}}$), que se expresan a su vez en función

de la masa del vehículo (m), aceleración de la gravedad (g), ángulo de pendiente de la vía (a), el coeficiente de rodadura (f_r), coeficiente de resistencia aerodinámica (C_X), la densidad del aire (ρ_a), el área frontal del vehículo (A_{vb}) y de la velocidad del viento (v_{viento}), según la siguiente ecuación.

$$N = \frac{1}{\eta_{TR}} v \cdot F_t = \frac{1}{\eta_{TR}} v \left(m \frac{dv}{dt} + m \cdot g \cdot \text{sena} + m \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot C_X \cdot A_{vb} \cdot \rho_a \cdot v_{\text{viento}}^2 \right) \quad (4-5)$$

De las anteriores ecuaciones, vemos que para la determinación de los factores de emisión de los vehículos en condiciones de funcionamiento real, es necesario medir o determinar una serie de variables, que se pueden dividir en:

- Concentración molar (volumétrica) o másica de las diferentes especies en el caudal de gas de escape (χ_i): CO, NO_x, CO₂, HC y partículas.
- Caudal másico de gas de escape ($\dot{m}_E$)
- Condiciones atmosféricas como la velocidad del viento (v_{viento}), temperatura y presión atmosférica, etc.
- Variables dinámicas del vehículo como la velocidad del vehículo (v), régimen del motor (n), etc.
- Variables de la infraestructura vial como la pendiente de la vía (a), tipo de la vía, etc.

Hay un conjunto mínimo de variables, requerido para la determinación de los factores de emisión, pero variables como la temperatura y presión atmosférica, el régimen del motor, recorrido, el tipo de vía y algunas más son útiles para la realización de multitud de estudios.

4.3 Subsistemas de un PEMS

Con base en los conjuntos de variables que se han de medir o determinar para la medida de emisiones con equipos embarcados, los PEMS se componen de los siguientes subsistemas:

- **Subsistema de analizadores de gas y partículas**, en el que se incluye adicionalmente el sistema de muestreo y acondicionamiento de la muestra. Este sistema permite determinar la concentración instantánea, en el gas de escape, de las diferentes sustancias a analizar. El grupo mínimo de especies a analizar son los HC (THC), NO_x, CO y partículas (PM), debido a que son las emisiones reguladas actualmente. En este grupo de analizadores, se incluye también la medida de la relación aire/combustible, por ser indispensable para la determinación del consumo de combustible. En este subsistema se podrían incluir, adicionalmente, la medida adicional de CO₂, SO₂, NH₃ o N₂O o la medida discriminada de la concentración NO/NO₂, de las especies individuales que hacen parte de los HC, así como la determinación de la concentración de carbonilos como el formaldehído, acetaldehído y acroleínas, sustancias tóxicas que afectan la salud.
- **Subsistema de medida de caudal y variables termodinámicas**. Debido al balance químico que existe entre el caudal de combustible, caudal de aire de admisión y el caudal de gases de escape a través de la relación aire/combustible, a partir de esta última relación y de cualquiera de los tres caudales (aire, combustible o gas de escape) se pueden determinar los otros dos, y con ello determinar el caudal másico de las diferentes especies analizadas. En los equipos de análisis de gases en

banco de motor, lo más sencillo es medir el caudal de combustible o el caudal de aire de admisión, pero en el caso de la medida en banco de rodillos o la medida en campo con equipos embarcados, lo más usual suele ser la medida del caudal de gas de escape, porque requiere una mínima intrusión en el motor y en el vehículo. En el caso de la medida de caudal de gas de escape o de aire de admisión, también es necesario medir las condiciones termodinámicas (temperatura y presión) del gas o del aire en la zona en donde se mide el caudal, para poder determinar el caudal másico de gas o aire y con ellos calcular el caudal másico de cada una de las sustancias analizadas.

- **Subsistema de medida de variables del motor y vehículo, variables ambientales y variables de infraestructura.** En este subsistema se incluyen los equipos de medida de las diferentes variables externas que afectan a las emisiones, las condiciones de funcionamiento del motor y del vehículo o de la maquinaria sobre la cual se está midiendo las emisiones y las condiciones del ensayo realizado. En cuanto a las variables del motor, mínimo se suelen medir el régimen de giro del motor y las temperaturas características (aceite y agua de refrigeración). En cuanto a las variables del vehículo, mínimo se debe medir la velocidad, aunque adicionalmente, se pueden medir la posición de los diferentes pedales, en especial del pedal del acelerador, así como la posición geográfica del vehículo, la aceleración en los 3 ejes, etc. En cuanto a las variables ambientales, se puede medir la temperatura, humedad y presión atmosférica, así como la velocidad del viento. En cuanto a las variables de infraestructura, la más importante es la medida de la pendiente de la vía. En algunos casos, muchas de estas variables se extraen del bus de datos o directamente de la centralita del motor (ECM) por medio de interfases adecuadas, aunque el uso de sistemas de medida independiente, garantizan la igualdad de medida para los diferentes vehículos.
- **Subsistema de adquisición, registro y posprocesamiento de datos.** Este es el subsistema por el cual se recogen de forma simultánea las señales medidas en los tres subsistemas anteriores, donde se almacenan los datos en ficheros y donde se realizan todos los cálculos necesarios para la determinación de los factores de emisión. Este subsistema incluye todas las técnicas de tratamiento de señales que se utilizan para la sincronización, filtrado y corrección de las diferentes señales.

4.4 Consideraciones generales de la normativa americana 40CFR parte 1065 subparte J sobre Sistemas portátiles de medida de emisiones - PEMS

Para el desarrollo de toda la segunda parte de la tesis doctoral, cuyo objetivo es el estudio de los problemas asociados a la medida de emisiones con equipos embarcados, aplicado al desarrollo de un equipo portátil de medida de emisiones, se utiliza a modo de referencia la normativa americana 40 CFR 1065 subparte J actualizada a julio de 2010 (FR, 2010), aunque la finalidad del equipo de medida de emisiones desarrollado no es la

de servir para este tipo de ensayos de certificación, sino para realizar estudios de investigación de emisiones en tráfico real. Por lo tanto, esta normativa se utilizará para analizar las diferentes alternativas de medida y los diferentes problemas que se presenta con la medida con equipos embarcados, incluyendo los problemas de exactitud y precisión. Razón por la cual en este apartado se incluye un resumen de esta normativa.

Adicionalmente, en los capítulos siguientes se incluyen diferentes detalles de esta normativa, debido a que se utiliza de referencia para el estudio de los problemas asociados a la medida con equipos embarcados de cada uno de los subsistemas que lo componen, así como del sistema completo.

El objetivo de la normativa 40 CFR 1065J es la de definir los procedimientos para la medida de las emisiones específicas de un motor en condiciones de uso real. Por lo tanto estos procedimientos están diseñados principalmente para las medidas en campo de emisiones en motores que permanecen instalados en vehículos o maquinaria, aunque también son procedimientos que se pueden aplicar a la medida de emisiones en laboratorio.

4.4.1 Especificaciones técnicas generales de los equipos de medida involucrados en los PEMS

La normativa recomienda que los equipos de medida utilizados en los PEMS cumplan las especificaciones técnicas de los equipos convencionales de laboratorio, especialmente si se usa para medidas de certificación en laboratorio. En caso que el uso del PEMS sea estrictamente para medida en campo, los instrumentos de medida deben cumplir con las especificaciones relacionadas en la Tabla 4.2.

Esta normativa establece los equipos que deben ser usados como parte del sistema portátil de medida de emisiones y que considera conforme a los requerimientos de precisión y exactitud presentados anteriormente. Es posible utilizar otro tipo de equipamiento, siempre y cuando se compruebe los requisitos de exactitud y precisión.

Tabla 4.2 Recomendaciones mínimas para los equipos de medida de los PEMS según normativa americana 40CFR 1065-J

Medida	Tiempo de subida ² t_{10-90}	Frecuencia de muestreo	Exactitud ¹	Repetibilidad ¹	Ruido ¹
Régimen de motor	1 s	Promedio a 1 Hz	5% - VME o 1% - VPE	2% - VME o 1% - VPE	0,5% VPE
Transductores de presión	5 s	1 Hz	5% - VME o 5% - VPE	2% - VME o 0,5% - VPE	1% VPE
Presión atmosférica	50 s	0,1 Hz	250 Pa	200 Pa	100 Pa
Sensores de temperatura	5 s	1 Hz	1% - VME o 5K	0,5% - VME o 2K	0,5% VPE o 0,5K
Caudalímetro gas escape	1 s	Promedio a 1 Hz	5% - VME o 3% - VPE	2% - VME	2% VPE
Analizadores de gases	5 s	1 Hz	4% - VME o 4% - VA	2% - VME o 2% - VA	1% VPE

1. La exactitud, repetibilidad y el ruido se determinan con la misma colección de datos, según 40CFR1065.305 y con base en valores absolutos. "VME" se refiere al valor medio esperados según la norma, "VPE" al valor pico esperado según la norma y "VA" al $\bar{v}$

2. La respuesta dinámica se da en función del tiempo de subida (t_{10-90}) que corresponde al tiempo medio que el instrumento tarda en subir del 10% al 90% del valor del escalón, cuando este es sometido a una entrada de este tipo.

4.4.2 Calibración y verificación de un PEMS

La calibración y verificación de los subsistemas debe verificarse conforma a la norma 40CFR 1065-D, aunque la verificación del sistema en su conjunto consiste en la operación de un motor en un ciclo de trabajo, en donde se mida simultáneamente todas las variables por medio de los dos sistemas: el PEMS y el sistema de medida de emisiones convencional de laboratorio.

Para ello es necesario seleccionar o crear el ciclo de trabajo, de tal forma que incluyan condiciones de velocidad y par motor, así como condiciones transitorias que puede experimentar el motor en condiciones normales de uso, con una duración total entre 20 o 40 minutos. Al menos el 50% del tiempo de operación del motor debe incluir mínimo 10 intervalos de ensayo válidos para calcular los factores de emisión. Tanto para las medidas con los equipos de laboratorio como para las medidas con el PEMS, se deben seleccionar los intervalos de medida en donde el comienzo y final del intervalo sea el mismo. Para cada uno de los intervalos de ensayo, se debe calcular la emisión másica total y el trabajo total, para con ello calcular las emisiones específicas de cada uno de los intervalos de ensayo redondeando los valores al número de cifras significativas establecida en la normativa.

El ciclo de trabajo se debe repetir hasta completar al menos 100 intervalos de ensayo válidos. Para cada uno de los intervalos de ensayo, se debe restar la medida de laboratorio a la medida con el PEMS. La verificación general del PEMS se considera válida si el 91% de estas diferencias es cero o menor que cero o si el conjunto de las diferencias están en el nivel de confianza del 95% de acuerdo al procedimiento estadístico establecido en la normativa 40CFR 1065-A.

4.5 Consideraciones generales de la normativa ISO 16183 sobre medida de emisiones gaseosas en muestra directa en Heavy-duty engines.

A pesar de que esta norma ISO no está desarrollada específicamente para medida de emisiones con equipos embarcados, es de gran importancia porque establece procedimientos para la medida de emisiones en muestra directa, que son aplicables a la medida con PEMS. Esta normativa, publicada en el año 2002, sólo se utiliza a manera de referencia adicional en los casos donde la normativa americana 40CFR- 1065 no se pueda aplicar, o no especifique.

Capítulo 5

SUBSISTEMA DE ANALIZADORES DE GAS Y PARTÍCULAS

Como se indicó en el capítulo precedente, el subsistema de analizadores de gas y partículas incluye todos los equipos individuales de medida de concentración de las diferentes especies gaseosas y de partículas en los gases de escape, así como el conjunto completo de elementos necesarios para el muestreo y el acondicionamiento de la(s) muestra(s). El objetivo de cada uno de los siguientes subcapítulos es estudiar los problemas que se presentan en la medida de concentración, de cada una de las emisiones reguladas y algunas no reguladas pero de especial importancia en la medida de emisiones con equipos embarcados, identificando los factores de error involucrados.

El desarrollo de estos subcapítulos se realiza con base en la experiencia adquirida con el equipo MIVECO-PEMS desarrollado en el laboratorio de motores térmicos de la Escuela Técnica de Ingenieros industriales-UPM. Para lo cual, a modo de referencia y fundamento, se describen las tecnologías de medida disponibles comercialmente, especificando la tecnología de medida recomendada y las pruebas de verificación establecidas por la normativa americana 40CFR 1065. Se relacionan, por lo tanto, las especificaciones técnicas de los instrumentos que componen el MIVECO-PEMS y los resultados de las pruebas de evaluación de las prestaciones y validación realizadas en banco de rodillo con el equipo OBS-2200 de Horiba.

5.1 Pruebas de prestaciones de analizadores

Según la normativa americana 40CFR 1065.915, los diferentes analizadores utilizados para integrar un equipo portátil de medida de emisiones deben cumplir mínimo con los requerimientos relacionados en la Tabla 4.2 y que se resumen a continuación:

- Respuesta dinámica: t_{10-90} (tiempo de subida t_{10-90} y tiempo de bajada t_{90-10}): 5 s
- Frecuencia de muestreo: 1 Hz
- Exactitud: 4% - VME (valor medio esperado) o 4% - VA (valor medio actual)
- Repetibilidad: 2% - VME (valor medio esperado) o 2% - VA (valor medio actual)
- Ruido: 1% VPE (valor pico esperado)

5.1.1 Prueba de respuesta dinámica y frecuencia de muestreo

A pesar de que normalmente se especifica el tiempo de respuesta en las especificaciones técnicas suministradas por los fabricantes de los equipos de análisis de gases, se hicieron diferentes pruebas experimentales con gases de calibración para su verificación. Estas pruebas se realizaron también, debido a que la norma americana 40CFR-1065 establece como parámetros de control el tiempo de subida t_{10-90} y el tiempo de bajada t_{90-10} , que no corresponden exactamente al tiempo de respuesta especificado por los equipos ni a la definición de tiempo de respuesta t_{res} que se utiliza en la presente tesis doctoral. Por lo tanto, a manera de aclaración, en la figura 5.1 se muestra la curva de respuesta escalón típica para un sistema de segundo orden sobre-amortiguado, donde se puede observar la diferencia entre estos conceptos y el tiempo de retardo efectivo de la señal (t_{rel}). Adicionalmente, estas pruebas se realizaron para determinar la influencia de los accesorios en la instalación propia del equipo, en lo que tiene que ver con la longitud de la línea de muestreo de gases y accesorios como filtros o válvulas, pues estos afectan la respuesta dinámica del conjunto.

Figura 5-1: La respuesta típica de un sistema de 2º orden sobre-amortiguado a un escalón unitario.

Las pruebas de respuesta dinámica realizadas están basadas en la normativa americana 40CFR 1065.308, que se describe a continuación a modo de aclaración. Esta normativa no establece un criterio para el tiempo de retardo, pero como se verá más adelante, es un parámetro fundamental para la sincronización de las señales, por lo que estas pruebas, adicionalmente, se utilizaron para su determinación.

Alcance de la norma 40CFR 1065.308

Esta verificación se debe realizar después de la instalación o reemplazo de algún analizador usado para medida instantánea en tiempo real. También se debe realizar en caso de reconfiguración del sistema, si esta pudiera afectar la respuesta del sistema, por ejemplo en el caso de cambiar la longitud de las líneas de muestreo o adicionar filtros o si se cambia la frecuencia de muestreo o de almacenamiento de datos.

Esta prueba verifica que la frecuencia de actualización y registro de datos del sistema analizador/adquisición de datos coincide con la respuesta global del sistema ante un rápido cambio de concentración en la toma de muestra. Por lo tanto la frecuencia de muestreo debe ser tal que ante un cambio repentino de concentración no haya pérdida de información.

Para los PEMS, se establece que esta prueba se puede obviar si el sistema en conjunto pasa la prueba conjunta comentada anteriormente en el apartado 4.4.2. (40CFR 1065.920)

Procedimiento según la norma 40CFR 1065.308

La norma establece que para la realización del ensayo, la línea de muestreo debe ser de longitud mínima. Es necesario utilizar una válvula de 3 vías de accionamiento rápido (2 entradas y 1 salida), una válvula de sobre-flujo, un divisor de gas y dos botellas de gas de calibración - Span Gas: mezcla de NO-CO-CO₂-C₃H₈-CH₄ en N₂ y una botella de NO₂, además de una botella de gas cero (aire). Se debe conectar el gas cero a una de las entradas de la válvula de 3 vías y el puerto de salida del divisor de gas a la otra entrada de la válvula de 3 vías. La salida de la válvula de 3 vías se ha de conectar a la válvula de sobre-flujo y esta a la toma de muestra del analizador.

Una vez los analizadores estén en condiciones adecuadas de funcionamiento y esté estabilizada la lectura del analizador en la posición de gas cero, se debe comenzar a registrar los datos a la frecuencia normal de muestreo, que debe ser mínimo 5Hz. No se puede utilizar interpolación de datos en el caso de que la frecuencia de muestreo sea menor. Se debe proceder a cambiar la posición de la válvula de 3 vías para la entrada del gas de calibración y se debe seguir registrando hasta que la lectura del analizador se estabilice. Después se debe volver a cambiar la posición de la válvula de 3 vías a gas cero. Este procedimiento se debe repetir de tal forma que en total se registren 7 ciclos completos, terminando con gas cero.

Los datos registrados se deben utilizar para calcular el tiempo de subida t_{10-90} y el tiempo de bajada t_{90-10} . Adicionalmente, para determinar que la frecuencia de muestreo es

adecuada, se debe multiplicar el tiempo de subida y bajada por la frecuencia de muestreo utilizada en Hz y el resultado debe ser mínimo 5. Si el valor es menos que 5, se debe incrementar la frecuencia de muestreo, ajustar el caudal muestreado o utilizar un filtro digital para reducir el tiempo de respuesta. En caso de que este criterio falle, se debe asegurar que al menos la señal se actualiza y se registra mínimo a 5 Hz. En caso de que esto tampoco se cumpla, se debe usar este analizador para medida en continuo sólo si se demuestra que este fallo no afecta negativamente a su capacidad para demostrar la conformidad con las pruebas de validación conjunta relacionadas en el apartado 4.4.2 (40CFR 1065.920).

Procedimiento realizado MIVECO

El procedimiento se ajustó a los materiales y equipos disponibles en el laboratorio de motores térmicos, y consistió en someter cada analizador, tanto de muestreo directo como de medida directa (tipo sensor), a una señal escalón de concentración y a partir de los valores de concentración registrados a través del programa de adquisición de datos, establecer los valores correspondiente al tiempo de retardo (t_{rel}), el tiempo de respuesta (t_r), tiempo de subida (t_{10-90}) y tiempo de bajada (t_{90-10}).

Figura 5-2: Fotografías del montaje realizado para la prueba de tiempo de respuesta y tiempo de retardo.

Para llevar a cabo esta tarea en los analizadores de muestreo directo, se implementó un sistema de control automático, por medio del ordenador, que permite realizar escalones de cambio de concentración de gas a la entrada de cada uno de los analizadores. Los elementos que integran el sistema de control son dos electroválvulas para gas (en lugar de la válvula de 3 vías), botellas de gas calibradas y botellas de N_2 con alto grado de pureza a manera de gas cero. Adicionalmente se usó una válvula de sobre-flujo para garantizar que la presión a la entrada del analizar fuera igual a la presión atmosférica. También se usó un juego de relés para acondicionar la señal de apertura/cierre recibida del ordenador, una tarjeta de adquisición de datos National Instruments con canales de entradas y salidas analógicas y un programa de control, adquisición y registro de datos

específicamente diseñado usando LabVIEW®. Este sistema permite realizar sucesivos escalones de concentración en instantes de tiempo controlados. El cambio de concentración se realiza en la entrada del tubo de muestreo con el objeto de medir el tiempo de respuesta real del conjunto y no sólo del analizador.

En la Figura 5-2 y en la Figura 5-3 se muestra unas fotografías y el esquema del montaje realizado para estas pruebas, donde se observan el equipo MIVECO-PEMS de análisis de gases, las botellas de calibración y el juego de electroválvulas y relés.

Se realizaron dos tipos de experimentos. En los primeros, ensayos preliminares, la señal escalón se generaba manualmente por medio de un interruptor conectado al sistema de electroválvulas, el cual enviaba, además, una señal de voltaje al programa de adquisición de datos para registrar el momento exacto en el cual la concentración del gas cambiaba (en el esquema de la Figura 5-3, se reemplazó el juego de relés por un interruptor manual). Estos ensayos tenían como objetivo conocer la respuesta dinámica de cada uno de los equipos, identificando el tiempo de respuesta total de cada uno de ellos. Los segundos ensayos, ensayos exhaustivos, se realizaron con el objeto de probar la repetibilidad de la respuesta de los equipos de análisis de gases. Para esto, se implementó el sistema de control relacionado anteriormente y cuyo esquema se observa en la Figura 5-3.

En los ensayos preliminares se realizaron también pruebas para valorar el efecto que tiene la presencia de filtros, bombas, la longitud de la línea de muestreo, etc.

Figura 5-3: Esquema del montaje realizado para la prueba de tiempo de respuesta y tiempo de retardo.

Para los analizadores tipo sensor, que miden directamente en el tubo de escape, no es fácil realizar esta prueba, debido a que no es posible realizarla de la forma como se indicó en el esquema de la Figura 5-3. La razón es que el sensor debe estar inmerso en el flujo de gas y localizado transversalmente a este. La solución adoptada, fue construir una cámara donde instalar la sonda con una entrada de gas y salida abierta a la atmósfera. El problema de este montaje, es que el cambio de concentración no es instantáneo a pesar

de realizarse por medio de las electroválvulas, debido a que la cámara tiene un volumen determinado y por lo tanto, hay un tiempo de mezcla hasta que todo el volumen de la cámara queda ocupado por el gas entrante (El tiempo de mezcla se podría determinar si se midiera la presión a la entrada de la cámara, para con este, calcular el caudal entrante y poder aplicar un modelo de mezcla que permitiría conocer en cada instante la concentración media dentro de la cámara). De todas maneras, las pruebas se realizaron a manera de exploración y conocimiento de los analizadores. El esquema de conexión, entonces utilizado fue el presentado en la Figura 5-4.

Figura 5-4: Esquema del montaje realizado para la prueba de tiempo de respuesta y tiempo de retardo.

5.1.2 Prueba de exactitud, repetibilidad y ruido

Para la determinación y/o verificación de la exactitud, repetibilidad y ruido, se realizó con base al procedimiento normalizado en la normativa americana 40CFR 1065 y con base a unos ensayos realizados en banco de rodillo utilizando como equipo de referencia un equipo OBS-2200 de marca Horiba.

Procedimiento normalizado (40CFR 1065.305)

Según la norma, no es necesario realizar esta prueba para verificar la exactitud, precisión y ruido de un equipo comercial, pero si es útil para definir las características de un nuevo equipo de medida o después de una reparación.

Para realizar esta prueba es necesario preparar el instrumento de medida, con la linealización y calibración previa que requiera. Inicialmente, en el caso de analizadores de gas, se debe usar un gas cero para verificar el cero del equipo o una señal de referencia o estado termodinámico de referencia en caso de que no sea un analizador de gas. Después se debe introducir un gas de calibración (span gas), señal de referencia o estado termodinámico. El valor de concentración del gas (valor de referencia - y_{ref}) debe ser un valor certificado conforme a la normativa de pesos y medidas y debe ser cercano al valor esperado en los ensayos. En todos los casos es necesario dejar

suficiente tiempo para que se establezca la medida en el instrumento. Se debe registrar durante 30 segundos y sacar la media aritmética y la desviación estándar de los valores registrados ($\bar{y}_i$ y σ_i respectivamente).

En el caso de que la referencia no sea absolutamente constante, como en el caso del caudal, es necesario medir durante 30 segundos con el instrumento certificado y calcular el valor medio de referencia ($\bar{y}_{ref}$). El error se calcula como indica las ecuaciones 2.1, según sea el caso.

$$\varepsilon_i = \bar{y}_i - y_{ref} \quad \text{ó} \quad \varepsilon_i = \bar{y}_i - \bar{y}_{ref} \quad (5-1)$$

Es necesario repetir el procedimiento 10 veces, hasta obtener 10 medias aritméticas ($\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \dots, \bar{y}_{10}$), 10 desviaciones estándar ($\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \dots, \sigma_{10}$) y 10 errores ($\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3, \dots, \varepsilon_{10}$). Estos valores deben ser usados para calcular la exactitud, repetibilidad y ruido, se la siguiente manera:

- Exactitud: Es la diferencia absoluta entre el valor de referencia (y_{ref} ó $\bar{y}_{ref}$) y el promedio de las 10 medias aritméticas ($\bar{y}_1, \bar{y}_2, \bar{y}_3, \dots, \bar{y}_{10}$).

$$Exactitud = |y_{ref} - \bar{y}|, \text{ donde } \bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^{10} \bar{y}_i}{10} \quad (5-2)$$

- Repetibilidad: Se calcula como 2 veces la desviación estándar de los 10 errores, esto es:

$$repetibilidad = 2\sigma_\varepsilon \quad (5-3)$$

- Ruido: Se calcula como 2 veces la media cuadrática de las 10 desviaciones estándar cuando la señal o valor de referencia es cero, según se expresa en la siguiente ecuación:

$$ruido = 2 \cdot rms_\sigma \quad (5-4)$$

Las deficiencias encontradas en los equipos con respecto a estos tres aspectos no afectan negativamente a su capacidad para demostrar la conformidad con las pruebas de validación conjunta relacionadas en el apartado 4.4.2 (40CFR 1065.920).

Procedimiento realizado MIVECO

Con el fin de determinar la exactitud, precisión y ruido de los analizadores así como de verificar y contrastar las medidas realizadas con el equipo MIVECO-PEMS, se realizaron una serie de ensayos en banco de rodillo en las instalaciones del Instituto Universitario de Investigación del Automóvil de la Universidad Politécnica de Madrid. Para estos ensayos, se usó de referencia las medidas del equipo Horiba OBS-2200,

equipo verificado conforme con la norma 40 CFR parte 1065.920 en el año 2010 (Nakamura et al., 2007 y Bougher et al., 2010). Pero, debido a que el modelo de equipo OBS-2200 utilizado, de propiedad del INSIA, fue adquirido con anterioridad a la verificación oficial del equipo, las medidas realizadas, no están certificadas. De todas formas, debido a la imposibilidad de disponer en España de otro equipo PEMS verificado conforme con la normativa americana, estos datos se toman como referencia.

Figura 5-5: Fotografía del montaje realizado para los ensayos de validación del MIVECO-PEMS en el banco de rodillo del INSIA.

En la figura 5.5, se muestra una fotografía del montaje realizado para la realización de estas pruebas. Los caudalímetros y tomas de muestra de los equipos Horiba OBS-2200 y del MIVECO-PEMS se instalaron en serie con el fin de contrastar la medida instantánea de los dos equipos. Las pruebas realizadas, consistieron en la realización de 6 ensayos, relacionados en la Tabla 5.1.

El primer y quinto ensayo consistió en medir las emisiones del coche funcionando en punto muerto a diferentes condiciones de velocidad del motor (1 minuto a ralentí, 1 minuto a 1200 min^{-1} , 1 minuto a 1900 min^{-1} , 1 minuto a 2400 min^{-1} , 1 minuto a 3000 min^{-1} y 1 minuto a 3500 min^{-1}). La segunda, cuarta y sexta prueba consistió en la realización de un Ciclo NEDC, según se especificó en el apartado 3.3.1 y en la Figura 3-13. En la sexta prueba la diferencia con respecto a las anteriores es que se cambió el valor de inercia equivalente del freno a 1600 kg, en lugar de 1800 kg. La tercera prueba corresponde a un ensayo a velocidad constante, en varias combinaciones de régimen de

giro del motor y marcha (1ª marcha a 2000 y 3500 min⁻¹, 2ª marcha a 2000 y 3500 min⁻¹, 3ª marcha a 3000 y 4500 min⁻¹, 4ª marcha a 2000 y 3000 min⁻¹ y 5ª a 1500 y 2500 min⁻¹).

Tabla 5.1 Pruebas de validación MIVECO-PEMS en banco de rodillo del INSIA.

Hora	Descripción ensayo	Duración [min]	Resistencia al freno: $F = F_0 + F_1 \cdot v + F_2 \cdot v^2$ [N]			
			Inercia equivalente [kg]	F_0 [N]	F_1 [N/(km/h)]	F_2 [N/(km/h) ²]
1046	Punto muerto 1 a diferentes revoluciones	11,7	1800	260,0	0,03	0,0509
1106	Ciclo Europa 1	20,7	1800	260,0	0,03	0,0509
1133	A régimen constante, varios puntos.	19,7	1800	260,0	0,03	0,0509
1203	Ciclo Europa 2	21,0	1800	260,0	0,03	0,0509
1231	Punto muerto 2 a diferentes revoluciones	9,7	1800	260,0	0,03	0,0509
1321	Ciclo Europa masa modificada	21,0	1600	230,0	0,14	0,0486

El coche utilizado en estos ensayos fue un Peugeot 406 diésel de inyección indirecta, cuyas características técnicas se presentan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Especificaciones técnicas del coche ensayado en banco de rodillos INSIA.

Marca	Peugeot	Marca motor	Peugeot
Clase de vehículo	Turismo	Tipo motor	D-P8C
Denominación comercial	406 BK STD T 2.1	Normativa emisiones	EU2
Placa número	M3757WG	Número de cilindros	4
Año de matriculación	1998	Cilindrada (cm ³)	2088
Tara (kgf)	1485	Potencia real (kW)	80
PTMA/PMA (kgf)	1949	Caja de cambios	Manual
Número de asientos	5	Número relaciones	5
Coefficiente C _x	0,29	Superficie frontal (m ²)	2,26
Factor de resistencia rodadura	0,66	Peso total con pasajeros y equipo MIVECO_PEMS	aprox. 1740 kg

5.2 Medida de concentración de NO_x

5.2.1 Tecnologías de medida de concentración de NO_x

Actualmente las principales tecnologías utilizadas para la detección de NO_x son:

- Analizador por quimioluminiscencia (CLD)
- Analizador ultravioleta no-dispersivo (NDUV)
- Sensor de zirconio

La normativa americana 40CFR 1065 recomienda para la medida de la concentración de NO_x en los gases de escape del motor, en sistemas de medida de emisiones estacionarios y portátiles (PEMS) usados para la certificación de emisiones, los analizadores por quimioluminiscencia (CLD) y los analizadores ultravioleta no-

dispersivo (NDUV). El sensor de zirconio fue recomendado inicialmente para los PEMS (FR, 2002), pero la normativa actual ya no lo incluye como alternativa.

Analizador por quimioluminiscencia (CLD)

El procedimiento de referencia para la medida de NO_x en la normativa americana actual establece el uso de analizadores por quimioluminiscencia y los recomienda principalmente para la medida de manera continua tanto en muestra directa como en muestra diluida, aunque también lo recomienda para la medida de concentraciones en muestra diluida acumulada en bolsas (FR, 2005b). A pesar de que este tipo de analizadores únicamente miden la concentración de NO en el gas, lo recomienda la normativa para la medida de NO_x , si se usa conjuntamente con un convertor $\text{NO}_2\text{-NO}$ en la línea de muestreo del equipo y porque las otras especies que forman el NO_x son despreciable en los gases de escape de los motores.

Figura 5-6: Esquema de un analizador de quimioluminiscencia (CLD). (Adaptado de Pundir, 2007)

La medida por quimioluminiscencia se basa en la emisión de radiación luminosa de la reacción del NO con ozono, como se observa en las siguientes ecuaciones.

Donde h es la constante de Planck y ν la frecuencia de la radiación emitida (su longitud de onda está en la banda de 0,6 a 3 μm). El dióxido de nitrógeno excitado (NO_2^*) que se produce en la reacción del monóxido de nitrógeno (NO) con el ozono (O_3) libera su energía mediante la emisión de un fotón, como indica la ecuación 5.5. La intensidad de la emisión de luz es proporcional a la concentración de NO. Por tanto, recogiendo la emisión de luz mediante un fotomultiplicador y un sensor, se puede establecer la concentración total de NO. En la figura 5.6 se muestra el esquema típico de un analizador de quimioluminiscencia. Esta técnica es muy sensible y puede detectar concentraciones hasta de 10^{-3} ppm de NO_x (Pundir, 2007).

Según la normativa americana 40CFR 1065, los analizadores de este tipo para poder ser usados como parte de un PEMS deben cumplir las especificaciones técnicas mínimas referidas en la tabla 4.2 y debe pasar la verificación de linealidad (40CFR 1065.307). Adicionalmente estos equipos de medida deben cumplir la verificación de interferencia en la medida por presencia de CO_2 y H_2O (40CFR 1065.370), debido a que estos gases absorben energía del dióxido de nitrógeno excitado (NO_2^*) reduciendo la emisión de fotones y por lo tanto interfiriendo de forma negativa en la medida de NO . Para corregir este efecto es posible utilizar algoritmos de corrección basados en la concentración de estas dos sustancias. (FR, 2005b).

Debido a que este sistema únicamente mide la concentración de NO , como se indicó anteriormente, es necesario utilizar un conversor interno o externo $\text{NO}_2\text{-NO}$. Este conversor debe ser verificado según el procedimiento indicado en la norma 40CFR 1065.378, de tal forma que la eficiencia de conversión no sea menor del 95%.

Un factor importante que afecta la medida de NO_x , no sólo en los analizadores de quimioluminiscencia, es la humedad presente en el gas de escape, debido a que el vapor de agua condensado puede retener NO_2 , por lo tanto, para prevenir la condensación dentro del analizador CLD, es necesario colocar un enfriador/condensador aguas abajo del conversor $\text{NO}_2\text{-NO}$ o en caso contrario hacer la verificación de retención máxima del 5% de NO_2 en el enfriador según el procedimiento establecido en el numeral 40CFR 1065.376.

Analizador Ultravioleta no dispersivo (NDUV)

Esta tecnología de medida también es recomendada por la normativa americana (40CFR 1065.272) para la medida de NO_x en continuo o por acumulación en bolsa tanto en muestra directa como en muestra diluida. Los analizadores de este tipo para ser usados en equipos portátiles deben cumplir mínimo las especificaciones técnicas presentadas en la tabla 4.2 y debe pasar la verificación de linealidad 40CFR 1065.307.

Esta tecnología hace parte de los métodos espectroscópicos y es similar al usado en la técnica NDIR (infrarrojos no dispersivos), pero aplicando luz ultravioleta en lugar en luz infrarroja. Los métodos espectroscópicos se basan la ley de Beer-Lambert, que establece el grado de absorción de radiación cuando esta atraviesa un gas con una composición determinada, de acuerdo a la expresión siguiente:

$$I = e^{-\chi \cdot l \cdot k} \quad (5-7)$$

Donde: I es la intensidad de la radiación, k el coeficiente de absorción, l la longitud entre la fuente y el receptor y χ la concentración del gas a medir.

Las medida de NO_x usando analizadores tipo NDUV, experimenta interferencia positiva con los hidrocarburos quemados (HC) y con la humedad, debido a que estos gases experimentan una absorción similar al NO y NO_2 , se suele hacer uso de un algoritmo de compensación con base en la medida de concentración de HC y H_2O . Esta

interferencia no debe ser superior al $\pm 2\%$ de la concentración media esperada según la normativa y se mide de acuerdo al procedimiento establecido en la 40CFR 1065.372.

Es posible utilizar un analizador doble NO/NO₂, o sólo uno para la medida de NO. En el último caso es necesario utilizar un conversor NO₂-NO aguas arriba, que debe ser verificado de igual forma que en el caso del CLD. Para evitar el efecto de la retención de NO₂ en el condensado, se recomienda hacer el muestreo por medio de una línea calefactada y mantener una alta temperatura en el analizador. Otra alternativa es usar un enfriador/condensador aguas abajo del conversor NO₂-NO o aguas arriba, siempre y cuando se verifique que no hay absorción de NO₂ según la norma 40CFR 1065.376.

Sensor de Zirconio

Esta tecnología actualmente no está recomendada por la normativa americana, pero si estuvo recomendada en la primera versión de normativa sobre equipos portátiles para medida de emisiones promulgada por la Agencia Americana de Protección Ambiental (FR, 2002). Esta tecnología se basa en el uso de un sensor de estado sólido hecho de óxido de zirconio (ZrO₂) y otros materiales cerámicos. Sirve para medir las concentraciones de hasta 1000 ppm de NO_x y de oxígeno, por lo que es ampliamente utilizado para la medida de la relación aire/combustible de los gases de escape. Comparando la medida de estos sensores con respecto a los equipos de referencia (CLD), estos sensores tienen una exactitud del 4% en la medida de NO_x. (Shade, 2000). Estos sensores requieren una temperatura de funcionamiento alta, por lo que hace necesario instalarlos muy cerca del motor o utilizar un sistema de calentamiento interno. En contraposición, este tipo de sensores cuenta con una larga tradición de fiabilidad y durabilidad en especial para la medida del oxígeno, así mismo tienen la ventaja de tener una muy rápida respuesta y no requieren sistemas de toma de muestras, puesto que se sitúan directamente en el tubo de escape del motor.

Estos sensores hacen parte de los denominados analizadores electrocatalíticos, que sirven para medir las concentraciones de oxígeno basados en el flujo de electrones que se genera a través de un electrolito catalítico de óxido de zirconio sólido (ZrO₂). El ZrO₂ permite la transferencia de iones de O₂ cuando se calienta a unos 700 °C. Una corriente eléctrica se genera si el electrolito se coloca entre los gases de dos concentraciones diferentes de O₂. Los sensores de O₂ de este tipo son ampliamente usados en la industria del motor para el control de la relación aire-combustible. Este principio también se utiliza para medir las concentraciones de NO, CO y HC. Para medir NO se elimina primero el O₂ de la muestra haciéndola pasar a través de un electrolito de ZrO₂ recubierto con platino para catalizar el proceso de transferencia y luego, en la segunda cavidad, se provoca la disociación del NO en N₂ y O₂. La muestra pasa entonces a una segunda cavidad donde el O₂ producido en el proceso de disociación del NO se mide a su paso a través de un segundo electrolito catalítico, similar al primero. En este caso es necesario suministrar corriente eléctrica a los electrolitos, porque el oxígeno se transfiere en la dirección opuesta al flujo que sería inducido por el gradiente de concentración. En la Figura 5-7 se muestra de forma esquemática el funcionamiento de este sensor.

Figura 5-7: Esquema de un sensor de NO_x de óxido de zirconio (Adaptado de Shade, 2000)

Algunas desventajas de estos sensores son: por un lado, la interferencia negativa del CO y HC que se oxidan a alta temperatura en presencia de oxígeno, consumiendo parte del O_2 generado en la disociación del NO, afectando por lo tanto la medida de NO. Razón por la cual este tipo de sensores no se puede utilizar para la medida de NO_x en motores de encendido provocado, donde las cantidades de HC y CO emitido son muy altas. De hecho, se utiliza un tipo similar de sensor para medir las emisiones de CO y HC mediante la oxidación de los gases con un hilo de platino calentado. Estos sensores se conocen como sensores de oxidación catalítica o pellistores (Gautam et al, 2004).

En la normativa americana de equipos portátiles de medida de emisiones del 2002, en la que se recomendaba esta tecnología (40CFR 1065.940 - FR, 2002), se estableció las especificaciones técnicas que estos sensores deben cumplir, como son: Exactitud y precisión del $\pm 2\%$ en estado estacionario en condiciones de laboratorio; tiempo de respuesta al 90% menor a 1 segundo, después de un cambio concentración mayor al 80% de rango máximo de medida. La normativa establece adicionalmente que estos sensores deben ser calibrados en cero y span todos los días.

5.2.2 Efecto de las condiciones de temperatura y humedad ambiente sobre las emisiones de NO_x

Desde comienzos de los años 1970, se demostró que las emisiones de NO_x en los motores de combustión interna se ven afectadas por las condiciones termodinámicas del aire de admisión (Dodge, et al, 2003). Desde entonces, se ha buscado cuantificar la influencia de la temperatura y de la humedad del aire de admisión con el fin de poder comparar las emisiones de NO_x de diferentes motores, operando en sitios diferentes y con diferentes condiciones ambientales. En un esfuerzo por permitir estas comparaciones, se desarrollaron varios factores de corrección empíricos en base a ensayos experimentales, que dependen del tipo de motor. Entre los que se tienen:

Normativa 40CFR 1065

La norma 40CFR 1065.670-1 recomienda usar de manera general, en los casos donde no se especifica otra expresión empírica, la ecuación (5-8) y (5-9) (40CFR1065.670-1), donde k_{NO_x} es el factor de corrección de NO_x , $\chi_{\text{NO}_x\text{cor}}$ es la fracción molar o

concentración volumétrica de NO_x corregida y $\chi_{\text{NO}_x \text{uncor}}$ es la fracción molar de NO_x sin corregir.

$$\chi_{\text{NO}_x \text{cor}} = k_{\text{NO}_x} \cdot \chi_{\text{NO}_x \text{uncor}} \quad (5-8)$$

$$k_{\text{NO}_x} = 9,953 \cdot \chi_{\text{H}_2\text{O}} + 0,832 \quad (5-9)$$

Existen tablas y cartas psicrométricas, que permiten calcular el contenido de humedad absoluto (g/kg de aire seco) y por lo tanto la fracción molar de agua en el aire, en base a la medida de la temperatura de bulbo húmedo y bulbo seco o en base a la medida de la humedad relativa y temperatura ambiente, como la presentada en la Figura 5-8. Sin embargo, para la realización de cálculos sistemáticos se usan expresiones numéricas empíricas, como las incluidas en esta misma normativa 40CFR1065.

Figura 5-8: Carta psicrométrica. Adaptado de (Miranda, 1996).

La fracción molar o concentración de vapor de agua en el aire de admisión ($\chi_{\text{H}_2\text{O}}$) se calcula con base a la humedad relativa $RH\%$ y la presión estática absoluta del punto de medida de la humedad, en este caso se considera la presión atmosférica (P_{atm}) y la presión parcial del vapor de agua $P_{\text{H}_2\text{O}}$, como se muestra en la ecuación (5-10) (40CFR1065.645-4). La concentración de agua en el aire en condiciones muy extremas 35°C y 100% de humedad puede llegar a ser del orden del 15%, pero en condiciones normales (25°C y 30%HR) no sobrepasa el 1% en volumen.

$$\chi_{\text{H}_2\text{O}} = \frac{RH\% \cdot P_{\text{H}_2\text{O}}}{P_{\text{atm}}} \quad (5-10)$$

Por su parte, la presión parcial del vapor de agua ($P_{\text{H}_2\text{O}}$ en kPa) se determina por medio de la ecuación (5-11) (40CFR1065.645-2), siendo igual a la presión de saturación del vapor de agua a la temperatura ambiente (T_{amb} en kelvin).

$$-\log_{10}(P_{H_2O}) = 9,09685 \left(\frac{273,16}{T_{amb}} - 1 \right) + 3,56654 \cdot \log_{10} \left(\frac{273,16}{T_{amb}} \right) + 0,87682 \cdot \left(\frac{257,75}{T_{amb}} - 1 \right) + 0,21386 \quad (5-11)$$

De esta forma, teniendo en cuenta el contenido de humedad, la composición del aire se puede representar de forma estequiométrica como se muestra en la ecuación (5-12). Haciendo uso de la definición de la fracción molar, el coeficiente estequiométrico del vapor de agua en el aire (n) se puede calcular como se muestra en la ecuación (5-13), dependiendo únicamente de la fracción molar de agua en el aire (n).

$$\text{Aire}_{\text{húmedo}} = \text{O}_2 + 3,773 \text{ N}_2 + n \text{ H}_2\text{O} \quad (5-12)$$

$$n = \frac{4,773 \chi_{H_2O}}{1 - \chi_{H_2O}} \quad (5-13)$$

Adicionalmente, el contenido de humedad absoluto (H_a en g/kg de aire seco), se puede calcular con base en el peso molecular del agua (M_{H_2O} en g/mol) y el peso molecular del oxígeno y del nitrógeno (M_{O_2} y M_{N_2} en kg/mol).

$$H_a = \frac{n M_{H_2O}}{M_{O_2} + 3,773 M_{N_2}} \quad (5-14)$$

Normativa ISO 1683:2002

Por su parte, las especificaciones ISO, recomiendan una expresión diferente para motores de encendido por compresión que para los motores de encendido provocado, ecuaciones (5-15) y (5-16) respectivamente, donde T_a y H_a son la temperatura del aire de admisión en Kelvin y la humedad contenida en el aire de admisión en g de agua por kg de aire seco, que se puede calcular usando la ecuación (5-14).

$$k_{NOx} = \frac{1}{1 - 0,0182 (H_a - 10,71) + 0,0045 (T_{amb} - 298)} \quad (5-15)$$

$$k_{NOx} = 0,6272 + 44,03 \times 10^{-3} \cdot H_a - 0,862 \times 10^{-3} \cdot H_a^2 \quad (5-16)$$

Otras relaciones empíricas

SAE (Society of Automotive Engineers) publicó la primera expresión empírica para motores de encendido por compresión en 1973 (Krause et al, 1973) en donde se incluye el efecto de la temperatura y de la humedad en función del dosado absoluto (m_F/m_A), referidos a condiciones estándar de 85°F (29.4°C) y 75 grains/lb (10.71 g/kg) de contenido de humedad en el aire de admisión. Las ecuaciones (5-17) y (5-18) muestran la expresión presentada por Krause et al (1973) rescritas en unidades internacionales. En donde la temperatura ambiente T_{amb} está dada en kelvin y en humedad contenida en el

aire de admisión H_a está dada g de agua por kg de aire seco, calculada según ecuación (5-14).

$$k_{NOx} = \frac{1}{1 + A'(H_a - 10,71) + B' \cdot (T_{amb} - 302,55)} \quad (5-17)$$

$$A' = 0,308 \cdot (m_F/m_A) - 0,0266 \quad \text{y} \quad B' = -0,2088 \cdot (m_F/m_A) + 0,00954 \quad (5-18)$$

Esta expresión estuvo incluida en la norma SAE J177 y SAE J1003 hasta el año 2002, porque en esta fecha se consideró que no era necesaria, sin embargo la EPA aún la incluye para los motores diésel estacionarios en la norma 40CFR parte 89.

Krause et al (1973) también presentó una expresión más general que no está en función del dosado, reescrita en unidades internacionales se muestra como ecuación (5-19).

$$k_{NOx} = \frac{1}{1 - 1,01512(H_a - 10,71) + 0,001368 \cdot (T_{amb} - 302,55)} \quad (5-19)$$

Fritz (1999), por su parte, desarrolló un estudio con motores diésel más recientes (1998-1999) usados en camiones y en general en Heavy-duty engines (HDE) que tienen enfriamiento intermedio de tipo aire/aire. La expresión desarrollada por Fritz (1999), en unidades internacionales, se muestra en la ecuación (5-20).

$$k_{NOx} = \frac{1}{1 - 0,018708(H_a - 10,71) + 0,00446 \cdot (T_{amb} - 298,15)} \quad (5-20)$$

Los efectos de la temperatura y humedad en turismos diésel, fue investigado por Hare y Bradow (Hare & Bradow, 1977). Este estudio fue realizado en motores diésel de precámara y de aspiración natural. La expresión empírica por ellos desarrollada sólo incluye el efecto de la humedad, como se puede observar en la ecuación (5-21), expresión dada también en unidades internacionales, de igual manera que las ecuaciones anteriores.

$$k_{NOx} = \frac{1}{1 - 0,0152(H_a - 10,71)} \quad (5-21)$$

Con respecto a los motores de encendido provocado, la EPA, en varias de sus normas (40CFR§86.144-94 para vehículos ligeros de gasolina modelos 1977 y posteriores, 40CFR §86.1342-90 para ensayos transitorios de vehículos ligeros de gasolina, 40CFR §90.419 para pequeños motores de gasolina no de carretera por debajo de 19 kW, 40CFR §91.419 para motores marinos de gasolina y 40CFR §1051.501 para vehículos no de autopista incluyendo cuatriciclos y motos de nieve), establece como factor de corrección de NO_x la expresión empírica desarrollada por Manos et al (1972) y recogida en la ecuación (5-22), donde la humedad contenida en el aire de admisión H_a está dada g de agua por kg de aire seco, que se puede calcular según ecuación (5-14).

$$k_{NO_x} = \frac{1}{1 - 0,0329(H_a - 10,71)} \quad (5-22)$$

Adicionalmente, hay otras varias expresiones empíricas en la bibliografía para la corrección de NO_x en motores de encendido provocado, recogidas en un informe final de Southwest Research Institute (SwRI) (Gingrich et al, 2003).

A manera de comparación, se muestra en la Figura 5-9 dos gráficas en donde se representan gráficamente el factor de corrección de NO_x (k_{NO_x}) para motores diésel una con respecto a la temperatura ambiental y otra con respecto a la humedad relativa. En estas gráficas se observa una gran similitud entre los valores del factor de corrección de NO_x para condiciones alrededor de 25°C y humedad relativa por debajo de 40%, pero a menores temperaturas y mayores porcentajes de humedad relativa, las diferencias son muy significativas.

Figura 5-9: Comparación entre las expresiones empíricas para corregir las emisiones de NO_x en motores diésel por efecto de la humedad y temperatura. A) Gráfica en función de la temperatura ambiental. B) Gráfica en función de la humedad relativa

Adicionalmente, en la Figura 5-10, se grafican las concentraciones de NO_x de un ensayo real realizado con un turismo diésel de 1800 cm^3 , corregidas de acuerdo con 3 de las expresiones empíricas presentadas con anterioridad. Para este ensayo, escogido por haber sido realizado en condiciones extremas de calor en la ciudad de Madrid (33°C y 24% HR), el factor de corrección promedio de acuerdo a la expresión desarrollada para turismos diésel ecuación (5-21) es de 1,176, el factor promedio de acuerdo a la expresión (5-9) que se contempla de carácter general por la normativa 40CFR1065, es de 1,149, mientras que el factor de corrección promedio de acuerdo a la expresión contemplada en la norma ISO, ecuación (5-15), es de 1,164. Esto muestra que para condiciones extremas en Madrid, el factor de corrección de NO_x , puede significar un aumento de

casi un 20% en el valor de concentración de NO_x , con discrepancia entre los diferentes factores de corrección de menos de un 3%.

Figura 5-10: Comparación entre diferentes factores de corrección de NO_x aplicados a un ensayo real. Renault Laguna modelo 2005. 28/07/09 (33°C y 24% HR)

Por lo anterior, debido a las discrepancias encontradas entre las diferentes expresiones empíricas, a la dependencia del tipo de motor, tamaño y también a que el objetivo del MIVECO-PEMS es configurarse como una herramienta de investigación y no de certificación, no se usará ninguna de estas relaciones empíricas para corregir las emisiones de NO_x , por lo que los resultados de las mediciones obtenidas con el MIVECO-PEMS, serán las realmente emitidas por el motor. Esto permitirá realizar estudios sobre el efecto de las condiciones ambientales sobre las emisiones. De todas formas, en caso de ser necesario, se utilizaría la expresión recomendada por la normativa 40CFR para el tipo de motor que se esté analizando o la correspondiente en la normativa europea referente a medida con equipos PEMS, cuando esta sea aprobada y entre en vigor.

5.2.3 Equipos de medida de concentración de NO_x en el MIVECO-PEMS

Como se comentó en el subcapítulo 1.3, en el año 2002 se desarrollaron los primeros equipos embarcados de medida de emisiones en el laboratorio de motores térmicos de la Escuela de Ingenieros Industriales de la UPM, dentro del proyecto “Consumo de carburante y emisiones contaminantes de los vehículos en tráfico real”, financiado por la Fundación Instituto Tecnológico de Seguridad del Automóvil (FITSA). En esta oportunidad se desarrollaron dos equipos de medida de emisiones embarcados, uno de tecnología sencilla y bajo coste que se utilizaron para ensayos en un Peugeot 205 y otro de tecnología más avanzada, instalados en un Nissan Terrano II con motor diesel.

En el primer equipo de medida de emisiones se utilizó un analizador de 5 gases Automotive Microbench tipo ITV con tecnología NDIR de marca Sensors. En cuanto a la medida de NO_x , este equipo tenía la desventaja de un elevado tiempo de respuesta y de una baja exactitud y precisión en la medida, a pesar de que tenía la ventaja de ser muy liviano y tener un tamaño muy reducido ideal para su aplicación en equipos embarcados.

En el segundo equipo embarcado de medida de emisiones desarrollado, se utilizó un analizador CLD de marca Sensors. El uso de este equipo presentó serios inconvenientes

debidos a la aparatosidad de su instalación e integración en el sistema, pues este equipo además de ser voluminoso y pesado (ver Tabla 5.3), requiere para su funcionamiento una bomba bypass, una bomba de vacío, muestreo por línea calefactada y aporte continuo de oxígeno para el ozonizador (Margenat, 2010), que no es adecuado para un equipo portátil.

A raíz de los inconvenientes encontrados en el desarrollo de estos equipos preliminares, para el equipo MIVECO-PEMS se decidió buscar en el mercado nacional un analizador de NO_x que pudiera ser utilizado para hacer parte del equipo portátil. Sólo se encontraron 3 equipos, el Horiba MEXA 720 NO_x , el Sensors AGM 400 y el Horiba EXSA-240CL, cuyas características técnicas se pueden observar en la Tabla 5.3.

Desafortunadamente, Horiba no vende de forma separada los analizadores individuales que integran el OBS-2200 y por lo tanto el analizador HCLD que vende Horiba (EXSA-240CL) es un analizador de laboratorio para medida en mezcla diluida por acumulación en bolsa con un tiempo de respuesta al 90% de 30 s, que lo hace inadecuado para la medida instantánea de concentración, además de que es un equipo voluminoso y pesado que no es adecuado para hacer parte de un equipo portátil de medida de emisiones. Por su parte Sensors si vende por separado el analizador de NO/NO_2 que hace parte del equipo SEMTECH, con el inconveniente de que viene como componente y sin una adecuada interfaz de comunicación y sin salidas análogas, por lo que se hace necesario realizar un arduo trabajo para su integración en el equipo MIVECO-PEMS. Por el tamaño, dimensiones y tiempo de respuesta, el equipo más adecuado es el MEXA 720 NO_x de Horiba, aunque con el grave inconveniente de que no lo recomienda la normativa americana actual (FR, 2005b) y únicamente puede ser utilizado en motores de encendido por compresión, pues necesita oxígeno para su funcionamiento.

Tabla 5.3 Comparación de analizadores de NO_x disponibles en el mercado español.

\ Equipo:	SENSORS	SIGNAL	HORIBA	HORIBA	SENSORS	HORIBA
Característica:	5 gas Microbench	4000 MV	OBS-2200	MEXA 720 NO_x	AGM 400 Series	EXSA-240CL
Tecnología	NDIR (medido como NO)	CLD - fotomultiplicador refrigerado	HCLD	Zirconia ceramic sensor	NDUV	hot CLD
Rango	0 - 5000 ppm	0-10,000 ppm	0-100 hasta 0-3,000 ppm	0-3000 ppm	0-100 ppm hasta 0-10000 ppm	0-2500 ppm
Voltaje de alimentación	5 VCD $\pm 0,25$ V	230/115V, 50..60Hz	20 - 30 V DC	12 - 30 V DC	10 - 30 VCD	230/115V, 50..60Hz
Consumo de potencia eléctrica	15 W	200 W		50 W	5 W	250 VA
Señal de salida	Digital RS-232, 9600 Baud rate	0-10 Vdc; 4-20 mA		0 to 5 VDC (2)	Digital RS-232, 9600 hasta 19600 Baud rate	0 - 1V
Límite de detección	0 - 5000 ppm	4-10000 ppm				hasta 2500 ppm
tiempo de respuesta	T90: 3,5 s	T90: 1,5 s	T90: 1,6 s	T63: 0,7 s	< 1 s	T90:30 s
Dimensiones (WxHxD) mm	156 x 97 x 64	483 x 222 x 490	--	130x75x200	170 x 100 x 420	310x200x311
Peso kg	0,65 kg	35 kg	--	1 kg	3,7 kg	11 kg
Observaciones		Requiere embarcar O2		Sólo motores diesel		
Precio € (año 2007)				11.072 €	5.500 €	18.000 €

A pesar de que ninguno de los otros dos equipos disponibles, el AGM 400 de Sensors y el MEXA 720 NO_x de Horiba, cumple en conjunto todos los requerimientos de tamaño, peso, tiempo de respuesta, facilidad para ser integrado en el equipo MIVECO-PEMS y recomendaciones de la normativa americana, se optó por adquirir los dos equipos y comenzar por la integración del MEXA 720 para motores diésel y posteriormente realizar la integración del equipo AGM 400 de Sensors, pues requiere de un mayor trabajo de integración. En la Figura 5-11 se muestra la fotografía de los dos analizadores utilizados.

Figura 5-11: Analizadores NO_x. a) Horiba MEXA 720 NO_x. b) Sensors AGM 400

5.2.4 Resultado de las pruebas de prestaciones de los analizadores NO_x que integran el MIVECO-PEMS.

Analizador Horiba MEXA 720 NO_x

La prueba del tiempo de respuesta de este analizador se hizo de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 5.1.1 y según el esquema presentado en la Figura 5-4. Se utilizó gas de calibración NO+NO₂ en base nitrógeno y aire. Como se indicó en ese apartado, los resultados de esta prueba no tienen total validez, porque el cambio de concentración no es realmente un escalón, de todas formas ha permitido tener un valor de referencia y conocer el comportamiento de este analizador ante cambios de concentración.

En la Figura 5-12 se observa la respuesta escalón normalizada en la medida de NO_x del analizador Horiba. Se observa que es un sistema de orden superior, con cierta distorsión en la señal tanto de subida como de bajada (overshoot & undershoot), causado porque, según se explicó en el subapartado 5.2.1, este sensor para su funcionamiento requiere oxígeno y los escalones de concentración de NO_x van acompañados también de un escalón en la concentración de O₂, por lo que se suman estos dos efectos que en condiciones normales no ocurren simultáneamente. De todas formas, con el fin de tener un valor de referencia para la sincronización de las señales se determinó, con respecto a esta respuesta escalón, los valores de tiempo de retardo (t_{rel}), tiempo de respuesta (t_r), tiempo de subida (t_{10-90}) y tiempo de bajada (t_{90-10}), según se relaciona en la Tabla 5.4.

 Figura 5-12: Respuesta escalón MEXA 720 NO_x

 Tabla 5.4 Parámetros de respuesta dinámica analizador de NO_x MEXA 720.

t_{ret}	t_{rs}	t_{10-90}	t_{90-10}
(s)	(s)	(s)	(s)
0,8	5,7	6,9	7,4

En cuanto a la exactitud, repetibilidad y ruido, la prueba no se realizó utilizando gas de calibración debido a que, de esta forma, es necesario utilizar la unidad de calibración del equipo, que consta de un borboteador con agua, en el cual se inyecta el gas de calibración y/o el gas cero para humidificarlo. En la unidad de calibración, la instalación del sensor no es igual a la que tiene en funcionamiento normal, que está en contacto directo con el flujo de gas, y por lo tanto, los resultados, que se puedan extraer de esta forma no son del todo válidos. Razón por la cual se utilizaron los resultados de los ensayos realizados en el banco de rodillo del INSIA, con base en el procedimiento de cálculo establecido en la norma americana y expuesto en el apartado 5.1.2.

 Tabla 5.5 Ruido del MEXA 720 NO_x.

$ruido = 2 \cdot rms_{\sigma}$	$VPE (ppm)$	% ruido	% ruido máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,0085	400	0,002%	1%	Si

Ruido: Para la determinación del ruido se tomaron en cuenta 10 intervalos de tiempo de 30 segundos del comienzo de cada uno de los ensayos realizados en el banco del motor, puesto que todos los ensayos comienzan con el motor apagado y los conductos del gas de escape suficientemente aireados. No se utiliza gas cero, porque como se dijo anteriormente no es realmente válida la medida a través del borboteador. Aplicando la ecuación (5-4), se obtuvo los resultados de la Tabla 5.5.

Exactitud: La exactitud se ha calculado de forma similar a la que propone la norma, eligiendo intervalos de tiempo de 30 segundos, en donde el valor de referencia, durante el intervalo de tiempo, se mantiene más o menos constante ($\sigma_{ref} < 4ppm$). Para cada intervalo se ha calculado los valores medios de medida del instrumento a probar y el de referencia ($\bar{y}_{ref_i}$ y $\bar{y}_i$).

La determinación de la exactitud se ha realizado con base en los ensayos de validación realizada en el banco de rodillos del INSIA (Tabla 5.1). Específicamente se ha elegido el ensayo 1133 (régimen constante, varios puntos), porque incluye 13 puntos de funcionamiento del motor mantenidos por espacio de mínimo 1 minuto e involucra un amplio rango de valores de concentración de NO_x , como se puede observar en la Figura 5-13. Este ensayo incluye periodos de ralentí, periodos en cada una de las marchas y a diferentes velocidades llegando incluso a más de 100 km/h en 3ª, 4ª y 5ª marcha. Este ensayo tiene una duración total de 19,7 minutos e incluye un total de 11800 valores instantáneos con cada uno de los equipos con una frecuencia de muestreo de 10 Hz.

Para el cálculo de la exactitud, se escogieron 13 intervalos de 30 segundos, como se puede observar en la Figura 5-13. Al considerar valores de referencia diferentes para cada uno de los intervalos, la exactitud se calcula de acuerdo a la ecuación (5-23). Es importante anotar que los valores de referencia considerados, corresponden a los valores reales medidos por el equipo OBS-2200, antes de ser corregidos por efecto de la temperatura ambiente y la humedad relativa según se comentó en el apartado 5.2.2.

Figura 5-13: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida NO_x ensayo de validación 1133.

$$\text{Exactitud} = \frac{\sum_{i=1}^n |\bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i}|}{n} \quad (5-23)$$

Donde $\bar{y}_{ref-i}$ es el valor de concentración medio medido con el equipo de referencia para cada uno de los intervalos de medida y $\bar{y}_i$ es el valor medio medido con el equipo MIVECO-PEMS. Siendo de esta forma, la exactitud igual al promedio del valor absoluto del error entre la medida promedio del equipo a evaluar y la medida promedio del equipo de referencia. Los resultados se muestran en la Tabla 5.6, donde VA , es el valor medio de referencia máximo, que en este caso es igual a 420 ppm.

Tabla 5.6 Exactitud del MEXA 720 NO_x .

Exactitud = $\frac{\sum_{i=1}^{13} \bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i} }{13}$	VA (ppm)	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
16,6	420	4,0%	4%	Si

A pesar de que los resultados de exactitud son aceptables, se observa en la Figura 5-13 unas diferencias significativas en valores por debajo de los 150 ppm, por lo tanto, se analizó si esto era debido a un problema de calibración o a un problema de falta de linealidad. Para esta verificación se utilizaron todos los datos instantáneos medidos en los 6 ensayos de validación (62112 puntos que corresponden a 104 minutos de ensayo) y se graficó la relación entre la medida del MIVECO-PEMS frente a la medida del OBS, como se puede observar en la Figura 5-14. En esta figura se observa que la regresión de segundo orden ajusta un poco mejor ($R^2=0,9944$) que la lineal ($R^2=0,993$), pero la diferencia es mínima, por lo cual se puede concluir que hay buena linealidad en las medidas, pero hay un problema de calibración, debido muy probablemente a que se utilizaron gases de calibración diferentes para los dos equipos. Este problema fue detectado en el Proyecto Europeo sobre Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones: Proyecto “EU-PEMS” que se comentó en el apartado 2.5.1 y en donde se especificó que se debe tener mucho cuidado con la calibración y la verificación de ambos sistemas y que por lo tanto la calibración tanto del PEMS como del sistema de referencia se debe hacer con el mismo gas de calibración (Bonnel, 2006).

Figura 5-14: Comparación entre medidas instantáneas de NO_x . MIVECO-PEMS (MEXA 720 NO_x) & OBS-2200.

El resultado de la regresión lineal se muestra en la ecuación (5-24), en donde se obtuvo un coeficiente de correlación igual a 0,993. Donde $[\text{NO}_{x-\text{OBS}}]$, corresponde a la concentración de NO_x medido con el equipo de referencia OBS-2200 del INSIA y $[\text{NO}_{x-\text{MIVECO}}]$, corresponde a la concentración de NO_x medido con el equipo Mexa 720 NO_x , que conforma el equipo MIVECO-PEMS.

$$[\text{NO}_{x-\text{OBS}}] = 21,583 + 0,9539 * [\text{NO}_{x-\text{MIVECO}}] \quad (5-24)$$

Debido a que este problema de calibración se puede corregir haciendo una nueva calibración de los equipos, o si el problema persistiera, porque el equipo no diera un mejor ajuste, se podría hacer un reajuste de calibración por software, utilizando en este caso la ecuación (5-24).

Por lo tanto, para verificar la exactitud del equipo, una vez corregido el problema de calibración, aplicando la ecuación de ajuste (5-24), se volvió a calcular los valores medios de referencia y los valores medios del MIVECO-PEMS en los mismos 13 intervalos de

tiempo antes utilizados, como se observa en la Figura 5-15, cuyos resultados se muestran en la Tabla 5.7.

Figura 5-15: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida de NO_x con base en las medidas MIVECO-PEMS corregidas.

Tabla 5.7 Exactitud corregida del MEXA 720 NO_x .

Exactitud = $\frac{\sum_{i=1}^{13} \bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i} }{13}$	VA (ppm)	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
4,55	420	1,1%	4%	Si

En este caso se observa que, una vez se garantiza la correcta calibración de los equipos, físicamente o a través de función de corrección generada a partir de datos en continuo con un equipo de referencia certificado, la exactitud del MEXA 720 NO_x mejora sustancialmente.

Repetibilidad: La repetibilidad, como su nombre lo indica, mide el grado de dispersión de los errores obtenidos entre distintas medidas realizadas de un mismo punto. En nuestro caso, no se dispone de varias medidas sobre un mismo punto, sino que son varias medidas en diferentes puntos de operación, por lo que este concepto no tendría sentido calcularlo con base a los datos de que se disponen. No obstante, se ha considerado que también tiene sentido hablar de repetibilidad, en el sentido de que es un complemento de la exactitud, indicando si los errores esperables, que en media tienen un valor conocido (exactitud), están muy dispersos o por el contrario son precisos.

Por lo tanto, para evaluar la repetibilidad de las medidas, se tomaron directamente los valores de concentración corregidos según la ecuación (5-24), eliminando así el problema de calibración (Figura 5-15). Se calculó la repetibilidad según la norma 40CFR 1065.305, ecuación (5-3) y los resultados se relacionan en la Tabla 5.8.

En la Tabla 5.8, se observa de que a pesar de corregir el problema de calibración, las medidas del MEXA 720 NO_x , en comparación con el OBS-2200, tienen una repetibilidad no muy buena, lo cual demuestra que puede haber algún problema de histéresis del sensor o simplemente debido a la influencia del HC y CO en los gases de escape, como se indicó en el apartado 5.2.1.

Tabla 5.8 Repetibilidad del MEXA 720 NO_x (medidas corregidas)

Repetibili dad = $2\sigma_\varepsilon$	VA (ppm)	Repetibilidad (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
12,24	420	2,9%	2%	No

Precisión: La precisión, aunque es un parámetro que no se especifica en la normativa americana 40CFR 1065 y que está muy relacionado con la repetibilidad, es un concepto especial que se ha considerado importante tratar. En el caso de medidas en continuo, la repetibilidad se diferencia de la precisión, ya que la repetibilidad, como se explicó anteriormente, mide el grado de desviación de los errores entre varias medidas, pero con la precisión, se busca medir la desviación de los errores instantáneos en un intervalo de tiempo determinado, indicando de algún modo la capacidad del equipo de seguir el comportamiento transitorio de la señal, aunque esté afectado por una falta de exactitud y de repetibilidad, cuantificadas anteriormente.

Como se observa en la Figura 5-16, la variable medida puede no ser del todo constante y por lo tanto el valor de referencia tiene un valor medio y una desviación estándar ($\bar{y}_{ref-i}$ y σ_{ref-i}), así como los valores medidos con el equipo en prueba (en este caso MIVECO-PEMS) tienen también un valor medio y una desviación ($\bar{y}_i$ y σ_i). La exactitud está relacionada con el error medio (ε_i), calculado como la diferencia entre el valor medio de la referencia y el valor medio del equipo en prueba ($\varepsilon_i = \bar{y}_{ref-i} - \bar{y}_i$) en el mismo intervalo de tiempo, siendo la exactitud el promedio de los errores de las i medidas realizadas. Adicionalmente, la repetibilidad mide la desviación entre los i errores medios (ε_i) de acuerdo a la ecuación (5-3) que propone la norma americana.

Figura 5-16: Detalle de medida instantánea para cálculo de precisión. Comparación MIVECO-PEMS con el equipo OBS-2200. Corresponde a medida real de NO_x (ppm) del intervalo 2 (I₂) ensayo 1133.

Pero, la precisión en un intervalo de tiempo i , a diferencia de las anteriores, mide la dispersión de los errores instantáneos (ε_j), calculada como 2 veces la desviación estándar de estos errores instantáneos, de acuerdo a la ecuación (5-25). Y la precisión

media, se calcula como el promedio de los n valores de precisión de cada intervalo i de tiempo evaluado, como se observa en la ecuación (5-26).

$$\text{Precisión}_i = 2 * \sigma_{\varepsilon-j} \quad (5-25)$$

$$\text{Precisión} = \frac{\sum_{i=1}^n (2 * \sigma_{\varepsilon-j})_i}{n} \quad (5-26)$$

La precisión para este caso se calcula, al igual que la repetibilidad, con base en las medidas de NO_x corregidas y los resultados se relacionan en la Tabla 5.9

Tabla 5.9 Precisión del MEXA 720 NO_x .

$\text{Precisión} = \frac{\sum_{i=1}^n (2 * \sigma_{\varepsilon-j})_i}{n}$	$VA \text{ (ppm)}$	Precisión (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J (ref)	Valoración
1,83	420	0,4%	2%	Buena

5.2.5 Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de NO_x

Con respecto a la medida de NO_x con el MEXA 720 NO_x , el problema más importante que se ha detectado es la necesidad de garantizar la adecuada calibración del analizador. Debido posiblemente a que la calibración se realiza a través del borboteador y no es igual a como funciona el sensor en condiciones normales. Se recomienda utilizar el mismo gas de calibración que el equipo de referencia y especialmente se recomienda que el equipo se verifique y/o recalibre con base en medidas instantánea tomadas en serie con los dos equipos (equipo de referencia y equipo a ensayar) abarcando un amplio rango de concentraciones, mínimo hasta el 80% del valor máximo que se puede presentar en condiciones reales de funcionamiento de los motores a medir.

Una vez garantizada la correcta calibración del equipo, el ruido y la exactitud son buenas y están dentro del rango que establece la norma. No así con la repetibilidad, que aunque es sólo un poco mayor que lo que especifica la norma refleja algún tipo de histéresis que sufre el sensor o la influencia negativa del HC y CO en los gases, por lo cual convendría revisar periódicamente este parámetro, por si la posible histéresis pueda reflejar de algún modo un paulatino deterioro o ensuciamiento del sensor.

Por otro lado, es importante tener en cuenta que los valores medidos de respuesta dinámica (tiempo de subida y tiempo de bajada) del sensor no son reales, por la imposibilidad de generar un verdadero escalón de concentración. Sin embargo, debido a que la precisión de la medida ha sido menor del 0,5%, se refleja que el sensor de NO_x sí es capaz de detectar los cambios instantáneos de concentración y por lo tanto se puede asegurar que la respuesta dinámica del equipo es adecuada para los cambios instantáneos de concentración que se presentan en motores de combustión interna de vehículos (incluso turismo) en condiciones normales de funcionamiento.

5.3 Medida de concentración de CO

5.3.1 Tecnologías de medida de concentración de CO

En cuanto a la medida de CO, la tecnología más utilizada actualmente y que propone como única alternativa la normativa americana 40CFR 1065 es la de medida por absorción de infrarrojos no dispersivos (NDIR), aunque existen algunas otras tecnologías, por ejemplo el sensor de zirconio expuesto en el apartado 5.2.1 para la medida de concentración de CO.

Analizador Infrarrojo no dispersivo (NDIR)

Esta tecnología de medida es recomendada por la normativa americana (40CFR 1065.250) para la medida de CO y CO₂ en continuo o por acumulación en bolsa tanto en muestra directa como en muestra diluida. Los analizadores de este tipo para ser usados en equipos portátiles deben cumplir mínimo las especificaciones técnicas presentadas en la Tabla 4.2 y deben pasar la verificación de linealidad 40CFR 1065.307.

Esta tecnología forma parte de los métodos espectroscópicos y es similar al Analizador Ultravioleta no dispersivo (NDUV) explicado en el apartado 5.2.1. La diferencia es que esta tecnología utiliza luz infrarroja en lugar de luz ultravioleta.

Esta técnica de medida tiene el problema de la interferencia de algunas especies que absorben energía infrarroja en la misma longitud de onda (Pundir, 2007). En el caso de la medida de CO y CO₂, el contenido de humedad en el gas a medir interferir en la medida, debido a que el agua tiene líneas de absorción en el espectro IR, como se observa en la Figura 5-17. Por esta razón normalmente se usa un enfriador/condensador para eliminar la humedad de los gases de escape antes de entrar al analizador NDIR. En la medida de CO, adicionalmente interfiere el CO₂ y por lo tanto se debe utilizar algoritmos de corrección, con base en el contenido de este gas. La magnitud de la interferencia en la medida de CO, según la EPA, son del orden de 3,5% de agua por 7 ppm de CO y 10% de CO₂ por 10 ppm de CO, para analizadores con rango de medida entre 1500 y 3000 ppm; para analizadores con rango de medida entre 0 y 100 ppm, la relación de interferencia es mayor: 3,5% de agua por 25 ppm de CO y 10% de CO₂ por 50 ppm de CO (EPA, EMTIC TM-010). Por lo tanto la Normativa Americana 40CFR 1065, establece que estas interferencias, una vez corregidas, en conjunto no deben representar más del $\pm 2\%$ de la concentración media esperada según la normativa y se mide de acuerdo al procedimiento establecido en la 40CFR 1065.350 y 1065.355.

Según esta normativa, las verificaciones de interferencia se pueden omitir, si se demuestra que esta interferencia no representa una variación de más de un $\pm 0,5\%$ en el valor de emisión específica (en g/kW-h) (FR, 2005b), y se pueden también utilizar analizadores que no pasen esta verificación, siempre y cuando, se haya tratado de corregir este efecto y se demuestre que este problema no afecta la habilidad del PEMS para realizar la certificación de las emisiones de los motores.

Figura 5-17: Espectro Infrarrojo del agua. Adaptado de (Bonuccelli, 2006)

Es de anotar que la interferencia del vapor de agua es de dos tipos: la superposición espectral y la interacción molecular. La superposición espectral es generalmente conocida como interferencia en cero, que puede ser observada como una medida errónea cuando se mide nitrógeno saturado de humedad en los analizadores NDIR de CO y CO₂. Por su parte, la interacción molecular, también llamada interferencia en el punto de calibración, puede ser descrita por un modelo de transición de niveles de energía causado por la absorción de luz que es influenciada por la presencia simultánea de otros gases (Nakamura et al, 2002).

Con el fin de evitar el uso del enfriador/condensador en los equipos portátiles de medida de emisiones, que permite reducir espacio, peso y consumo energético, se desarrolló la tecnología h-NDIR, la cual es capaz de medir CO y CO₂ en gases húmedos, por medio de algoritmos que permiten corregir el problema de interferencia antes explicado. Esta tecnología se basa en realizar el muestreo con línea calefactada y hacer pasar el gas a través de una cámara también calefactada, con el fin de realizar la medida de concentración directamente en base húmeda. Un analizador típico h-NDIR consta de una fuente de luz infrarroja, una cámara calefactada, un interruptor óptico, filtros de luz y detectores para CO₂, CO, H₂O y referencia, como se puede observar en la Figura 5-18.

Figura 5-18: Configuración de un h-NDIR. Adaptado de (Nakamura et al, 2002)

5.3.2 Equipo de medida de concentración de CO en el MIVECO-PEMS

En anteriores trabajos del GMT, se utilizó un analizador dual CO/CO₂ NDIR de marca Signal que demostró ser la alternativa tecnológica más robusta, fiable y fácil de implementar en los sistemas de medida embarcable por su sencillez y bajo coste relativo. El principal problema encontrado con el analizador NDIR fue la sensibilidad a la temperatura alcanzada por el detector, que depende fuertemente de la temperatura del habitáculo, por lo que se recomendó monitorear esta temperatura (Margenat, 2010). Otro de los problemas detectados fue el volumen y el peso del equipo, debido a que este analizador requería el uso de un enfriador Peltier para eliminar la humedad de los gases muestreados.

Para el desarrollo del MIVECO-PEMS, se optó por conservar el analizador CO/CO₂ 9000 MGA de marca Signal utilizado con anterioridad, cuyas características técnicas están relacionadas en la Tabla 4.1, pero se optó por no utilizar el enfriador Peltier para reducir volumen y peso. Esta decisión fue adoptada a pesar de conocer la interferencia de la humedad sobre la medida de CO y CO₂ en los sistemas NDIR, debido a la poca importancia en la resolución de la medida de CO que ha declarado la EPA, una vez que las emisiones reales de CO en los motores están varios órdenes de magnitud por debajo de los límites establecidos por la normativa NTE (Fiest et al, 2008) y por los bajos niveles de interferencia del contenido de humedad según la EPA y relacionados en la página anterior (EPA, EMTIC TM-010).

5.3.3 Resultado de las pruebas de prestaciones del analizador de CO que integra el MIVECO-PEMS.

La prueba del tiempo de respuesta de este analizador se hizo de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 5.1.1 y según el esquema presentado en la Figura 5-3. Se utilizó gas de calibración CO/CO₂/C₃H₈ en base nitrógeno y aire inyectado a través de una bomba de vacío. Es de anotar que la medida de la respuesta dinámica de este analizador se realizó utilizando la longitud total de la línea de muestreo utilizada en el MIVECO-PEMS.

En la Figura 5-19 se observan las respuestas escalón normalizadas en la medida de CO. Se observa que este sistema es sobre amortiguado y tiene un prolongado tiempo de retardo, valor de referencia utilizado para la sincronización de las señales. Los resultados de tiempo de retardo (t_{rel}), tiempo de respuesta (t_r), tiempo de subida (t_{10-90}) y tiempo de bajada (t_{90-10}) para la medida del CO se relacionan en la Tabla 5.10. Donde se observa que los tiempos de subida y bajada están por encima de lo que propone la normativa americana 40CFR 1065.

En cuanto a la exactitud, repetibilidad y ruido, la prueba se realizó de igual forma que con el analizador MEXA 720 NO_x, utilizando los resultados de los ensayos realizados en el banco de rodillo del INSIA, en donde se midió de forma simultánea con el equipo OBS-2200 de Horiba como equipo de referencia. El procedimiento de cálculo se ha

ajustado a la norma americana, expuesto en el apartado 5.1.2 y a las adaptaciones realizadas en el apartado 5.2.4.

Figura 5-19: Respuesta dinámica medida de CO, analizador Signal 9000 MGA.

Tabla 5.10 Parámetros de la respuesta dinámica medida de CO, analizador Signal 9000 MGA.

t_{ret}	t_{rs}	t_{10-90}	t_{90-10}
(s)	(s)	(s)	(s)
9,1	8,3	10,3	10,8

En estas pruebas se evidenció un problema en la medida de CO en el equipo de referencia, como se puede observar en la Figura 5-20, Figura 5-21, Figura 5-22, Figura 5-23, Figura 5-24 y Figura 5-25, que representa las medidas de CO tomadas de forma simultánea con el equipo MIVECO-PEMS y por el equipo de referencia Horiba OBS-2200 en cada uno de los 6 ensayos de validación realizados en el banco de rodillos del INSIA y que están relacionados en la Tabla 5.1. Es de anotar que estos ensayos se realizaron de forma consecutiva en un mismo día de prueba y el equipo MIVECO-PEMS sólo se calibró una vez antes de los ensayos, mientras que el equipo OBS-2200 fue calibrado al comienzo de cada ensayo, menos en el quinto (Figura 5-24).

Figura 5-20: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1046.

Figura 5-21: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1106.

En el ensayo 1046 (Figura 5-20), que corresponde a la primera prueba en punto muerto, se observa gran similitud en las medidas de los dos equipos, lo mismo también en los primeros 800 segundos del ensayo 1106. Pero en la parte final del ensayo 1106 (Figura 5-21) se observan diferencias importantes entre los dos equipos de medida.

Figura 5-22: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1133.

En el ensayo 1133 (Figura 5-22), se observa, prácticamente desde el comienzo del ensayo, una creciente diferencia entre la medida del equipo de referencia y la del MIVECO-PEMS, aunque se observa similitud en la forma. Mientras que en el ensayo 1203 (Figura 5-23) y en el 1231 (Figura 5-24), se observa una diferencia más o menos constante entre el equipo de referencia y el MIVECO-PEMS. Es de anotar que el ensayo 1133 corresponde a un ciclo NEDC, al igual que el ensayo 1106 (Figura 5-21). Estos ensayos se realizaron en las mismas condiciones de temperatura del motor.

Por último en el ensayo 1321 (Figura 5-25), se observa de nuevo una gran similitud en las medidas del equipo MIVECO-PEMS y el OBS-2200, aunque a partir del segundo 900 se vuelve a observar cierta diferencia.

Figura 5-23: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1203.

Figura 5-24: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1231.

Figura 5-25: Comparación medida de concentración de CO, ensayo 1321.

Los resultados de los 6 ensayos demuestran que las diferencias observadas entre las medidas del equipo MIVECO-PEMS y el OBS-2200 son debidas a un problema de la medida del equipo de referencia. La falta de repetibilidad visual observada en la medida del equipo OBS-2200 en los ensayos de ciclo Europa (ensayo 1203-Figura 5-23, ensayo 1106-Figura 5-21 y ensayo 1321-Figura 5-25) ponen de manifiesto un problema de pérdida de calibración del analizador de CO del OBS-2200, problema que tiene que ver con la pérdida del cero, quizás debido a un problema de calentamiento o a la contaminación de la señal de referencia.

Debido a este problema encontrado con el equipo de referencia, el cálculo de ruido, exactitud, repetibilidad y precisión se realizará con base en los tramos de medida donde se observa que el equipo OBS-2200 está midiendo correctamente.

Ruido: Para la determinación del ruido se tomaron en cuenta 8 intervalos de tiempo de 30 segundos del comienzo de cada uno de los ensayos realizados en el banco del motor, puesto que todos los ensayos comienzan con el motor apagado y los conductos del gas de escape suficientemente aireados. Aplicando la ecuación (5-4), se obtuvo los resultados de la Tabla 5.11.

Tabla 5.11 Ruido del analizador CO MIVECO-PEMS (Signal 9000 MGA).

$ruido = 2 \cdot rms_{\sigma}$	VPE (ppm)	% ruido	% ruido máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,6741	400	0,17%	1%	Si

Exactitud: Para el cálculo de la exactitud se eligieron 10 intervalos de tiempo de 30 segundos, procedentes únicamente del ensayo 1046 (Figura 5-20) por ser el único ensayo en donde no se ha observado el problema de la pérdida de la referencia (cero) que antes se comento. Los intervalos se eligieron en donde el valor de referencia en media, durante el intervalo de tiempo, se mantiene más o menos constante ($\sigma_{ref} < 13ppm$).

Como se puede observar en la Figura 5-26, el equipo de referencia, adicionalmente, tiene un problema de baja resolución de su conversor digital/análogo, por lo que esta medida es de muy baja calidad para el rango que se está utilizando.

Figura 5-26: Detalle de un intervalo de medida instantánea de CO para cálculo de exactitud, repetibilidad y precisión. Ensayo de validación 1046.

De todas formas, se ha calculado la exactitud de acuerdo a la ecuación (5-23), de igual forma que se hizo para el caso del NO_x (apartado 5.2.4), calculando para cada intervalo los valores medios de medida del analizador MIVECO-PEMS y el de referencia OBS-2200 ($\bar{y}_{ref-i}$ y $\bar{y}_i$). Los resultados se muestran en la Tabla 5.12, donde V_A , es el valor medio de referencia máximo, que en este caso es igual a 374 ppm. Se observa que la

exactitud del equipo MIVECO-PEMS está dentro de los límites que establece la normativa americana 40CFR 1065J.

Tabla 5.12 Exactitud del analizador CO MIVECO-PEMS (Signal 9000 MGA).

Exactitud = $\frac{\sum_{i=1}^{13} \bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i} }{13}$	VA (ppm)	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
5,8	374	1,5%	4%	Si

Es de anotar que el equipo MIVECO-PEMS no tiene ningún sistema (algoritmo o equipamiento) para corregir la influencia de la humedad en la medida del analizador NDIR, a diferencia del equipo OBS-2200 que si lo tiene. A pesar de que sería conveniente repetir estos ensayos en condiciones de humedad ambiente extrema, se puede concluir que de cara a la exactitud en la medida de CO, por lo menos en motores diésel, no se ve necesario la condensación del vapor de agua, pudiéndose medir directamente en mezcla húmeda y por lo tanto, tampoco es necesario implementar algoritmos de corrección.

Repetibilidad: El concepto de repetibilidad se trabajo de igual manera que la expuesta en el caso de la medida de NO_x (apartado 5.2.4) y por lo tanto, para evaluar la repetibilidad de las medidas, se tomaron los mismos datos utilizados para el cálculo de la exactitud. Aplicando la ecuación (5-3) que propone la normativa 40CFR 1065, se obtienen los resultados relacionados en la Tabla 5.13.

En la Tabla 5.13, se observa un bajo valor de repetibilidad, debido, muy probablemente, al la falta de resolución en la medida del equipo de referencia, más que a un problema real de repetibilidad del analizador CO Signal, y por lo tanto este valor no se considera válido.

Tabla 5.13 Repetibilidad del analizador CO MIVECO-PEMS (Signal 9000 MGA).

Repetibili dad = $2\sigma_{\varepsilon}$	VA (ppm)	Repetibilidad (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
13,48	374	3,6%	2%	No

Precisión: La precisión, en este caso no se calcula, debido a que la resolución del equipo de referencia es mucho menor que la del analizador MIVECO-PEMS y por lo tanto, no tiene sentido hacer una comparación en la medida instantánea.

5.3.4 Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de CO

En cuanto a la medida de CO el equipo MIVECO-PEMS ha demostrado una adecuada calidad de ruido, exactitud, resolución, además de que se constata que la calibración se conserva durante toda la jornada de ensayos. No así el equipo de referencia en el que se

observa un problema de pérdida de valor de referencia, muy probablemente presente sólo en esta unidad.

Adicionalmente, en el equipo de referencia OBS-2200 se observa un problema de falta de resolución del conversor digital/análogo, detectado también por la EPA en el analizador CO del equipo SEMTECH DS (Proyecto sobre determinación de errores de medida de factores de emisión usando PEMS para el programa de control de emisiones de motores pesados en uso (Heavy-Duty In-Use Testing – HDIUT), presentado en el apartado 2.5.4). Sin embargo, la falta de exactitud a bajos niveles de concentración no se consideró un problema, porque los niveles de emisión de CO en los motores actuales, que cuentan con catalizadores adecuados, están en varios órdenes de magnitud por debajo de los niveles que establece la normativa americana (Fierst et al, 2008).

Como se dijo anteriormente, a pesar de que no se hicieron ensayos en condiciones de humedad ambiente extrema, se observa que de cara a la exactitud en la medida de CO, por lo menos en motores diésel, no se ve necesario la condensación previa del vapor de agua para eliminar el problema de la interferencia del H₂O en la medida del equipo NDIR, pudiéndose medir directamente en mezcla húmeda y por lo tanto, tampoco es necesario implementar algoritmos de corrección. Adicionalmente, como se mencionó en el párrafo anterior, el nivel de exactitud de estos equipos actualmente no es un problema de relevancia (Fierst et al, 2008).

5.4 Medida de concentración de CO₂ y relación aire/combustible

La medida de CO₂ está directamente relacionada con la relación aire/combustible, dado que la cantidad emitida de CO₂ en los gases de escape depende del consumo de combustible en el proceso de combustión que se lleva a cabo en el interior de los cilindros del motor. Estos dos factores, consumo y CO₂, están relacionados por medio de la estequiometría de la combustión cuyo parámetro de control es la relación aire/combustible, llamado también factor lambda (λ). Razón por la cual en este subcapítulo se une el estudio de estos dos factores: la medida de concentración de CO₂ con la medida de la relación aire/combustible.

5.4.1 Relación entre concentración de CO₂ y relación aire/combustible.

La reacción de combustión de cualquier hidrocarburo, expresado químicamente como C_aH_bO_c, se formula de forma general, tanto para mezclas estequiométricas, ricas o pobres, como se muestra en la ecuación no balanceada (5-27).

Donde se expresa que como productos de la combustión de un hidrocarburo cualquiera (C_aH_bO_c) con aire (O₂+3,773N₂), se pueden encontrar principalmente dióxido de

carbono (CO_2), agua (H_2O), nitrógeno (N_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), oxígeno (O_2), combustible inquemado (llamado HC - C_aH_b) y óxidos de nitrógeno (NO_x). También es posible encontrar en los gases de combustión trazas de otras especies menores, como el dióxido de azufre (SO_2) o compuestos de plomo, causado por la presencia de aditivos o impurezas en el combustible.

El nitrógeno no participa activamente en la combustión, pero al ser parte integrante del aire (casi un 80% en volumen) es necesario tenerlo en cuenta. No obstante, la presencia de nitrógeno en la combustión tiene un efecto colateral negativo, como se explicó en apartado 3.1, por la formación de óxidos de nitrógeno (NO_x), ya que estos se forman por la oxidación parcial del nitrógeno en los puntos de máxima temperatura de combustión.

En un proceso de combustión completa, todos los elementos tienden al mayor estado de oxidación, por lo que la relación entre la composición de los reactantes (combustible y aire) y la composición de los gases de escape depende únicamente del principio de conservación de masa de cada uno de los elementos químicos que actúa en la reacción. Razón por lo cual la relación entre reactantes y productos queda definida sólo con la composición elemental del combustible y la relación aire/combustible que interviene en la reacción.

Influencia de la humedad del aire

En un proceso de combustión con aire atmosférico, el aire contiene humedad, que a pesar de no intervenir en la reacción de combustión si afecta en la estequiometría de la reacción y afecta la formación de emisiones como se comentó anteriormente en el apartado 5.2.2. Con respecto a la estequiometría de la reacción, la humedad contenida en el aire afecta en la medida en que afecta la fracción molar de los productos de la combustión. En la ecuación (5-28) se incluye el término correspondiente a la humedad contenida en el aire $n \cdot \text{H}_2\text{O}$, donde el coeficiente estequiométrico n depende de la temperatura y del contenido de humedad del aire, que se puede calcular usando las ecuaciones (5-10), (5-11), (5-12) y (5-13), presentadas anteriormente en el apartado 5.2.2.

Mezcla estequiométrica

En condiciones de mezcla estequiométrica (donde únicamente interviene en la reacción la cantidad de aire suficiente para que todo el combustible entre en combustión), los gases de escape están formados únicamente por dióxido de carbono (CO_2), agua (H_2O) y nitrógeno (N_2), como se expresa en la ecuación balanceada (5-29).

Y así, en mezcla estequiométrica la relación aire/combustible (m_A/m_F) depende únicamente de la composición del combustible (a : contenido de carbono, b : contenido de hidrógeno y c : contenido de oxígeno) y del contenido de humedad del aire de admisión (expresado en términos de n), como se muestra en la ecuación (5-30).

$$(m_A / m_F)_S = \frac{\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) (M_{O_2} + 3,773 M_{N_2} + n M_{H_2O})}{a \cdot M_C + b \cdot M_H + c \cdot M_O} \quad (5-30)$$

En donde M_{O_2} es el peso molecular del oxígeno, M_{N_2} el del nitrógeno, M_{H_2O} el del vapor de agua y M_C , M_H y M_O el del carbono, hidrógeno y oxígeno respectivamente.

Mezcla pobre

Para el caso de mezclas que no son estequiométricas, se define el factor lambda (λ) como la relación aire/combustible relativa, que es igual a la relación másica entre el aire y el combustible real utilizado en la reacción de combustión (m_A/m_F)_{real} y el factor aire/combustible estequiométrico (m_A/m_F)_S, como se expresa en la ecuación (5-31) (Heywood, 1988).

$$\lambda \equiv \frac{(m_A / m_F)_{real}}{(m_A / m_F)_S} \quad (5-31)$$

De esta forma, la reacción de combustión completa en mezcla pobre (con exceso de aire) se puede expresar en términos del factor lambda (λ), como se muestra en la ecuación balanceada (5-32).

Por lo tanto, en el caso de combustión completa con exceso de aire, la concentración de las diferentes especies en los gases de escape (o fracción molar χ_i), queda determinada exclusivamente por la composición del combustible, el contenido de humedad en el aire de combustión y el factor lambda, como se muestra en las ecuaciones (5-33), (5-34), (5-35) y (5-36).

$$\%Vol_{CO_2} = 100 \cdot \chi_{CO_2} = 100 \frac{a}{\frac{b}{4} + \lambda(4,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + \frac{c}{2}} \quad (5-33)$$

$$\%Vol_{H_2O} = 100 \cdot \chi_{H_2O} = 100 \frac{\frac{b}{2} + \lambda n \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right)}{\frac{b}{4} + \lambda(4,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + \frac{c}{2}} \quad (5-34)$$

$$\%Vol_{O_2} = 100 \cdot \chi_{O_2} = 100 \frac{(\lambda - 1) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right)}{\frac{b}{4} + \lambda(4,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + \frac{c}{2}} \quad (5-35)$$

$$\%Vol_{N_2} = 100 \cdot \chi_{N_2} = 100 \frac{3,773\lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right)}{\frac{b}{4} + \lambda(4,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + \frac{c}{2}} \quad (5-36)$$

De manera general y para efectos de balance de masas y cálculo de consumo de combustible y de emisión total de CO₂ (teniendo en cuenta que el CO termina de oxidarse en la atmósfera), las ecuaciones (5-33), (5-34), (5-35) y (5-36) son válidas para el cálculo de la concentración de las especies principales y por lo tanto se utilizan para el cálculo del consumo de combustible con base en la relación aire/combustible que se mide en tiempo real y la composición química del combustible que es conocida.

Es importante, adicionalmente, ver que la ecuación (5-32) es muy útil, porque permite no sólo predecir la composición de los gases de escape, sino también calcular la relación aire/combustible o el factor lambda (λ) con base en la composición del combustible y al menos la concentración de una cualquiera de las especies mayores presentes en los gases de escape, despejando el factor lambda en cualquiera de las ecuaciones (5-33), (5-34), (5-35) o (5-36).

Es de tener en cuenta que a pesar de que la combustión se realice con exceso de aire, la composición real de los gases de escape no es exactamente la definida en la ecuación de balance (5-32), ni la concentración real de las especies son las definidas en las ecuaciones (5-33), (5-34), (5-35) y (5-36), debido a la formación de emisiones contaminantes causadas por fenómenos químicos asociados a la cinética y al equilibrio químico y a fenómenos físicos.

Según la cinética química, en los procesos de combustión, la temperatura determina la velocidad de oxidación del combustible y por lo tanto, determina la cantidad de combustible que realmente alcanza la combustión completa. Y así, un enfriamiento prematuro de los gases de escape, congela la reacción de oxidación, generando la emisión de monóxido de carbono aún en presencia de oxígeno. Además, según el equilibrio químico, en procesos de combustión a alta temperatura, los productos de la

combustión no son una mezcla sencilla de productos ideales, como sugiere la ecuación estequiométrica (5-29), sino que las especies mayores se disocian formando especies menores (Turns, 2000). Todos estos fenómenos determinan la formación de emisiones contaminantes que se discutió en detalle en el apartado 3.1.

En los motores diésel actuales, donde el proceso de combustión está muy desarrollado y donde se usan adicionalmente catalizadores de oxidación y filtros de partículas (ver apartado 3.2.2) las emisiones de monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno e hidrocarburos inquemados, en concentración son únicamente del orden de las partículas por millón, no obstante influyen en la composición final de los gases de escape, reduciendo la concentración final de CO_2 .

Si se conocen las concentraciones de CO y HC en los gases de escape, es también posible calcular la concentración real de CO_2 , como se muestra en la ecuación (5-37). En motores donde las emisiones de NO_x sean bajas, puede no tenerse en cuenta en las ecuaciones puesto que no afecta el balance del carbono y complicaría mucho las ecuaciones.

$$\begin{aligned} \text{C}_a\text{H}_b\text{O}_c + \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) (\text{O}_2 + 3,773\text{N}_2 + n\text{H}_2\text{O}) \rightarrow d \cdot \text{CO}_2 \\ + \left(e + n\lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \right) \cdot \text{H}_2\text{O} + 3,773 \cdot \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \text{N}_2 + f \cdot \text{CO} + g \cdot \text{O}_2 + h \cdot \text{H}_{b/a}\text{C} \end{aligned} \quad (5-37)$$

Donde los coeficientes estequiométricos d , e , f , g y h , se calculan haciendo balance de masa de cada una de los elementos químicos involucrados y con base en la concentración de las emisiones contaminantes, como se muestra en la siguientes ecuaciones.

$$g = \frac{\left(1 + \frac{b}{2a} \chi_{\text{HC}} \right) \left[2a + \frac{b}{2} - c - 2\lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \right] - \chi_{\text{HC}} \cdot \left(\frac{\chi_{\text{CO}}}{\chi_{\text{HC}}} + 2 + \frac{b}{2a} \right) \left[a + \frac{b}{2} + \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) (3,773 + n) \right]}{\chi_{\text{CO}} + \chi_{\text{HC}} \left(2 - \frac{b}{2a} \right) - 2} \quad (5-38)$$

$$h = \chi_{\text{HC}} \left(\frac{a + \frac{b}{2} + \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) (3,773 + n) + g}{1 + \frac{b}{2a} \chi_{\text{HC}}} \right) \quad (5-39)$$

$$f = b \frac{\chi_{\text{CO}}}{\chi_{\text{HC}}} \quad (5-40)$$

$$e = \frac{b}{2} - \frac{b}{2a} h \quad (5-41)$$

$$d = a - f - b \quad (5-42)$$

De esta manera, usando los coeficientes estequiométricos anteriormente hallados, se puede calcular la concentración real de CO₂ y H₂O en los gases de escape, como se muestra en las ecuaciones (5-43) y (5-44). Es importante observar que las concentraciones de CO₂ definidas en la ecuación (5-43) es en base húmeda, pues incluye la fracción molar del agua en la mezcla.

$$\%Vol_{CO_2} = 100 \cdot \chi_{CO_2} = 100 \frac{d}{a + e + \lambda(3,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + g} \quad (5-43)$$

$$\%Vol_{H_2O} = 100 \cdot \chi_{H_2O} = 100 \frac{e + \lambda n \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right)}{a + e + \lambda(3,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + g} \quad (5-44)$$

Las ecuaciones (5-37) a la (5-44) son de gran importancia, pues se pueden utilizar para calcular la concentración instantánea real de CO₂ y H₂O con base en la relación aire/combustible (factor lambda λ) que se mide en tiempo real como se verá en este mismo capítulo, la composición química del combustible, que es conocida y las concentraciones medidas de HC y CO en los gases de combustión.

Como se puede observar en la ecuación (5-40), si la concentración de HC es cero, el sistema de ecuaciones da una indeterminación, en ese caso el coeficiente estequiométrico $b=0$ y los otros coeficientes estequiométricos de la ecuación (5-37) se calculan conforme a las ecuaciones (5-45), (5-46), (5-47) y (5-48). Continuando válidas las ecuaciones (5-43) y (5-44).

$$g = \frac{c + 2\lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) - 2a - \frac{b}{2} + \chi_{CO} \left[a + \frac{b}{2} + \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) (3,773 + n) \right]}{2 - \chi_{CO}} \quad (5-45)$$

$$d = c + 2\lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) - a - \frac{b}{2} - 2g \quad (5-46)$$

$$f = a - d \quad (5-47)$$

$$e = \frac{b}{2} \quad (5-48)$$

Si se conocen las concentraciones de CO, HC y NO_x en los gases de escape, y si las emisiones de NO_x no son despreciables, hablando en términos de porcentaje en volumen, estas emisiones se deben tener en cuenta en las ecuaciones de balance

considerando el NO_x como monóxido de nitrógeno (NO), puesto que es el óxido de nitrógeno mayoritario, como se expresa en la ecuación (5-49).

El valor de los coeficientes estequiométricos d, e, f, g, h, j y k , se calculan con base en las siguientes ecuaciones.

$$g = \frac{A1 \cdot \left[2a - c - 2\lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + \frac{b}{2} \right] - \chi_{\text{CO}} \cdot A2 \cdot \left[a + \frac{b}{2} + \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) (3,773 + n) \right]}{\chi_{\text{CO}} \cdot A2 - 2 \cdot A1} \quad (5-50)$$

$$A1 = 1 - \frac{\chi_{\text{NO}}}{2} + \frac{b}{2a} \chi_{\text{HC}} \quad (5-51)$$

$$A2 = 1 + \frac{\chi_{\text{HC}}}{\chi_{\text{CO}}} \left(2 + \frac{b}{2a} - \frac{\chi_{\text{NO}}}{\chi_{\text{HC}}} \right) \quad (5-52)$$

$$f = \chi_{\text{CO}} \left(\frac{a + \frac{b}{2} + \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) (3,773 + n) + g}{1 - \frac{\chi_{\text{NO}}}{2} + \frac{b}{2a} \chi_{\text{HC}}} \right) \quad (5-53)$$

$$h = f \frac{\chi_{\text{HC}}}{\chi_{\text{CO}}} \quad (5-54)$$

$$j = h \frac{\chi_{\text{NO}}}{\chi_{\text{HC}}} \quad (5-55)$$

$$k = 3,773\lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) - \frac{j}{2} \quad (5-56)$$

$$e = \frac{b}{2} - \frac{b}{2a} h \quad (5-57)$$

$$d = a - f - h \quad (5-58)$$

Y de esta manera, incluyendo el efecto del NO_x , se puede calcular la concentración real de CO_2 y H_2O en los gases de escape, como se muestra en las ecuaciones (5-59) y (5-60).

$$\%Vol_{CO_2} = 100 \cdot \chi_{CO_2} = 100 \frac{d}{a + e + \lambda n \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + g + j + k} \quad (5-59)$$

$$\%Vol_{H_2O} = 100 \cdot \chi_{H_2O} = 100 \frac{e}{a + e + \lambda n \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + g + j + k} \quad (5-60)$$

Mezcla rica

Para el caso de los motores de encendido provocado, en donde se puede presentar situaciones de mezcla rica (con defecto de aire), la situación es un poco más complicada. En estas condiciones, la composición de los gases de escape, además de contener CO_2 , H_2O y N_2 , tiene todas las especies relacionadas en la ecuación (5-27), incluso oxígeno, aunque en pequeña cantidad (Heywood, 1988). Por esta razón, las ecuaciones de balance de masa de los elementos químicos en la reacción, junto con los valores conocidos de concentración de emisiones (HC, CO y NO_x) en el gas de escape, son insuficientes para determinar las concentraciones de las otras especies.

No obstante, para motores de encendido provocado funcionando con gasolina o isooctano, se podría estimar la composición de los gases de escape, antes del catalizador, con base en las curvas empíricas presentadas en la Figura 5-27 y que están basadas en resultados experimentales de cuatro importantes grupos de investigación. Aún así, debido a que esta composición corresponde al gas de escape sin catalizar, es una relación que no es válida para predecir la concentración de CO_2 en el gas de escape a la salida del tubo de escape de un vehículo actual con catalizador.

Figura 5-27: Composición del gas de escape en motores de encendido provocado. Combustible: gasolina e isooctano H/C entre 2 y 2,25. Adaptado de (Heywood, 1988).

Los catalizadores de tres vías utilizados en los motores de ciclo Otto, como se explicó en el apartado 3.2.2, tienen como finalidad aumentar la velocidad de reacción para que el NO_x , se reduzca en N_2 liberando oxígeno y, por otro lado, los hidrocarburos inquemados y el monóxido de carbono alcancen su máximo grado de oxidación, consumiendo todo el oxígeno que pueda haber en los gases de escape. Por esta razón, se puede asumir que en un motor de encendido provocado con catalizador de tres vías, en los instantes es que está en mezcla rica, los gases de escape no contienen oxígeno libre.

Si se considera una eficiencia del 100% en el catalizador, la composición ideal de los gases de escape a la salida del catalizador estaría definida por la ecuación (5-61).

Donde, los coeficientes estequiométricos e y i , calculados por balance másico de elementos químicos, se muestran en las ecuaciones (5-62) y (5-63).

$$e = c + 2\lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) - 2a \quad (5-62)$$

$$i = \frac{b}{2} - e \quad (5-63)$$

De esta forma la concentración ideal de CO_2 y agua en los gases de escape está dada por las ecuaciones

$$\%Vol_{\text{CO}_2} = 100 \cdot \chi_{\text{CO}_2} = 100 \frac{a}{a + \frac{b}{2} + \lambda(3,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right)} \quad (5-64)$$

$$\%Vol_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \cdot \chi_{\text{H}_2\text{O}} = 100 \frac{e + \lambda(2 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) - 2a}{a + \frac{b}{2} + \lambda(3,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right)} \quad (5-65)$$

Mezcla rica, conociendo las concentraciones de CO, HC y NO_x en los gases de escape. Aunque el NO_x podría ser despreciado, porque como se puede observar en la Figura 3-9, la eficiencia en la reducción del NO_x de un catalizador de tres vías en mezcla rica es casi del 100%, se debe tener en cuenta en el balance de masa de la ecuación (5-66) si se conoce su concentración en los gases de escape. De forma similar a como se comentó para el caso de mezcla pobre, y con mayor razón en mezcla rica donde hay defecto de oxígeno, el NO_x en su gran mayoría está formado por NO y por lo tanto es en esta forma en la que tiene en cuenta.

Por lo tanto, en mezcla rica, si se conocen las concentraciones de CO, HC y NO_x en los gases de escape, también es posible calcular la concentración real de CO₂, con base en el balance de masa realizado sobre la ecuación(5-66).

Donde los coeficientes estequiométricos d, e, f, i, b, j y k , se calculan como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$b = \chi_{HC} \frac{a + \frac{b}{2} + \lambda (3,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right)}{1 - \frac{\chi_{NO}}{2} + \frac{b}{2a} \chi_{HC}} \quad (5-67)$$

$$j = b \frac{\chi_{NO}}{\chi_{HC}} \quad (5-68)$$

$$k = 3,773 \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) - \frac{j}{2} \quad (5-69)$$

$$f = \chi_{CO} \left(a + \frac{b}{2} - \frac{b}{2a} b + n \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + j + k \right) \quad (5-70)$$

$$d = a - f - b \quad (5-71)$$

$$e = c + 2 \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) - 2d - f - j \quad (5-72)$$

$$i = \frac{b}{2} - \frac{b}{2a} b - e \quad (5-73)$$

De esta manera, usando los coeficientes estequiométricos anteriormente hallados, en mezcla rica, se puede calcular la concentración real de CO₂ y H₂O en los gases de escape, como se muestra en las ecuaciones (5-74) y(5-75). Es importante observar, como en el caso de mezcla pobre, que las concentración de CO₂ definidas en la ecuación (5-74) es en base húmeda, pues incluye la fracción molar del agua en la mezcla.

$$\%Vol_{CO_2} = 100 \cdot \chi_{CO_2} = 100 \frac{d}{a + e + n \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + i + j + k} \quad (5-74)$$

$$\%Vol_{H_2O} = 100 \cdot \chi_{H_2O} = 100 \frac{e + n \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right)}{a + e + n \lambda \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) + i + j + k} \quad (5-75)$$

Las ecuaciones (5-66) a la (5-75), por lo tanto, se usan para calcular en mezcla rica la concentración instantánea real de CO₂ y H₂O con base en la relación aire/combustible (factor lambda λ) que se mide en tiempo real, la composición química del combustible, que es conocida y las concentraciones medidas de HC, CO y NO_x en los gases de combustión.

Por último, es importante también caer en cuenta, que en mezcla rica para el cálculo de consumo y de emisiones totales de CO₂ (para cumplimiento de normativa), no se utilizan estas ecuaciones (5-66) a la (5-75), sino las ecuaciones (5-32) y (5-33), a pesar de que en este balance los valores de concentración de O₂ sean negativos. La razón es obvia y es porque al haber defecto de oxígeno no se logra la combustión completa, pero los gases de escape al salir a la atmósfera, terminan su proceso de oxidación, transformándose el CO en CO₂, y por lo tanto la emisión total de CO₂ a la atmósfera es mayor que el valor que se mide en el tubo de escape.

Formula de Brettschneider

Como se ha visto en este apartado, hay una estrecha relación entre la emisión de CO₂ y la relación aire/combustible o factor lambda. Por lo tanto, las ecuaciones presentadas en este apartado, pueden ser utilizadas para calcular la emisión de CO₂ y H₂O con base en la composición del combustible y las concentraciones medidas de CO, NO_x y HC. Pero estas mismas ecuaciones también pueden ser utilizadas para determinar el factor lambda con base en las concentraciones de CO₂, CO, NO_x, HC y O₂ en los gases de escape, reemplazando los coeficientes estequiométricos y despejando lambda de la ecuación (5-74) para mezcla rica (no hay oxígeno) o de la ecuación (5-59) para mezcla pobre (donde hay oxígeno en los gases de escape).

Para mezcla rica, la expresión resultante es:

$$\lambda = \frac{a \left(1 - \frac{\chi_{NO}}{2} + \frac{b}{2a} \chi_{HC} \right) - A1 \left(a + \frac{b}{2} \right)}{(3,773 + n) \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2} \right) \cdot A1} \quad (5-76)$$

Donde A1, está dado por la siguiente ecuación

$$A1 = \chi_{HC} \left[1 + (\chi_{CO} + \chi_{CO2}) \left(\frac{\chi_{NO}}{2\chi_{HC}} - \frac{b}{2a} \right) \right] + (\chi_{CO} + \chi_{CO2}) \left(1 - \frac{\chi_{NO}}{2} - \frac{b}{2a} \chi_{HC} \right) \quad (5-77)$$

Para mezcla pobre, la expresión es mucho más compleja, por lo que se suele usar una expresión simplificada, que es conocida como la **fórmula de Brettscheider**. Esta ecuación está aceptada como método estándar para la determinación de la relación

aire/combustible y fue propuesta por el Dr. Johannes Brettschneider de Robert Bosch en el año 1979 y publicado en Bosch technische Berichte (Vol 6, 1979, No.4). En esta ecuación se asume que la concentración de agua es una fracción de la suma de CO₂ y CO, estableciendo una constante conocida como constante de equilibrio agua/gas y que es del orden de 3,5. De esta forma, la fórmula de Brettscheiner, conservando la notación que se viene trabajando, se muestra en la ecuación (5-78).

$$\lambda = \frac{\chi_{CO_2} + \frac{\chi_{CO}}{2} + \chi_{O_2} + \frac{\chi_{NO}}{2} + \left[\left(\frac{b}{4a} \cdot \frac{3,5}{3,5 + \frac{\chi_{CO}}{\chi_{CO_2}}} \right) - \frac{c}{2a} \right] (\chi_{CO_2} + \chi_{CO})}{\left(1 + \frac{b}{4a} - \frac{c}{2a} \right) (\chi_{CO_2} + \chi_{CO} + \chi_{HC})} \quad (5-78)$$

5.4.2 Tecnologías de medida de concentración de CO₂ y relación aire/combustible

En cuanto a la medida directa de CO₂, la tecnología más utilizada actualmente y que propone como única alternativa la normativa americana 40CFR 1065 es la de medida por absorción de infrarrojos no dispersivos (NDIR), que fue expuesta en el apartado 5.3.1. Y como se mencionó en ese apartado, el problema principal de estos analizadores es la interferencia del contenido de humedad en la medida, porque el agua también absorbe luz en el espectro infrarrojo (Figura 5-17). Por lo anterior, se suele exigir el uso de un deshumidificador de los gases de muestreo de estos analizadores.

También como se explicó en el apartado 5.3.1, actualmente existe una técnica conocida como h-NDIR, la cual es capaz de medir CO y CO₂ en gases húmedos, midiendo la concentración aparente de CO, CO₂ y H₂O en mezcla húmeda y por medio de algoritmos se corrige la interferencia del H₂O, calculando las concentraciones reales de CO y CO₂. (Nakamura et al, 2002).

Con respecto a la medida directa de la relación aire/combustible en términos de factor lambda, definido según la ecuación (5-31), la normativa americana 40CFR 1065.284 recomienda los sensores de oxígeno en el gas de escape conocidas vulgarmente como “sondas lambda”. Estos sensores se denominan comúnmente como “sonda lambda” y son un tipo especial de sensores de zirconio, explicados con anterioridad en el apartado 5.2.1. Una sonda lambda típica se muestra en la Figura 5-29.

Hay dos tipos de sondas lambda: la de dos estados EGO (Exhaust Gas Oxygen sensor) y la universal UEGO (Universal Exhaust Gas Oxygen sensor) .

La sonda lambda de dos estados EGO, tiene una curva de respuesta (ver Figura 5-28) que sólo permite distinguir si la mezcla es rica o pobre y por lo tanto se utiliza para hacer la regulación en los motores de encendido provocado, de tal forma que la combustión sea estequiométrica (relación aire/combustible relativa – lambda = 1). De

esta forma se garantiza que la eficiencia del catalizador de tres vías sea máxima (como se vio en la Figura 3-9) y por lo tanto que las emisiones contaminantes sean mínimas. Otra característica importante es que esta sonda tiene un reducido tiempo de respuesta (entre 100 y 300 s).

Figura 5-28: Curva de respuesta Sonda lambda. a) Dos estados- EGO. b) Proporcional UEGO. Adaptado de (Pundir, 2007).

La temperatura del electrolito del sensor es un parámetro importante que afecta la conductividad de los iones y por lo tanto la respuesta de la sonda. Esta temperatura debe ser superior a 280° C, siendo óptima entre 300° C y 600° C. Por lo tanto, para hacer que la sonda esté operativa desde el mismo momento del arranque, se suele utilizar una resistencia interna para calentamiento, de que se pueden observar esquemáticamente en la Figura 5-29. A este tipo de sondas con calentamiento se les conoce como HEGO (Heated Exhaust Gas Oxygen).

Figura 5-29: Sonda lambda convencional: a) sin calentamiento -EGO. b) con calentamiento HEGO. Adaptado de (Pundir, 2007).

La sonda lambda universal (UEGO), desarrollada por Robert Bosch en 1994, está formada por dos sondas de zirconio, dispuestas de tal modo, que la característica resultante es prácticamente lineal (ver Figura 5-28) y la respuesta bastante rápida (menos de 100 ms). Este tipo de sonda también es conocido como sonda lambda de banda ancha o proporcional, en inglés “broadband λ sensor”.

Como puede verse en la Figura 5-30, existe una celda de bombeo, con dos electrodos y una celda de medición, uno de cuyos electrodos está en contacto con el aire de referencia. Entre las dos celdas se dispone un conducto de difusión, a través del cual se llevan los gases de escape a los electrodos de ambas celdas. En función del dosado detectado en la celda de medición, se aplica una corriente controlada en lazo cerrado a la celda de bombeo, la cual bombea oxígeno al conducto de difusión, de modo que la concentración resultante en el mismo sea siempre correspondiente a $\lambda=1$. El sentido de bombeo depende de si la señal procedente de la celda de medición indica que la mezcla es rica o pobre. Finalmente, un circuito electrónico se encarga de amplificar la intensidad de carga y proporcionar una señal de tensión a la salida del sensor. La curva característica de señal de salida de esta sonda universal se muestra en la Figura 5-28.

Figura 5-30: Estructura de la sonda lambda universal. Adaptado de (Nevot, 2000).

5.4.3 Equipo de medida de concentración de CO₂ y relación aire/combustible (factor λ) en el MIVECO-PEMS

Como se comentó en el apartado 5.3.2, para el desarrollo del MIVECO-PEMS, se optó por conservar el analizador CO/CO₂ 9000 MGA de marca Signal utilizado con anterioridad, cuyas características técnicas están relacionadas en la Tabla 4.1. A pesar de conocer la interferencia de la humedad sobre la medida de CO y CO₂ en los sistemas NDIR, se optó por no utilizar el enfriador Peltier para reducir volumen y peso. Esta decisión fue adoptada, debido a que en el equipo MIVECO-PEMS, se integra adicionalmente un sensor de relación Aire/Combustible para todo tipo de mezcla y combustible, cuya medida es muy fiable. Para la determinación del consumo de combustible y balance de masa general, se usó esta última medida, en lugar de la concentración de CO₂. Por lo que la medida directa de CO₂ se utiliza únicamente de respaldo y para verificación de los resultados obtenidos.

Para la medida directa de la relación aire/combustible (factor λ), el MIVECO-PEMS utiliza el medidor lambda modelo LA4 de marca ETAS. Este es un instrumento de

precisión que permite medir la relación aire/combustible en motores gasolina, diésel y motores de gas, utilizando una sonda lambda universal LSU Bosch. Este instrumento utiliza mapas de consumo específico que le permite convertir el contenido de oxígeno en relación aire/combustible o directamente en factor lambda. El rango de medida del factor lambda es entre 0,7 y 32,8. En la Figura 5-31 se muestra la fotografía del medidor aire/combustible utilizado en el MIVECO-PEMS.

Figura 5-31: Medidor relación aire/combustible MIVECO-PEMS. Lambda Meter LA4 marca ETAS.

5.4.4 Resultado de las pruebas de prestaciones del analizador de CO₂ y del medidor lambda que integra el MIVECO-PEMS.

Resultado de las pruebas de tiempo de respuesta

La prueba del tiempo de respuesta del analizador CO₂ se hizo de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 5.1.1y según el esquema presentado en la Figura 5-3. Se utilizó gas de calibración CO/CO₂/C₃H₈ en base nitrógeno y aire inyectado a través de una bomba de vacío. Es de anotar que la medida de la respuesta dinámica de este analizador se realizó utilizando la longitud total de la línea de muestreo utilizada en el MIVECO-PEMS.

Figura 5-32: Respuesta dinámica medida de CO₂, analizador Signal 9000 MGA.

En la Figura 5-32 se observa la respuesta escalón normalizadas en la medida de CO₂. Se observa que este sistema, al igual que el analizador NDIR de CO es sobre amortiguado y tiene también un prolongado tiempo de retardo, valor de referencia utilizado para la sincronización de las señales. Los resultados de tiempo de retardo (t_{ret}), tiempo de respuesta (t_{rs}), tiempo de subida (t_{10-90}) y tiempo de bajada (t_{90-10}) para la medida del CO₂ se relacionan en la Tabla 5.14. Donde se observa que los tiempos de subida y bajada están por encima de lo que propone la normativa americana 40CFR 1065.

Tabla 5.14 Parámetros de la respuesta dinámica medida de CO₂, analizador Signal 9000 MGA.

t_{ret}	t_{rs}	t_{10-90}	t_{90-10}
(s)	(s)	(s)	(s)
8,4	7,4	9,4	8,9

Por su parte, la prueba del tiempo de respuesta del **medidor lambda** se hizo de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 5.1.1y según el esquema presentado en la Figura 5-4. Por lo tanto, la sonda del equipo ETAS fue sometida a un cambio de concentración de oxígeno, interpretada por la sonda como cambio de relación aire/combustible. En el estado inicial se inyectó aire por medio de la bomba de vacío y durante el cambio de mezcla se inyectó una mezcla de aire + N₂ dentro de una cámara, en este caso la señal escalón real presenta una concentración desconocida y las señales de control solo representan los momentos en los que se pulsó el interruptor. En la Figura 5-35 y en la Tabla 5.15, se muestran los resultados de las pruebas de respuesta dinámica del medidor lambda LA4 marca ETAS.

Figura 5-33: Respuesta dinámica medidor lambda LA4 marca ETAS.

Tabla 5.15 Parámetros de la respuesta dinámica medidor lambda LA4 marca ETAS.

t_{ret}	t_{rs}	t_{10-90}	t_{90-10}
(s)	(s)	(s)	(s)
0,7	0,6	1,0	1,4

Resultado de las pruebas de exactitud, repetibilidad y ruido

De cara a la exactitud de las medidas de CO₂ con el equipo Signal 9000 MGA, es importante resaltar que el proceso de calibración de este equipo se realiza en dos fases. Para todo el proceso de calibración se utiliza una botella de concentración certificada de CO₂, CO, C₃H₈ en Nitrógeno y una botella de Nitrógeno de alta calidad. En la primera fase, la botella de mezcla se conecta directamente en el puerto de calibración “Span” y la botella de nitrógeno al puerto “Zero” y se realiza la calibración según lo establece el fabricante del equipo.

En la segunda fase, se realiza una verificación de la calibración a presión atmosférica y en las condiciones normales de medida del equipo. Para esta verificación se utiliza, como se observa en la Figura 5-34, una bolsa hermética de gas, previamente al vacío, en donde se introduce gas de calibración y en donde se conecta el extremo de la línea de muestreo de gas que se utiliza en los ensayos. Desde esta bolsa y por el puerto de muestreo convencional, se conecta el gas de calibración al analizador y se anota el valor de la concentración que mide el analizador.

Este procedimiento se realiza debido a que la línea de muestreo tiene una longitud considerable e incluye varios accesorios y puesto que funciona en presión negativa (con bomba de vacío aguas arriba del analizador), puede presentar problemas de estanqueidad, resultantes en un menor valor de concentración medida por dilución con aire ambiente. Si la diferencia es mayor del 10%, se revisa la instalación y se verifica la estanqueidad de cada una de las uniones, si es menor, se anota el valor y luego se usa para corregir las medidas de los ensayos.

Figura 5-34: Instalación utilizada para verificación de la calibración del analizador Signal 9000 MGA.

Por lo anterior las medidas corregidas de CO₂ ([CO_{2_MIV_correg1}]), se calculan de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$[CO_{2_MIV_correg1}] = [CO_{2_REF}] / [CO_{2_REF_VERIF}] * [CO_{2_MIV}] \quad (5-79)$$

donde [CO_{2_REF}] es la concentración certificada de la botella de calibración, [CO_{2_REF_VERIF}] es la medida del analizador midiendo gas de calibración desde la bolsa y [CO_{2_MIV}] es la concentración instantánea medida por el analizador.

En cuanto a la exactitud, repetibilidad y ruido, la prueba se realizó de igual forma que con el analizador MEXA 720 NO_x, utilizando los resultados corregidos según la ecuación (5-79), de los ensayos realizados en el banco de rodillo del INSIA, en donde se

PARTE II: Medida de emisiones con equipos embarcados

midio de forma simultánea con el equipo OBS-2200 de Horiba como equipo de referencia. El procedimiento de cálculo se ha ajustado a la norma americana, expuesto en el apartado 5.1.2 y a las adaptaciones realizadas en el apartado 5.2.4. Los resultados de ruido del analizador CO₂ se muestran en la Tabla 5.16.

Tabla 5.16 Ruido en la medida de CO₂, analizador Signal 9000 MGA.

$ruido = 2 \cdot rms_{\sigma}$	VPE (%Vol)	% ruido	% ruido máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,0030	14	0,021%	1%	Si

En la Figura 5-35 se muestra el ensayo 1133, en el que se observa un fuerte problema de precisión en la medida de CO₂ del analizador Signal CO₂ con respecto al analizador CO₂ del OBS-2200 de propiedad del INSIA, resultado que se cuantifica en la Tabla 5.17.

Figura 5-35: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida de CO₂ ensayo de validación 1133. Analizador Signal 9000 MGA.

Tabla 5.17 Precisión en la medida de CO₂, analizador Signal con respecto al OBS-2200 del INSIA.

$Exactitud = \frac{\sum_{i=1}^{13} \bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i} }{13}$	VA (%Vol)	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
1,4	12,2	11,2%	4%	No

Con el fin de conocer la naturaleza del problema de exactitud encontrado, que no es debido a la falta de estanqueidad en las conexiones, pues este efecto se corrigió utilizando la ecuación (5-79), ni es debido al efecto de la interferencia del agua sobre la medida de CO₂ del NDIR, puesto que este efecto hace que se mida por encima del valor real, no por debajo, se hizo un análisis de regresión con base en todos los datos instantáneos (62112 puntos) correspondientes a los 6 ensayos de validación realizados con el OBS-2200 del INSIA (ver Tabla 5.1). La gráfica de este análisis de regresión se muestra en la Figura 5-36.

En la Figura 5-36, se observa que el problema de exactitud entre los dos equipos, es un problema de calibración, igual que el encontrado con el NO_x (ver apartado 5.2.4), aunque también se observa cierta falta de linealidad por encima de 13% de CO₂.

Figura 5-36: Gráfica de comparación datos instantáneos CO₂, analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del INSIA.

Para comprobar estos resultados, se calculó el CO₂ con base en la medida de lambda realizada simultáneamente con el equipo LA4 de marca ETAS, utilizando la ecuación (5-59). La comparación entre las medidas de CO₂ se muestra en la Figura 5-37. En esta gráfica se observa una mayor similitud entre los resultados del CO₂ del equipo MIVECO-PEMS (Signal 9000 MGA) y el CO₂ calculado con base en el factor lambda, aunque en valores altos de CO₂ se observa que hay cierta discrepancia entre los resultados.

Figura 5-37: Gráfica de comparación datos instantáneos CO₂, analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del INSIA. Ensayo de validación 1133.

Los resultados obtenidos en los otros 5 ensayos de validación muestran una tendencia similar a la observada en la Figura 5-37. Resultados que hacen sospechar que el problema de calibración es del equipo OBS del INSIA. Razón por la cual se realizó un ensayo con otro equipo OBS-2200, de propiedad del CIEMAT, el 9 de julio de 2009 en el banco de rodillos de INSIA, midiendo de forma simultánea el OBS-2200 y el MIVECO-PEMS.¹ Los resultados de este ensayo se muestran en la Figura 5-39.

¹ Este ensayo no se ha utilizado de referencia para el análisis de ruido, exactitud y precisión del equipo MIVECO-PEMS, puesto que en aquel momento el MIVECO-PEMS no incluía la medida de la presión del gas de escape para la determinación del caudal y por lo tanto, los resultados máscicos de ese ensayo no son válidos. Este ensayo se realizó midiendo emisiones en un Ciclo Europa (ver Figura 3-13) a un turismo Seat Alhambra modelo 2007, motor diésel de 2000 cm³ Euro 4.

Figura 5-38: Gráfica de comparación datos instantáneos CO_2 , analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del CIEMAT. Ensayo 1215 del 09 de julio-09.

En la Figura 5-38, se observa una gran similitud entre los resultados del CO_2 calculado con base en los valores del factor lambda y las medidas realizadas con el equipo OBS-2200 de propiedad del Ciemat. Esto demuestra que el problema que se evidencia en todos los ensayos de validación realizados con el equipo OBS-2200 del INSIA es debido a un problema en la calibración del analizador de CO_2 de ese equipo en particular.

En la Figura 5-38, también se observa que la medida de CO_2 , realizada con el equipo Signal, presenta una diferencia apreciable comparada con la concentración calculada con base en el factor lambda. Esta diferencia es esperable, debido a la falta de corrección de la interferencia del contenido de agua en los gases de escape, comentado en el apartado 5.3.1 y en el apartado 5.4.2.

Con base en esta observación, se verificó si la diferencia entre la medida del CO_2 del equipo Signal podía ser efectivamente explicada con base en la concentración de agua, razón por la cual se realizó un estudio de regresión múltiple, entre el CO_2 calculado y el CO_2 medido por el equipo Signal, incluyendo el contenido de H_2O calculado según la ecuación (5-60). Para el análisis de regresión múltiple, se incluyeron todos los valores instantáneos correspondientes a los estados pseudo-estacionarios de los 6 ensayos de validación realizados con el OBS-2200 del INSIA (ver Tabla 5.1). El valor de referencia considerado fue la concentración de CO_2 calculada con base en la medida de la relación aire/combustible y no la medida con el equipo OBS-2200 del INSIA porque, como se explicó anteriormente, tiene un problema de calibración, que invalida sus resultados. Los resultados del análisis de regresión lineal, incluyendo la ecuación de ajuste, se muestran en la Figura 5-39.

El alto grado de ajuste de tendencia (99.96%) mostrado en la Figura 5-39, demuestra que efectivamente la diferencia observada entre el CO_2 calculado con base en el factor lambda y el CO_2 medido en mezcla húmeda (sin el uso del deshumidificador) está relacionado con la interacción molecular presente entre el CO_2 y el H_2O que se describió en el apartado 5.3.1.

Es importante resaltar que la ecuación de ajuste de la Figura 5-39, determinada por el análisis de regresión múltiple y reescrita como ecuación (5-80), es la ecuación que permite corregir la concentración de CO_2 medida por el equipo Signal 9000 MGA en

mezcla húmeda, previamente corregida por las fallas de estanqueidad según la ecuación (5-79) .

Gráfica de ajuste de tendencia CO2

Figura 5-39: Gráfica de ajuste de tendencia CO₂ para corrección de efecto del contenido de humedad sobre la medida directa de CO₂ en muestra húmeda del analizador Signal 9000 MGA.

$$[CO_{2_MIV_cal}] = 2,135 * [CO_{2_MIV}] - 1,001 * [CO_{2_MIV}] * [H_2O_MIV_cal]^{0,1} \quad (5-80)$$

Para verificar la validez de la ecuación (5-80), se corrigió la medida de CO₂ del ensayo que se realizó el 9 de julio de 2009 en el banco de rodillos de INSIA con el equipo OBS-2200 del CIEMAT, ensayo que no fue usado para la determinación de esta ecuación de corrección. Los resultados de esta verificación se muestra gráficamente en la Figura 5-40 y en la Figura 5-41, donde se demuestra el alto grado de ajuste de la ecuación (5-80). Es importante anotar que estas medidas también fueron corregidas previamente, de acuerdo a la ecuación (5-79), según el resultado de la verificación de la calibración realizada ese día midiendo el gas de calibración desde la bolsa hermética a presión atmosférica.

En la Figura 5-41, se observa el efecto amortiguador del tiempo de respuesta de los diferentes analizadores. Porque como se puede observar, al ser mayor el tiempo de respuesta del analizador CO₂ 9000 MGA de Signal (7,4 segundos, frente al del medidor lambda que es escasamente de 0,6 segundos - Ver Tabla 5.14 y Tabla 5.15), la medida aunque alcanza la precisión en los estados de funcionamiento pseudo estacionarios, no es capaz de detectar los picos de emisión de CO₂ ni las desaceleraciones fuertes. En el apartado 8.1.4 se cuantifica este efecto negativo de amortiguación de la señal sobre los valores de factor de emisión calculados.

En la Tabla 5.18, Tabla 5.19 y Tabla 5.20, se muestran los resultados de exactitud, repetibilidad y precisión de la medida de CO₂ corregida según la ecuación (5-80), con respecto al CO₂ calculado con base en el factor lambda medido con el equipo de precisión Lambda Meter LA4 de marca ETAS y con base en las concentraciones de CO, HC y NO_x en el gas de escape, utilizando la ecuación (5-59). En estas tablas se observa que el analizador de CO₂ cumple satisfactoriamente los requerimientos de la norma americana.

Figura 5-40: Gráfica de comparación datos instantáneos CO₂ corregidos, analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del CIEMAT. Ensayo 1215 del 9/jul/2009.

Figura 5-41: Detalle de la gráfica de comparación datos instantáneos CO₂ corregidos, analizador Signal 9000 MGA & OBS-2200 del CIEMAT. Ensayo 1215 del 9/jul/2009.

Tabla 5.18 Exactitud en la medida corregida de CO₂ del analizador Signal con respecto al CO₂ calculado con base al factor lambda medido con el LA4 ETAS.

$Exactitud = \frac{\sum_{i=1}^{13} \bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i} }{13}$	$VA \text{ (ppm)}$	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,03	9	0,4%	4%	Si

Tabla 5.19 Repetibilidad en la medida corregida de CO₂ del analizador Signal con respecto al CO₂ calculado con base al factor lambda medido con el LA4 ETAS.

$Repetibilidad = 2\sigma_\varepsilon$	$VA \text{ (ppm)}$	Repetibilidad (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,09	9	1,0%	2%	Si

Tabla 5.20 Precisión en la medida corregida de CO₂ del analizador Signal con respecto al CO₂ calculado con base al factor lambda medido con el LA4 ETAS.

Precisión = $\frac{\sum_{i=1}^n (2 * \sigma_{\varepsilon-j})_i}{n}$	VA (ppm)	Precisión (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J (ref)	Valoración
0,05	9	0,5%	2%	Buena

5.4.5 Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de CO₂

Con base en la experiencia adquirida en la medida de concentración de CO₂, los principales problemas que se encontraron fueron:

- Calibración del equipo: Es muy importante estar seguro que la concentración del gas de calibración utilizado esté certificada y que este valor corresponda al valor de referencia que se le da al equipo al momento de la calibración. También es muy importante, como se anotó en el caso del NO_x, que la botella de gas de calibración utilizada por el equipo de referencia y por el equipo a verificar sea la misma, para evitar el problema de falta de exactitud causada por esta falla de procedimiento.
- Verificar la estanqueidad de las líneas de muestreo. Para garantizar la correcta calibración del analizador, es necesario hacer la verificación de la medida del gas de calibración desde una bolsa hermética a presión atmosférica, utilizando la longitud total y todos los accesorios de unión que se utilizan en la línea de muestreo en condiciones normales de funcionamiento. En caso de que la verificación no de resultados perfectos, se debe verificar la instalación y corregir las fallas de estanqueidad, hasta que la diferencia no sea mayor del 10%. Y el resultado final se esta verificación se debe utilizar para corregir las medidas realizadas con esta calibración haciendo uso de la ecuación (5-79). Esta verificación permite también corregir o eliminar el efecto de la presión de la línea de muestreo en la medida del analizador.
- A pesar de que en todo el desarrollo ecuacional realizado en el apartado 5.4.1, se incluye el efecto de la humedad ambiente, esta humedad se puede despreciar, pues aún en un caso muy extremo (aire ambiente a 35°C y 100% de humedad) llega a representar del orden de 1 ppmV en los gases de escape, por lo que sin mayor problema se puede despreciar el término de humedad ambiente.
- Por el contrario, la influencia del contenido de humedad en los gases de escape para la medida de CO₂ con el equipo NDIR, se debe tener en cuenta, pues afecta la exactitud de forma considerable en condiciones de alta carga del motor (más del 12% en concentraciones de CO₂ del 10% en volumen). Para corregir esta influencia es necesario eliminar la humedad en los gases muestreados antes de entrar al analizador o medir directa o indirectamente el contenido de agua para corregir su efecto mediante algún algoritmo de corrección, como el presentado en la ecuación (5-80).

- De cara al balance de masa y cálculo de consumo, considero que es mucho más fiable, más exacta, repetitiva y precisa la medida de CO₂ de forma indirecta, calculada con base en la medida directa de la relación aire/combustible, que la medida directa utilizando un analizador NDIR. Adicionalmente si se usa un instrumento de precisión como el Lambda Meter LA4 de ETAS, se reduce de forma importante el espacio, el peso del equipo embarcado y el consumo eléctrico asociado.

5.5 Medida de concentración de HC

Las emisiones de hidrocarburos inquemados (HC), como se comentó en el apartado 3.1, son cadenas carbonadas que se originan por la combustión incompleta del combustible causada por falta de oxígeno o por el apagado de llama en las paredes de la cámara de combustión o en los pequeños resquicios que se forman.

Los hidrocarburos inquemados (HC o THC) se dividen en dos categorías: metano (CH₄) e hidrocarburos distintos del metano (nonmethane hydrocarbons NMHC). Esta división se hace debido a que el metano no es tóxico pero es uno de los gases de efecto invernadero más importantes y que contribuye fuertemente al fenómeno de calentamiento global, mientras que los otros compuestos orgánicos volátiles (hidrocarburos inquemados) principalmente tienen efectos nocivos sobre la salud y la calidad de aire, aunque también contribuyen de manera secundaria al calentamiento global a través de su papel en la creación de ozono y en la prolongación de la vida del metano en la atmósfera. Dentro de los NMHC, los compuestos aromáticos de benceno, tolueno y el xileno son cancerígenos y puede conducir a la leucemia a través de una exposición prolongada (Tovalín & Stranberg, 2007). También el 1,3-butadieno es un compuesto peligroso que se asocia a menudo con usos industriales (Pundir, 2007).

Debido a la diferencia de efecto entre el metano y los otros hidrocarburos inquemados, las normativas de emisiones en los vehículos de carretera, regulan algunas veces las emisiones de hidrocarburos inquemados totales (THC o simplemente HC), otras veces las emisiones de hidrocarburos distintos del metano (NMHC) o incluso se imponen límites distintos para estas dos emisiones, como por ejemplo en el caso de la normativa europea para los motores a gasolina de turismos Euro 5 y Euro 6 (Tabla 3.3) o para los motores pesados diésel y de gas Euro III, Euro IV, Euro V y Euro VI.

5.5.1 Tecnologías de medida de concentración de HC

En cuanto a la medida de la concentración total de hidrocarburos inquemados en los gases de escape, la mayor parte de las normativas del sector de los motores industriales y de automoción recomiendan únicamente la ionización de llama (Flame Ionization Detector: FID), mientras que para la medida de la concentración de metano recomienda la cromatografía de gases y el uso de un “nonmethane cutter”, que oxida todos los hidrocarburos diferentes al metano, permitiendo la medición de la concentración de metano con un analizador de ionización de llama convencional (Pundir, 2007).

Por otro lado, la medida de HC usando la técnica de absorción de infrarrojos no dispersivos (NDIR), no es adecuada porque esta técnica sólo es capaz de detectar determinados compuestos, siendo insensible a compuestos como los aromáticos y acetilénicos, que son típicos de la combustión en motores diésel (Frey et al, 2001).

La normativa americana 40CFR 1065, establece que el valor de concentración de hidrocarburos diferentes de metano (χ_{NMHC}) se calcula como la diferencia entre la medida de la concentración total de hidrocarburos (χ_{HC}) menos la concentración de metano medida (χ_{CH_4}). Pero establece, en la 40CFR 1065.660, que si no se mide directamente la concentración de metano, ésta se puede estimar como el 2% de la emisión de hidrocarburos totales y por lo tanto, la concentración de los hidrocarburos diferentes al metano se puede calcular de acuerdo a la ecuación (5-81).

$$\chi_{\text{NMHC}} = 0,98 * \chi_{\text{HC}} \quad (5-81)$$

Detector de ionizador de llama (FID)

Este tipo de analizador es recomendado para la medida de hidrocarburos inquemados en continuo tanto en gases de escape diluidos como en no diluidos, y para la medida de concentración acumulada en bolsas. Según las diferentes normativas, la concentración de hidrocarburos (χ_{HC}) debe medirse en base a un átomo de carbono (base metano), y si la medida se hace en otra base, se debe corregir su valor conforme a la ecuación(5-82).

$$\chi_{\text{HC}} [\text{ppmC}_i] = C_{\text{factor}} * \chi_{\text{HC}} \quad (5-82)$$

Donde C_{factor} es igual a 3 si la medida se hace en base propano (C_3), igual a 6 si los hidrocarburos se miden en base hexano (C_6).

La técnica de medida FID se fundamenta en el fenómeno de formación de iones de carbono cuando un hidrocarburo entra en combustión en contacto con una llama de difusión de hidrógeno. El hidrocarburo en contacto con la llama de hidrógeno se pirolisa, separando los átomos de hidrógeno y dejando libre los átomos de carbono en forma de ión. Los iones de carbono se mueven al colector eléctrico negativo bajo la influencia de un potencial eléctrico aplicado entre los colectores, generándose una pequeña corriente proporcional al número de iones de carbono presentes en el gas, desprendidos de las moléculas del hidrocarburo, como se muestra en la Figura 5-42. Debido a su principio de funcionamiento, los analizadores FID proporcionan una medida del número de átomos de carbono que circulan por el analizador, sin distinguir el tipo de hidrocarburo, ni la cantidad real de moléculas de hidrocarburo que ha pasado por la llama (Pundir, 2007).

Figura 5-42: Esquema de un analizador de ionización de llama (FID) para medida de HC

Según la normativa americana 40CFR 1065, estos analizadores deben cumplir las especificaciones establecidas en la Tabla 4.2 y la prueba de linealidad 40CFR 1065.307. Y para su uso en motores diésel, motores de gasolina de 2 tiempos y de 4 tiempos de menos de 19 kW, se debe realizar el muestreo por medio de una línea calefactada y el equipo debe estar acondicionado para que en ningún momento la temperatura de los gases de escape sea menor a 191 ± 11 °C según la normativa americana (190 ± 2 °C en la normativa europea y $190^\circ\text{C} \pm 10^\circ\text{C}$ en la norma ISO). Adicionalmente debe cumplir con la verificación de interferencia de O₂, detallado en la norma 40CFR 1065.362. Esta interferencia se debe a que cambios en la concentración de oxígeno en los gases puede afectar la respuesta del FID, debido al cambio que se presenta en la temperatura de la llama. Esta interferencia normalmente se reduce utilizando una mezcla Hidrógeno-Helio como combustible para el analizador, equipos más sofisticados incluyen amplificadores de señal muy sensibles que permiten utilizar directamente hidrógeno.

5.5.2 Equipos de medida de concentración de HC en el MIVECO-PEMS

Con base en la experiencia adquirida en el laboratorio de motores térmicos de la ETSI Industriales en los proyectos de medida de emisiones con equipos embarcados anteriores al MIVECO, comentados brevemente en el subcapítulo 1.3, se constató que a pesar de que la medida de HC con analizadores NDIR es sencilla, por la simplicidad de los equipos, reducidas dimensiones y bajo peso, las medidas obtenidas con estos analizadores no es buena, especialmente en motores diésel porque estos analizadores no son capaces de detectar determinados compuestos típicos de la combustión de estos motores (Margenat, 2010).

Posteriormente se probó un analizador FID 3000HM de marca Signal, con el que se constató que los analizadores FID miden adecuadamente los HC y son equipos robustos que pueden ser utilizados en aplicaciones embarcadas, aunque presentan el inconveniente de ser equipos relativamente complicados porque requieren hidrógeno

para su funcionamiento y usar línea calefactada para el muestreo de los gases (Margenat, 2010). El analizador 3000HM de la marca Signal, presenta el inconveniente de usar mezcla hidrógeno/helio y oxígeno puro para generar la llama, siendo necesario llevar embarcadas 2 botellas de gas, que son un problema a la hora de utilizar este equipo en aplicaciones embarcadas.

Por lo anterior para el proyecto MIVECO se optó por reemplazar el analizador 3000HM de Signal por otro analizador FID preparado específicamente para su uso embarcado. En la Tabla 5.21 se muestran de forma comparativa las características técnicas de los analizadores de HC, diseñados específicamente para medida de emisiones de vehículos, disponibles en el mercado español en el primer semestre del año 2007. Por un lado a modo de referencia se incluyen las características técnicas del analizador de HC que hace parte del HORIBA OBS-2200 y por otro las del equipo 3000HM de Signal, utilizado en los proyectos anteriores. Los únicos dos equipos disponibles, eran el Horiba MEXA-1170 HFID, equipo certificado y diseñado específicamente para medida de emisiones en bancos de ensayo de motores y el ThermoFID-PT, diseñado para aplicaciones portátiles especialmente marinas.

Tabla 5.21 Comparación de analizadores de HC disponibles en el mercado español.

\ Equipo: Característica:	HORIBA OBS-2200	M&A GMBH ThermoFID PT	HORIBA MEXA-1170 HFID	SIGNAL 3000 HM
Tecnología	Hot - FID	Hot - FID	Hot - FID	Hot - FID
Rango	0-100 to 0-10,000 ppmC	1-500000 mg/m ³	0-200,000 ppm	0-10,000 ppm
Voltaje de alimentación	20 to 30 V DC	230/115V, 50..60Hz	230/115V, 50..60Hz	230/115V, 50..60Hz
Consumo de potencia eléctrica		250VA	400 VA	600 VA
Señal de salida		4..20mA, 600 Ohm	Digital RS- 232C	0-10 Vdc; 4-20 mA
Límite de detección		<0,1 mg/m ³		4-10000 ppm
tiempo de respuesta	T90<2,5 s	T90< 0,5 s	T90: 1,5 s	T90: 2 s
Dimensiones (WxHxD) mm	--	342x266x271	464 x 185 x 652	483 x 222 x 525
Peso kg	--	17 kg	25 kg	30 kg
Observaciones				
Precio € (año 2007)		20000		

Se optó por el equipo ThermoFID-PT de marca Mess & Analysentechnik M&A GMBH, que utiliza aire e hidrógeno puro para la formación de la llama, con lo cual se reduce el peso y el espacio ocupado por las botellas de gas y además porque está diseñado especialmente para aplicaciones portátiles. Ver Figura 5-43.

Es importante tener en cuenta que en la presente tesis doctoral se mide únicamente la concentración de hidrocarburos inquemados totales, por lo que la determinación de la concentración de hidrocarburos inquemados diferentes del metano (χ_{NMHC}) se calcula con base en la ecuación (5-81).

Figura 5-43: Analizador de HC ThermoFID-PT marca Mess & Analysentechnik M&A GMBH que conforma el equipo MIVECO-PEMS

5.5.3 Resultado de las pruebas de prestaciones del analizador de HC que integra el MIVECO-PEMS.

Las pruebas de prestaciones realizadas a este analizador fueron de dos tipos, las primeras se realizaron para conocer las prestaciones del analizador en si mismo y las segundas para estudiar el efecto de los accesorios de montaje sobre la respuesta dinámica del analizador.

Pruebas de prestaciones del analizador ThermoFID

Las pruebas del tiempo de respuesta de este analizador se hicieron de acuerdo al procedimiento descrito en el apartado 5.1.1 y según el esquema presentado en la Figura 5-3, conectando la salida de la válvula de sobreflujo directamente en la entrada “Sample” del analizador. Se utilizó gas de calibración con una concentración de 799,5 ppm de propano, 4000 ppm de CO y 12% de CO₂ en base nitrógeno y a manera de gas cero, se utilizó nitrógeno al 99,999% de pureza.

Figura 5-44: Respuesta escalón unitario analizador de HC ThermoFID-PT

En la Figura 5-44 se observa la respuesta escalón normalizada en la medida directa de HC del analizador ThermoFID. Se observa que tiene una respuesta muy rápida, aunque

el tiempo de retardo es prolongado, quizás debido al bajo caudal de succión de la bomba de vacío del analizador. A manera de valor de referencia se determinó, con respecto a esta respuesta escalón, los valores de tiempo de retardo (t_{ret}), tiempo de respuesta (t_{rs}), tiempo de subida (t_{10-90}) y tiempo de bajada (t_{90-10}), según se relaciona en la Tabla 5.22.

Tabla 5.22 Parámetros de respuesta dinámica analizador de HC ThermoFID-PT.

t_{ret}	t_{rs}	t_{10-90}	t_{90-10}
(s)	(s)	(s)	(s)
8,7	0,3	0,4	0,7

En cuanto a la exactitud, repetibilidad y ruido, la prueba también se realizó utilizando gas de calibración y según el procedimiento establecido por la norma americana 40CFR 1065 (ver apartado 5.1.2). Los resultados de ruido, exactitud y precisión se muestran en la Tabla 5.23, Tabla 5.24 y Tabla 5.25 respectivamente. En donde se constatan las altas prestaciones de este equipo de análisis de gases.

Tabla 5.23 Ruido del analizador de HC - ThermoFID.

$ruido = 2 \cdot rms_{\sigma}$	$VPE (ppm C_3)$	% ruido	% ruido máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,7130	799,5	0,089%	1%	Si

Tabla 5.24 Exactitud del analizador de HC - ThermoFID.

$Exactitud = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{y}_i - \bar{y}_n }{n}$	$VA (ppm)$	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,7	799,5	0,1%	4%	Si

Tabla 5.25 Repetibilidad del analizador de HC - ThermoFID.

$Repetibilidad = 2\sigma_{\varepsilon}$	$VA (ppm)$	Repetibilidad (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
1,35	799,5	0,2%	2%	Si

Pruebas de prestaciones para determinar efecto de los accesorios de montaje sobre la respuesta dinámica del analizador ThermoFID

Para medir los hidrocarburos inquemados, es necesario usar una línea calefactada para el muestreo de los gases y un filtro para retener partículas y evitar así el ensuciamiento y obstrucción del analizador, montaje que se puede observar en la Figura 5-45. Debido a esta necesidad, se realizaron pruebas especiales para conocer el efecto de estos accesorios de montaje sobre la respuesta dinámica del conjunto analizador. Estas pruebas se hicieron con el mismo procedimiento utilizado para las pruebas de respuesta directa del analizador ThermoFID, procedimiento descrito en el apartado 5.1.1 y esquema de la Figura 5-3, pero conectando la salida de la válvula de sobreflujo al

analizador a través de la línea calefactada de 4 metros y/o a través del filtro que se utiliza normalmente en los ensayos.

En la Figura 5-46, se muestra la respuesta escalón del conjunto analizador, en donde se observa que la línea calefactada únicamente afecta el tiempo de retardo de la señal, pero no la respuesta dinámica. A diferencia del filtro que presenta un efecto adverso en la respuesta dinámica, debido al volumen interior del filtro, que funciona a manera de volumen de mezcla. En la Tabla 5.26 se muestra de forma comparativa los valores de tiempo de retardo (t_{rd}), tiempo de respuesta (t_r), tiempo de subida (t_{10-90}) y tiempo de bajada (t_{90-10}) para las diferentes alternativas de montaje ensayadas.

Figura 5-45: Tubo de muestreo MIVECO-PEMS. Detalle de la línea de muestreo del analizador de HC ThermoFID-PT. Incluye línea calefactada y filtro.

Figura 5-46: Efecto de los accesorios sobre la respuesta escalón unitario analizador ThermoFID-PT.

Tabla 5.26 Parámetros de respuesta dinámica analizador de HC ThermoFID-PT.

<i>Configuración</i>	<i>t_{ret}</i> (s)	<i>t_{rs}</i> (s)	<i>t₁₀₋₉₀</i> (s)	<i>t₉₀₋₁₀</i> (s)
Directo a ThermoFID sin filtro	8,2	0,8	0,4	0,9
Directo a ThermoFID con filtro	8,6	6,3	22,0	37,1
Con línea calefactada sin filtro	11,6	0,8	0,4	0,7
Con línea calefactada con filtro	11,7	11,9	19,1	36,9

Al igual que con los demás analizadores que forman parte del MIVECO-PEMS, se hicieron ensayos en banco de rodillos para determinar las prestaciones reales del conjunto analizador de HC, incluyendo los accesorios de montaje utilizados (línea calefactada y filtro). El procedimiento utilizado para estas pruebas es el descrito en el apartado 5.1.2. Estas pruebas se aprovecharon para determinar el efecto de la calefacción en el filtro sobre las medidas de HC en motores diésel, puesto que, como se comentó en el apartado 5.5.1, para la medida de emisiones en este tipo de motores, según las diferentes normativas de medida de emisiones, es necesario calefactar la línea de muestreo de los gases para evitar la condensación y depósito de los hidrocarburos pesados antes de la llegada al analizador. Por lo tanto, en la Figura 5-47, se muestra de forma comparativa los resultados de las medidas realizadas durante ciclos de conducción NEDC (Figura 3-13) con el filtro calefactado y sin calefactar, en comparación con las medidas del equipo OBS-2200 utilizado de referencia. En esta figura se constata la importancia de evitar el condensado de los hidrocarburos inquemados, porque esto puede ocasionar una medida errónea de estas emisiones.

Figura 5-47: Efecto de la calefacción del filtro sobre la medida de HC.

Pruebas de exactitud y repetibilidad del conjunto analizador de HC (incluye accesorios)

Para la determinación de la exactitud y repetibilidad del conjunto analizador de HC, conjunto en el que se incluye la línea calefactada y el filtro de partículas, se utilizaron los

resultados de los ensayos realizados en el banco de rodillo del INSIA, con base en el procedimiento de cálculo establecido en la norma americana y expuesto con anterioridad en el apartado 5.1.2.

Exactitud: La exactitud se ha calculado de forma similar a la que propone la norma, eligiendo intervalos de tiempo de 30 segundos, en donde el valor de referencia, durante el intervalo de tiempo, se mantiene más o menos constante ($\sigma_{ref} < 5 \text{ ppmC}_1$). Al igual que para los otros analizadores, se ha elegido el ensayo en banco de rodillos 1133 (régimen constante, varios puntos), porque incluye 13 puntos de funcionamiento del motor mantenidos por espacio de mínimo 1 minuto e involucra un amplio rango de valores de concentración de HC, como se puede observar en la Figura 5-48. Para cada intervalo se ha calculado los valores medios de medida del instrumento a probar y el de referencia ($\bar{y}_{ref-i}$ y $\bar{y}_i$). Los resultados de exactitud, repetibilidad y precisión se muestran en la Tabla 5.27, Tabla 5.28 y en la Tabla 5.29 respectivamente.

Figura 5-48: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida HC ensayo de validación 1133.

Tabla 5.27 Exactitud del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS.

Exactitud = $\frac{\sum_{i=1}^{13} \bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i} }{13}$	VA (ppmV C1)	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
5,3	72,3	7,4%	4%	No

Tabla 5.28 Repetibilidad del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS.

Repetibili dad = $2\sigma_\epsilon$	VA (ppmV C1)	Repetibilidad (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
10,43	72	14,4%	2%	No

Tabla 5.29 Precisión del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS.

Precisión = $\frac{\sum_{i=1}^n (2 * \sigma_{\varepsilon-j})_i}{n}$	VA (ppm)	Precisión (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J (ref)	Valoración
1,65	72	2,3%	2%	Regular

5.5.4 Propuestas de mejora de prestaciones del conjunto analizador de HC que integra el MIVECO-PEMS.

De acuerdo a los resultados de las pruebas de prestaciones relacionados en el apartado anterior, se observa que el conjunto analizador de HC (Tabla 5.27 y Tabla 5.28) incluyendo la línea calefactada y el filtro, no cumple con los requerimientos de la normativa americana 40CFR 1065, a pesar de que el analizador en si mismo si las cumple (Tabla 5.23, Tabla 5.24 y Tabla 5.25).

Esto es debido a que los accesorios (especialmente el filtro) afectan fuertemente la calidad en la medida de emisiones y estos son necesarios para su uso como parte de un equipo portátil de medida de emisiones en motores diésel, puesto que se debe garantizar la limpieza de la línea de muestreo y del analizador en si. Una alternativa sería reemplazar el filtro actual (Figura 5-45) por otro filtro de menor tamaño con el inconveniente de que esto podría causar en menor tiempo una obstrucción del filtro y por lo tanto sería necesario una mayor frecuencia de mantenimiento. El uso de un filtro en línea no se contempla puesto que se obstruiría rápidamente por la alta presencia de partículas en los gases de escape de los motores diésel.

Otra alternativa es corregir matemáticamente los valores de concentración medidos a través de técnicas de procesamiento de señales como por ejemplo la técnica de “deconvolución” (De la Rosa at al, 2006 y Crilly, 1991). Esta técnica de deconvolución tiene una aplicación inmediata en la reconstrucción de señales de cualquier instrumento de medida, cuya filosofía se puede entender gráficamente en la Figura 5-49.

Figura 5-49: Filosofía de reconstrucción de la señal $x(n)$ usando deconvolución.

En estos casos, y enunciando de manera general, se desea registrar una señal $x(t)$ con un instrumento de medición, pero esta señal tiene que pasar por algún medio o sensor para poder ser captada. En el momento en que el sensor capta la señal, ésta ya no es $x(t)$, sino la convolución de la señal $x(t)$ con una función que caracteriza el comportamiento dinámico del sensor y/o del medio $b(t)$. La señal registrada por el instrumento de medida $y(t)$ incluye además componentes de ruido existentes en el medio $r(t)$. Por lo tanto, para

recuperar la señal $x(t)$ es necesario resolver un problema inverso, llamado deconvolución, el cual al final nos proporciona una estimación de $x(t)$ llamada $x_e(t)$. Estimación tanto más fiable cuanto mayor sea la linealidad del sensor y menor sea el efecto de la componente de ruido $r(t)$.

En el apartado 2.3, se comentaron brevemente las diferentes soluciones aportadas por la comunidad científica internacional a los diferentes problemas de la medición dinámica. Como se indicó en ese apartado, inicialmente se formularon modelos simplificados de transporte de gases (Weilenmann, 2003 y Aríztegui, 2005), pero debido a la dificultad de obtener soluciones analíticas adecuadas para la reconstrucción de las señales se utilizaron después métodos basados en la teoría de señales (Ajtay & Weilenmann, 2004 y Madireddy & Clarkl, 2006). El fabricante Horiba, no recomienda la deconvolución, pero si el uso de filtro inverso digital (Asano et al., 2004), a diferencia de la compañía Ford que desarrolló un modelo de reconstrucción de la señal de los analizadores basado en la técnica de deconvolución (Pakko, 2009).

De todas formas, para minimizar los diferentes errores presentes en las medidas instantánea de emisiones se recomienda explicar analíticamente los cambios en el valor de emisión que se presentan desde el sitio de formación hasta el punto de muestreo por medio de fórmulas e invertir estas fórmulas para transformar la señal de los analizadores en valores a la salida del motor o del sistema de postratamiento (Joumard et al., 2006)

Modelo analítico

Siguiendo la recomendación de Joumard et al (2006), el primer paso es construir un modelo analítico simplificado del fenómeno de mezcla y transporte de gases que se presenta en la línea calefactada y en el filtro, y con base en este modelo, construir una función analítica que permita recuperar el valor de concentración real con base en la concentración medida. En la Figura 5-50 se muestra un diagrama esquemático del filtro y de la línea calefactada.

Figura 5-50: Diagrama esquemático del filtro y de la línea calefactada.

Para simplificar el problema, se asumen las siguientes hipótesis:

- Se asume que el filtro es un cilindro perfecto y se desprecia el volumen del elemento filtrante y la pérdida de carga que se presenta en este elemento, por lo tanto el volumen del filtro es un valor constante V_f .
- La pérdida de carga tanto en el filtro como en la línea calefactada es despreciable.

- La presión de los gases dentro del filtro y de la línea calefactada es aproximadamente igual a la presión atmosférica, con lo cual se cumplen los enunciados de los gases ideales.
- El sistema es unidimensional
- Son despreciables las fuerzas viscosas y las fuerzas másicas.
- A pesar de que el filtro y la línea son calefactadas y tienen aislamiento, por simplificación se asume que el sistema es completamente adiabático.
- No hay reacciones químicas y las especies químicas que conforman los gases están en equilibrio químico.
- La velocidad de difusión de la especie en estudio es suficientemente alta para no generar retardos por difusión.
- Dentro de la línea calefactada el fenómeno de difusión y mezcla de gases es despreciable.

Bajo estas hipótesis, siendo algunas de ellas fuertes simplificaciones, se puede obtener un modelo simplificado que permite calcular la respuesta escalón para un cambio de concentración de valor conocido a la entrada del filtro, tratando aparte la línea calefactada y el filtro.

Con respecto al filtro, $V(t)$ es el volumen parcial de HC (volumen del filtro ocupado por los HC) sabiendo que en el tiempo $t=0$ el volumen parcial de HC dentro del filtro es igual a cero $V(0)=0$. Por lo tanto, la concentración en volumen de HC $\chi(t)$ esta dada por la ecuación (5-83)

$$\chi(t) = \frac{V(t)}{V_f} \quad (5-83)$$

Donde V_f es el volumen interno del filtro, que es un valor constante e igual a 0,126 l.

Por su parte, debido a que se quiere calcular la respuesta escalón, el volumen parcial de HC que entra en el filtro es igual a

$$\begin{aligned} \dot{V}_{in} &= 0 \quad \text{para } t \leq 0 \\ \dot{V}_{in} &= \dot{V}_{LC} \cdot \chi_{in} \quad \text{para } t > 0 \end{aligned} \quad (5-84)$$

Donde $\dot{V}_{LC}$ es el caudal de gases de escape que circula por la línea calefactada, valor constante, que depende de la bomba de succión, que en nuestro caso es igual a 0,9 l/min y χ_{in} es la concentración de HC en los gases de entrada al filtro, que es igual a la

concentración de HC en la botella de calibración multiplicado por el factor de carbono (799,5 ppmV $C_3 \times 3C_1/C_3 = 2398,5$ ppmV C_1).

La concentración de los gases a la salida del filtro, asumiendo que la velocidad de difusión de las especies es lo suficientemente alta para que en todo momento la concentración de HC dentro del filtro se pueda considerar homogénea, es igual a la concentración media dentro del filtro, por lo tanto, reemplazando la ecuación (5-83), se tiene:

$$\dot{V}_{out}(t) = \dot{V}_{LC} \cdot \chi(t) = \frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} V(t) \quad (5-85)$$

Haciendo el balance de volúmenes parciales de HC dentro del filtro, se tiene que el cambio de volumen parcial de HC dentro del filtro en cualquier instante Δt es igual al volumen parcial de HC que entra al filtro en un Δt , menos el volumen parcial de HC que sale del filtro en el mismo intervalo de tiempo, de acuerdo a la ecuación (5-86) y (5-87).

$$\Delta V(t) = \dot{V}_{in} \cdot \Delta t - \dot{V}_{out} \cdot \Delta t \quad (5-86)$$

$$\Delta V(t) = \dot{V}_{LC} \cdot \chi_{in} \cdot \Delta t - \frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} V(t) \cdot \Delta t \quad (5-87)$$

Reescribiendo en forma de diferencial se tiene la ecuación diferencial no-homogénea:

$$dV(t) = \dot{V}_{LC} \cdot \chi_{in} \cdot dt - \frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} V(t) \cdot dt \quad (5-88)$$

Resolviendo inicialmente la ecuación homogénea:

$$dV(t) = -\frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} V(t) \cdot dt \rightarrow \frac{dV(t)}{V(t)} = -\frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} \cdot dt \quad (5-89)$$

Se tiene

$$\ln V = -\frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} \cdot t + C \quad (5-90)$$

Haciendo variar la constante: $C = C(t)$ y reemplazando en la no homogénea se tiene, que la solución para la ecuación no homogénea es de la forma:

$$V(t) = C_1 \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} \cdot t\right) + C_2 \quad (5-91)$$

Y calculando la concentración de HC dentro del filtro $\chi(t)$, reemplazando la ecuación (5-83), se tiene:

$$\chi(t) = C_3 \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} \cdot t\right) + C_4 \quad (5-92)$$

Donde $C_3 = C_1/V_f$ y $C_4 = C_2/V_f$. Por lo tanto, dado que las condiciones son que la concentración inicial de HC en el filtro es igual a cero $\chi(0)=0$ y cuando pasa suficiente tiempo ($t \rightarrow \infty$) es igual a la concentración de entrada ($\chi(\infty)=\chi_{in}$), entonces, la solución analítica simplificada de mezcla dentro del filtro es la siguiente:

$$\chi(t) = \chi_{in} - \chi_{in} \cdot \exp\left(-\frac{\dot{V}_{LC}}{V_f} \cdot t\right) \quad (5-93)$$

Por otro lado, la longitud de la línea calefactada, de manera simplificada, despreciando el efecto de mezcla entre secciones contiguas, se traduce simplemente en tiempo de retardo. De tal forma que el tiempo de retardo teórico, se puede calcular conforme a la siguiente ecuación:

$$t_{\pi} = \frac{l_{LC}}{\dot{V}_{LC}} A_{LC} = 12,8s \quad (5-94)$$

Donde A_{LC} es el área transversal de la línea calefactada y l_{LC} es la longitud de la línea calefactada, que en este caso corresponde al área de un tubo de 4 mm de diámetro interior y 4 metros de longitud.

En la Figura 5-51, se muestra de forma comparativa los resultados correspondientes a la respuesta escalón real medida con el equipo ThermoFID-PT y la respuesta escalón del modelo simplificado del filtro y de la línea calefactada. En esta figura se observa similitud en la respuesta, aunque en la respuesta real se observa unos efectos de retardo, ocasionados probablemente por la pérdida de carga que se origina en el elemento filtrante.

Figura 5-51: Comparación respuesta escalón real y modelo simplificado del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS.

El modelo simplificado así definido, permite calcular la respuesta escalón, pero no permite de manera general estimar el valor de concentración real de HC a la entrada del filtro, con base en los valores registrados por el conjunto analizador de HC.

De igual modo, Aríztegui (Aríztegui, 2005) planteó un modelo fluidodinámico mucho más complejo, en el que introducía además el efecto del analizador de gases y del enfriador Peltier, el tubo de escape, silenciador, compresor, motor, turbina, catalizador y conducto de EGR. El modelo de respuesta escalón unitario del sistema de toma de muestras, un poco más completo, se basó en las ecuaciones generales de la fluidomecánica (continuidad, conservación de cantidad de movimiento, conservación de energía y conservación de las especies). Este modelo permitió calcular de manera teórica, la respuesta del sistema de toma de muestras a un escalón unitario de concentración, aplicando las hipótesis simplificadoras que permitieron reducir las ecuaciones generales en una ecuación lineal en derivadas parciales. Para la resolución de esta ecuación se propuso un método de diferencias finitas, hallando una solución numérica. En este caso, se llegó a aplicar el modelo de forma invertida (deconvolución) para la reconstrucción de la concentración, pero únicamente para el caso de la respuesta escalón.

Modelo experimental e identificación de parámetros

La imposibilidad de obtener analíticamente un conjunto de ecuaciones que permita reconstruir de manera general la señal de concentración a la entrada del filtro, ha llevado a buscar un sistema de procesamiento de señales que, basado en los resultados experimentales obtenidos en el banco de rodillos (usados con anterioridad para la determinación de la exactitud y repetibilidad del conjunto analizador MIVECO-PEMS), permita definir un modelo empírico que pueda ser utilizado para la estimación de la señal $x_e(t)$ (véase Figura 5-49) sin utilizar la deconvolución.

Por lo tanto, en la presente tesis doctoral, y en colaboración con el departamento de Electrónica de la Universidad de Alcalá, se propone aplicar la teoría de modelado e identificación de sistemas (Ljung y Glad, 1994), (Ljung, 1999) para estimar la medida del sistema de referencia (HC_OBS) a partir de las medidas del MIVECO-PEMS (HC_MIVECO). Para este desarrollo se considera que la medida del equipo Horiba OBS-2200 del INSIA es correcta y se corresponde con la concentración real de los gases a la entrada del filtro y por lo tanto será considerada como señal de referencia $y(t)$ (ver Figura 5-52). La solución consta de dos fases:

Fase 1. A partir de un ensayo suficientemente completo, encontrar el modelo (identificando sus parámetros) que minimice el error entre las medidas reales (obtenidas con el sistema de referencia HC_OBS) y las medidas estimadas, véase Figura 5-52. La propuesta está basada en la aplicación de la teoría de sistemas lineales e invariantes (LI), al problema bajo estudio. La expresión general de un modelo LI responde a la expresión (5-95).

$$y(t) = \varphi(t)^T \cdot \theta \quad (5-95)$$

donde $y(t)$ es la salida del modelo, $\varphi(t)$ es el vector de regresión con el histórico de entradas (HC_MIVECO) y salidas (HC_OBS), y θ es el vector de parámetros.

Figura 5-52: Variables que intervienen en la obtención del modelo de emisiones

Fase 2. Validar el modelo a partir de otra colección de datos de emisiones diferente a la utilizada en la fase de modelado. En este trabajo se lleva a cabo una doble validación. En primera instancia, utilizando datos parciales de la fase 1, y después, con datos de otro ensayo similar.

Para la fase de modelado, se ha elegido uno de los registros que incluye suficientes cambios dinámicos para que sean contemplados en el modelo y se proponer una estructura de modelo SISO (single input single output) (Ljung y Glad, 1994), (Ljung, 1999). Teniendo en cuenta las características del problema bajo estudio se estudia la estructura “output error” OE. Estructura que atiende a la expresión (5-96).

$$y(t) + f_1 y(t-1) + \dots + f_{n_f} y(t-n_f) = b_1 u(t-n_k) + \dots + b_{n_b} u(t-n_k-n_b) + v(t) \quad (5-96)$$

donde $u(t)$ es la entrada del modelo, $y(t)$ es la salida del modelo, $v(t)$ es el error de modelado, caracterizado como ruido blanco. Por su parte, $f_1 \dots f_{n_f}$, $b_1 \dots b_{n_b}$ forman el vector de parámetros θ a identificar, según la ecuación (5-95).

De esta forma se obtiene el modelo discretizado del sistema real, para un periodo de muestreo T_s dado. Siendo n_f el número de polos de la función de transferencia, n_b el número de ceros, y n_k el número de muestras de retardo, es decir número de muestras aplicadas a la entrada antes de que la salida se vea afectada.

La ecuación anterior puede expresarse de forma más compacta, como se muestra en la ecuación (5-97).

$$y(t) = \frac{b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b}}{1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{n_f} q^{-n_f}} q^{-n_k} \cdot u(t) + v(t) = \frac{B(q)}{F(q)} u(t) + v(t) \quad (5-97)$$

donde q^{-1} es el operador retardo en el dominio del tiempo.

Adicionalmente, a partir de los valores iniciales de entrada y salida registrados durante el ensayo, se determina el valor del retardo n_k y se calcula la mejor combinación de

parámetros n_a y n_b que minimicen el error de estimación $e(t)$, aplicando el criterio de mínimos cuadrados de la ecuación (5-98).

$$V_N(\theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N e^T(n) e(n) = \frac{1}{N} \|e(n)\|^2 \quad (5-98)$$

donde V_N es la función de coste a minimizar (loss function), y N es el número de datos de entrada y salida registrados en el experimento.

Por lo tanto, elegido uno de los registros experimentales, correspondientes al ensayo 1106 (Tabla 5.1) realizado con un periodo de muestreo de 100ms, se identifican las variables de entrada y salida de la siguiente forma:

- $u(t)$, entrada del modelo, se tomaron los valores registrados con el sistema MIVECO-PEMS, variable etiquetada como HC_MIVECO_1 en la Figura 5-52.
- $\bar{y}(t)$, valores registrados por el analizador de referencia, y que son utilizados en la identificación del modelo (véase Figura 5-52) para encontrar los parámetros característicos minimizando el error $e(t)$. Esta variable se etiqueta como HC_OBS_1 en dicha figura.

Para el cálculo de los parámetros del modelo se ha recurrido a funciones del Identification Toolbox de Matlab [Ident_1], [Ident_2]. Tras varias iteraciones el mejor resultado obtenido es:

$$B(q) = -0,052 + 0,168 q^{-1} - 0,138 q^{-2} - 0,074 q^{-3} + 0,152 q^{-4} - 0,055 q^{-5} \quad (5-99)$$

$$\begin{aligned} F(q) = & 1 - 3,09 q^{-1} + 1,68 q^{-2} + 3,27 q^{-3} - 3,10 q^{-4} - 1,82 q^{-5} \\ & + 2,98 q^{-6} - 0,92 q^{-7} \end{aligned} \quad (5-100)$$

En definitiva el modelo propuesto incluye 6 parámetros asociados a la entrada, 7 asociados a la salida y ningún retardo. O lo que es lo mismo, la función de transferencia discreta consta de cinco ceros finitos y siete polos finitos y estables:

Ceros: -0,9139 ; 1,0836 ; 1,0343 + 0,0853i ; 1,0343 – 0,0853i ; 0,9939

Polos: -0,9139 + 0,3993i ; -0,9139 – 0,3993i ; 0,9765 + 0,0651i ; 0,9765 – 0,0651i ; 0,9886 ; 0,9879 + 0,0495i ; 0,9879 – 0,0495i

En la Figura 5-53, se muestran los resultados comparativos entre los datos de referencia experimentales HC_OBS_1 y la respuesta del modelo obtenido HC_ESTIM_1, para la misma colección de datos medidos por el equipo MIVECO-PEMS (HC_MIVECO). De acuerdo a este modelo, el error en la estimación tiene una desviación estándar de 5,23 que equivale a menos del 3,7% del mayor valor medido con el equipo de referencia, y que es suficientemente pequeño como para asumir la bondad del modelo conseguido. seguido.

Figura 5-53: Comparación entre medida HC_MIVECO_1 (azul), medida de referencia HC_OBS_1 (negro) y concentración estimada HC_ESTIM_1 (rojo).

Como parte de la fase 2, se aporta una segunda validación del modelo recurriendo a otra colección de datos de entrada salida, muestreados con el mismo periodo de 0.1s. Para esta segunda validación se utilizaron los datos correspondientes al ensayo 1133, utilizado para la determinación de las prestaciones del conjunto analizador. La Figura 5-54 indica el proceso seguido y en la Figura 5-55 se muestra la gráfica comparativa entre los datos de partida HC_MIVECO_2 registrados con el sistema MIVECO-PEMS, los datos de referencia HC_OBS_2 y los valores estimados por el modelo HC_ESTIM_2. En la estimación del modelo se aplicó adicionalmente un saturador, para limitar los valores negativos del modelo.

Figura 5-54: Validación del modelo a partir de un ensayo diferente al utilizado para la obtención del modelo.

Figura 5-55: Comparación entre medida HC_MIVECO_2 (azul), medida de referencia HC_OBS_2 (negro) y concentración estimada HC_ESTIM_2 (verde).

La exactitud, repetibilidad y precisión correspondientes a la medida corregida de concentración de HC (HC_ESTIM), obtenidos a partir de los valores registrados por el conjunto analizador MIVECO-PEMS y del modelo identificado de las ecuaciones (5-97), (5-99) y (5-100), se relacionan en la Tabla 5.30, Tabla 5.31 y Tabla 5.32. En estas tablas se incluyen además los valores de exactitud, repetibilidad y precisión del conjunto sin corregir para facilitar la comparación. Se observa que en general las prestaciones la medida corregida de concentración de HC mejoran, pero en el caso de la repetibilidad, aún no se alcanzan los valores mínimos establecidos por la normativa americana.

Tabla 5.30 Exactitud del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS. Aplicando el modelo de estimación y sin aplicar.

Exactitud = $\frac{\sum_{i=1}^{13} \bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i} }{13}$	VA (ppm)	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
Modelo estimación	2,93	72	4%	Si
Conjunto analiz. MIV	5,33	72	7%	No

Tabla 5.31 Repetibilidad del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS. Aplicando el modelo de estimación y sin aplicar.

Repetibilidad = $2\sigma_\varepsilon$	VA (ppm)	Repetibilidad (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
Modelo estimación	7,50	72	10,4%	No
Conjunto analiz. MIV	10,43	72	14%	No

Tabla 5.32 Precisión del conjunto analizador de HC MIVECO-PEMS. Aplicando el modelo de estimación y sin aplicar.

Precisión = $\frac{\sum_{i=1}^n (2 * \sigma_{\varepsilon-j})_i}{n}$	VA (ppm)	Precisión (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J (ref)	Valoración
Modelo estimación	1,01	72	1,4%	Buena
Conjunto analiz. MIV	1,65	72	2,3%	Regular

5.5.5 Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de HC

A pesar de que los analizadores FID de hidrocarburos inquemados, de forma independiente, puedan cumplir con los requisitos de calidad establecidos por la normativa americana, la medida instantánea de concentración de hidrocarburos inquemados en los gases de escape de motores de encendido por compresión presenta serios problemas de exactitud y repetibilidad, causados por la influencia de los accesorios utilizados en la línea de muestreo y la temperatura de los gases a lo largo de esta línea.

Por un lado, una baja temperatura de muestreo de los gases de escape en motores de encendido por compresión, puede ocasionar la condensación de la fracción más pesada de los hidrocarburos inquemados volátiles, haciendo que se mida una menor

concentración de HC. Esta medida errónea, no es posible corregir, puesto que no es posible determinar qué fracción de HC se ha condensado. Razón por la cual el acondicionamiento de la línea de muestreo es muy importante, debiéndose garantizar en todo momento y a lo largo de toda la línea de muestreo y accesorios, la temperatura mínima establecida en las diferentes normativas de medida de emisiones. En los motores de encendido provocado, esto no es problema, debido a la ausencia de hidrocarburos con bajo punto de condensación en los gases de escape.

Por otro lado, como se pudo observar en la Figura 5-46, otro de los aspectos problemáticos en la medida de emisiones de HC en motores de encendido por compresión, es la influencia inevitable de los accesorios utilizados en la línea de muestreo. Razón por la cual, la calidad en la medida de los hidrocarburos inquemados, se debe determinar con base en la medida del conjunto analizador completo y no sólo del analizador en sí. Este problema, a diferencia del problema de condensación causado por una baja temperatura de muestreo, es posible corregir matemáticamente, aunque no analíticamente por la complejidad de las ecuaciones involucradas.

Como se desarrolló en el apartado anterior, la reconstrucción matemática de la señal de concentración de HC, se puede realizar mediante el uso de técnicas de tratamiento de señales, que con base en ensayos de caracterización con medidas simultáneas del analizador en estudio con un analizador de referencia, permiten determinar un modelo matemático que permita estimar las medidas de referencia a partir de las medidas realizadas con el analizador de prueba. En el caso estudiado se aplicó la técnica de identificación de procesos para determinar un modelo lineal invariante de cinco ceros y siete polos, que ha permitido mejorar apreciablemente la calidad de la medida de HC del conjunto analizador MIVECO-PEMS, pero que aún conserva problemas de repetibilidad, como queda de manifiesto en la Figura 5-55 y en la Tabla 5.31.

El problema de repetibilidad, ver Figura 5-47 y Figura 5-55, ponen de manifiesto un problema de deriva de la señal (offset), que varía en el tiempo, cuya causa en este momento es muy difícil de determinar y sería necesario la realización de un número mayor de ensayos de validación. Este problema podría deberse a un fenómeno de absorción/condensación y posterior liberación/evaporación de HC dentro del filtro ligado posiblemente a una falta de homogeneidad en la temperatura del filtro, puesto que si en algún momento el filtro se enfría, podría retener hidrocarburos pesados que se liberarían en el momento de alcanzar una mayor temperatura. Si en los ensayos exhaustivos, este comportamiento persistiera, sería necesario registrar la temperatura de los gases muestreados dentro del filtro y aplicar técnicas avanzadas de tratamiento de señales, como es el caso de identificación paramétrica recursiva (incluyendo la temperatura como entrada del modelo) o técnicas de identificación no lineal mediante redes neuronales adaptativas.

De todas formas, como expuso Manchur & Checkel de la Universidad de Alberta, a pesar de hacer la reconstrucción de la señal queda la incertidumbre de la concentración real en los picos de concentración, con lo cual se introduce una incertidumbre en los resultados definitivos (Manchur & Checkel, 2005).

5.6 Medida de concentración de partículas

La medida directa y en tiempo real de la concentración de partículas en suspensión (llamadas también aerosoles) en los gases de escape es un tema muy extenso y complejo que actualmente está en estado de desarrollo a nivel mundial (Durbin & Pisano, 2010), y requiere de un estudio especial que se aparta del objetivo de la presente tesis doctoral. Sin embargo, puesto que es una emisión de gran importancia por su efecto nocivo sobre la salud, se comentan brevemente las tecnologías disponibles para medición de partículas en gases de escape y la aplicación que se hace en el MIVECO-PEMS.

5.6.1 Tecnologías de medida de concentración de partículas

La emisión total de partículas (TPM - Total Particulate Matter) está constituida por la suma de la fracción “seca” y de una fracción “húmeda”. Las partículas “secas” contienen gran cantidad de hollín o carbón elemental, mientras que las partículas “húmedas” son conocidas como carbón orgánico e incluye una fracción soluble (SOF – Soluble Organic Fraction) y otra de hidrocarburos orgánicos volátiles (VOC - Volatile Organic Compound).

La opacidad es una lectura del nivel de partículas que absorben luz, fundamentalmente carbón inorgánico en los motores diesel antiguos, usado desde comienzos de los años 1960 para controlar las emisiones de los motores diésel y de las diferentes aplicaciones estacionarias que involucran procesos de combustión. En automoción, esta medida actualmente sólo es utilizada para el control del estado de mantenimiento de los vehículos diésel en uso, pero al no servir para detectar la fracción de carbón orgánico, ni para cuantificar la cantidad total en masa de partículas emitidas, no hace parte de los métodos estandarizados de medida de emisiones usados para la homologación de vehículos nuevos.

Actualmente en las diferentes normativas de emisiones para la homologación de vehículos nuevos, sólo se controla la masa total de partículas emitidas en el ensayo, como se puede ver en la Tabla 3.3 para el caso de los turismos en la normativa europea actual. Las diferentes normativas, por lo tanto, reconocen únicamente dos instrumentos de medidas de masa total de partículas: balanza gravimétrica y la balanza inercial. La primera es usada en laboratorio para determinar la masa total de partículas emitidas durante un ensayo en banco de rodillos, por medio del pesaje de filtros que retienen las partículas suspendidas en una muestra de gas y la segunda usada igualmente, pero para ensayos en campo (40CFR 1065.290 y 295).

A comienzos de los años 2000, se comenzó a profundizar en el estudio de las partículas que se producen por la combustión de los motores Diesel (Holmén, 2005), siendo la concentración de partículas por unidad de volumen y el tamaño de las partículas, los parámetros más importantes que se comenzaron a estudiar. Los instrumentos utilizados inicialmente, sólo incluían un contador de partículas y las balanzas para la determinación de la masa total de partículas, pero no añadía ninguna información acerca del volumen de las partículas. Más recientemente, se desarrolló el SMPS (Scanning Mobility Particle

Sizer), que puede medir distribución de tamaños, este instrumento se afinó hasta llegar al EEPS (Engine Exhaust Particular Sizer), que es de los sistemas actuales de medición de partículas, el más completo y más preciso (Rubio et al, 2009).

Actualmente, los instrumentos de medida de partículas en tiempo real más aceptados son el ETAPS y el MAHA (MPM4) para medida en muestra directa y el DustTrak™ Aerosol Monitor y el EEPS para medida en muestra diluida (Durbin & Pisano, 2010).

El ETAPS es un instrumento basado en la detección de partículas cargadas eléctricamente. Las partículas se cargan por medio de una corona de descarga creada por una fuente de alto voltaje y luego se mide la cantidad de carga eléctrica que abandona la cámara por medio de un electrómetro. Por su parte el equipo MAHA MPM4, es un instrumento basado en la fotometría de la dispersión de rayos láser provocada por la presencia de partículas en una muestra de gases de escape, con la ventaja de medir en continuo. El DustTrak™ Aerosol Monitor, es también un instrumento basado en la fotometría láser, desarrollado principalmente para la medida de concentración de partículas en la atmósfera y por lo tanto para la medida en muestra diluida, así como EEPS, que se basa en el principio de movilidad eléctrica diferencial para dar información sobre distribución de tamaño de partículas en tiempo real, cuyo esquema se muestra en la Figura 5-56

Figura 5-56: Figura esquemática medidor de partículas EEPS.

5.6.2 Equipo de medida de concentración de partículas en el MIVECO- PEMS

Con el fin de incluir algún tipo de medida de partículas en el equipo MIVECO-PEMS, se vio que el equipo más apropiado para ser integrado era el MAHA MPM4. Este equipo aunque es de muy reciente desarrollo y su medida no está completamente validada con respecto al método de referencia (pesaje de filtros en balanza) (Durbin & Pisano, 2010), permite la medida instantánea en muestra directa de la concentración másica de partículas, que unida a la medida de caudal de gases de escape, permite calcular el factor de emisión de partículas (g/km o g/kW-h) que es el único parámetro que actualmente está regulado por las diferentes normativas de emisiones. Las ventajas

de este equipo son el peso y tamaño muy adecuados para su uso en aplicaciones embarcadas y su relativo bajo precio comparativo respecto a equipos similares disponibles en el mercado. Las características técnicas de este equipo están incluidas en la Tabla 4.1.

Figura 5-57: Analizador de partículas MAHA MPM-4 incluido en el MIVECO-PEMS.

5.6.3 Resultado de pruebas de prestaciones del analizador de partículas en el MIVECO- PEMS

La determinación de las prestaciones del analizador de partículas (respuesta dinámica, exactitud, repetibilidad, ruido y precisión) no ha sido posible llevarla a cabo por varios motivos:

- No es posible la calibración in-situ. Para la calibración del equipo se requiere de una instalación especial y muy compleja que permita hacer la dilución controlada de un gas patrón con partículas calibradas. Sería necesario acudir a centros especializados que cuenten con túneles de dilución preparados para este fin.
- Dificultad o incluso imposibilidad de simular un escalón de concentración. Sería necesario estudiar si en el túnel de dilución es posible realizar la simulación de un escalón de concentración de partículas para determinar la respuesta dinámica del analizador, que a simple vista no es evidente.
- No tener equipo de referencia. El equipo OBS, utilizado como equipo de referencia en los ensayos de validación que se utilizaron para la determinación de la exactitud, repetibilidad y precisión de los demás analizadores del MIVECO-PEMS, no incluye la medida de partículas, y por lo tanto no se tiene ningún valor de referencia con el cual comparar.
- La única validación que sería posible realizar sería en banco de rodillos en verificación indirecta con respecto a la masa total medida por pesaje de filtros. Validación que hasta el momento no se ha realizado.

A manera de demostración se incluye en la Figura 5-58 una gráfica de la medida instantánea de partículas emitidas por un motor diésel (Tabla 5.2) durante la realización de un ciclo Europa en banco de rodillos. En esta figura se puede apreciar visualmente un adecuado tiempo de respuesta y sensibilidad que permiten apreciar los cambios de concentración de partículas que ocurren durante los transitorios del motor.

Figura 5-58: Concentración de partículas en tramo final de ciclo NEDC medido con el analizador MAHA MPM-4 incluido en el MIVECO-PEMS. Ensayo de validación 1203.

De todas formas es importante resaltar que en la reciente investigación realizada por la Universidad de California (Durbin & Pisano, 2010) para California Air Resources Board, se determinó que el equipo MAHA en promedio mide menos comparado con el procedimiento estándar de pesaje de filtros y tiene un grado de ajuste lineal de tan sólo $R^2=0,852$.

5.6.4 Conclusiones sobre problemas en la medida de concentración de partículas

A pesar de contar con los resultados de validación del equipo MAHA llevados a cabo en la Universidad de California (Durbin & Pisano, 2010), considero que actualmente el mayor problema con respecto a la medición de partículas a bordo, es la dificultad de llevar a cabo la calibración, la verificación de la respuesta dinámica y en general de todas las prestaciones (exactitud, repetibilidad y precisión) de cada equipo en particular. Debido a que factores físicos como el punto de localización de la sonda de muestreo y la configuración y temperatura de los conductos de gas y del tubo de muestreo, pueden causar una medida errónea por sedimentación de partículas o por causar heterogeneidad en la distribución de partículas en los gases de escape. También pueden haber problemas en el propio analizador como descalibración o pérdida de referencia, factores que deben ser verificados en cada equipo en particular para tener la certeza de que la medida obtenida es correcta.

Por lo tanto, mientras que no se realice con el propio equipo un proceso de validación con respecto a instrumentos y/o procedimientos normalizados, los valores obtenidos tienen sólo una validez relativa y pueden ser utilizados únicamente para obtener resultados comparativos (entre medidas utilizando el mismo analizador) mas no absolutos de factores de emisión de partículas.

Capítulo 6

SUBSISTEMA DE MEDIDA DE CAUDAL Y VARIABLES TERMODINÁMICAS

Para determinar los factores de emisión de los diferentes contaminantes y del CO_2 , definidos en las ecuaciones (4-1) y (4-2), es necesario determinar el caudal másico de emisión de cada sustancia ($\dot{m}_i$), que a su vez se calcula con base en la concentración molar de la sustancia (χ_i) en los gases de escape y del caudal total de gases de escape ($\dot{m}_E$), según se presentó en la ecuación (4-3).

La determinación del caudal total de gases de escape ($\dot{m}_E$), como se comentó en el apartado 4.3, se puede medir directamente o se puede determinar de forma indirecta gracias a que en un motor de combustión interna, el caudal másico de combustible ($\dot{m}_F$), el caudal de aire de admisión ($\dot{m}_A$) y el caudal de gases de escape ($\dot{m}_E$) están íntimamente relacionados por el balance químico de la combustión a través del factor lambda (λ) definido anteriormente en la ecuación (5-31). En la ecuación (6-1) se establece el balance general de masa de la reacción de combustión que se desarrolla dentro del motor y que se ha presentado con anterioridad en el apartado 5.4.1., ecuación (5-27).

$$\dot{m}_E = \dot{m}_A + \dot{m}_F \quad (6-1)$$

Por lo tanto, dependiendo del tipo de medida de emisiones a realizar y de la instalación en sí, se puede escoger medir cualquier combinación de dos de estas 4 variables ($\dot{m}_E$, $\dot{m}_A$, $\dot{m}_F$ o λ). En el caso de un banco de motor, es evidente que lo más aconsejable es medir el caudal de combustible y el caudal de admisión, debido a que los instrumentos para medida de caudal de líquidos están muy desarrollados y permite obtener valores muy precisos en tiempo real. La medida de caudal de aire, también es

relativamente sencilla y se encuentra la instrumentación adecuada fácilmente en el mercado, como el caso de caudalímetros de flujo laminar (en inglés Laminar Flow Elements -LFEs) que son excelentes para la medida de caudales en un amplio rango, desde 0,2 SCCM y hasta 2250 SCCM ($0,2 \times 10^{-3}$ nl/min – $64 \text{ nm}^3/\text{min}$).

Para la medida de emisiones en banco de rodillos, en donde se deben utilizar únicamente instrumentos no intrusivos, no es conveniente la medida del caudal de combustible ni del caudal de aire. Por lo que se suele usar la medida directa del factor lambda, usando sondas UEGO como se comentó de forma extensa en el apartado 5.4.2, o de forma indirecta, por medio de la concentración de las sustancias en los gases de escape según se detalló en las ecuaciones del apartado 5.4.1. Por otra parte, en banco de rodillos la medida de gases de escape se puede medir instantáneamente de forma directa, aunque lo más común, por la dificultad que entraña esta medida, es evitarla utilizando un túnel de dilución a volumen constante – CVS. En un túnel de dilución los gases de escape del motor se mezclan con aire limpio en una proporción variable, de tal forma que se establece un caudal constante y de valor conocido dentro del túnel, de donde se extrae de forma constante una pequeña porción que se acumula en bolsas atmosféricas de material inerte. De esta forma, la emisión total de cada una de las sustancias, es proporcional a la concentración media de la sustancia medida en la bolsa de acumulación, evitándose así la medida del caudal de gases de escape, como se puede observar gráficamente en la Figura 6-1.

Figura 6-1: Esquema de medida de emisiones en banco de rodillos.

En el caso de la medida embarcada de emisiones con equipos portátiles, donde se busca que los instrumentos de medida sean totalmente no-intrusivos, se hace necesaria normalmente la medida del caudal de gases de escape. Esta medida directa, se evita en algunas aplicaciones donde es posible extraer los valores del caudal de aire de admisión o del caudal de combustible directamente de la unidad de diagnóstico del vehículo (en

inglés On-board diagnostics – OBD), con el inconveniente de que se puede caer en un error de sesgo y de falta de independencia, por estar sujeto a los equipos de medida del propio vehículo, que podrían no estar funcionando correctamente. En otros casos, a semejanza de la medida de emisiones por acumulación en bolsas en banco de rodillos, como en el caso del equipo RAVEM®, se utiliza una sonda de muestreo isocinética, cuyo caudal de muestra es proporcional al caudal de los gases de escape, y un mini-túnel de dilución que permite diluir a volumen constante la pequeña muestra extraída, evitándose así la medida directa de caudal de gases de escape (Waver et al, 2004).

Por su parte, la medida directa de caudal de gases de escape, como se verá en profundidad en el presente capítulo, entraña dificultades especiales que la hacen compleja y para lo cual se hace necesario la utilización de equipos diseñados especialmente para esta aplicación.

Para la medida del caudal másico de gases de escape, se asume el gas como fluido incompresible y por lo tanto se considera como gas ideal. Esta simplificación es adecuada debido a que los gases de escape están a una presión muy cercana a la presión atmosférica. Por lo tanto, el caudal másico de gases de escape ($\dot{m}_E$) se mide de forma indirecta midiendo el caudal volumétrico del gas ($\dot{V}_E$) a las condiciones de presión (P_E) y temperatura del gas (T_E), como se muestra en la ecuación (6-2).

$$\dot{m}_E = \dot{V}_E \cdot \rho_E \quad (6-2)$$

Donde la densidad del gas de escape (ρ_E), se calcula como gas ideal de acuerdo a la ecuación (6-3). El peso molecular de los gases de escape (M_E), se puede aproximar al peso molecular del aire, aunque, si se conoce el factor lambda puede ser calculado de forma aproximada según la ecuación (6-4) y (6-5) para mezcla pobre y rica respectivamente. Estas ecuaciones se deducen de las ecuaciones de balance químico general de la combustión para mezcla pobre y mezcla rica, definidas anteriormente en el apartado 5.4.1 y específicamente de las ecuaciones (5-32) y (5-61) respectivamente.

$$\rho_E = \frac{P_E \cdot M_E}{R \cdot T_E} \quad (6-3)$$

$$M_{E_pobre} = \frac{aM_{CO_2} + \frac{b}{2}M_{H_2O} + 3,773\lambda\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)M_{N_2} + (\lambda - 1)\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)M_{O_2}}{a + \frac{b}{2} + 3,773\lambda\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) + (\lambda - 1)\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)} \quad (6-4)$$

$$M_{E_rico} = \frac{aM_{CO_2} + eM_{H_2O} + iM_{H_2} + 3,773\lambda\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)M_{N_2}}{a + \frac{b}{2} + 3,773\lambda\left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)} \quad (6-5)$$

Los coeficientes estequiométricos e y i de la ecuación (6-5) se calculan como se indica en las ecuaciones (5-62) y (5-63).

Del conjunto anterior de ecuaciones, se observa que las variables necesarias para determinar el caudal másico de gas de escape son la temperatura (T_E) y presión absoluta del gas de escape (P_E), caudal volumétrico del gas ($\dot{V}_E$) y factor lambda (λ). La medida del factor lambda fue tratada en profundidad en el apartado 5.4, por lo que el presente capítulo se centra en la medida de la temperatura, presión y caudal volumétrico.

6.1 Medida de temperatura del gas de escape.

6.1.1 Tecnologías de medida de temperatura

La normativa americana 40CFR 1065, recomienda para la medida de temperatura los termistores, termopares y detectores de temperatura resistivos (en inglés Resistive Temperature Detectors – RTDs). Los primeros son recomendados especialmente para aplicaciones de alta precisión en un rango estrecho de temperaturas, mientras que los segundos se recomiendan para aplicaciones generales, pero preferiblemente sin vaina; y los RTDs, aunque no son recomendados específicamente, se permite su uso.

Termistores

Un termistor es un sensor resistivo de temperatura. Su funcionamiento se basa en la variación de la resistividad que presenta un semiconductor con la temperatura. El término termistor proviene de Thermally Sensitive Resistor. Existen dos tipos de termistores: NTC (Negative Temperature Coefficient) y los PTC (Positive Temperature Coefficient). Usualmente, los termistores se fabrican a partir de óxidos semiconductores, tales como el óxido férrico, el óxido de níquel, o el óxido de cobalto.

En los termistores, debido a que la variación de la resistencia con la temperatura no es lineal sino hiperbólica, como en el caso de los NTC, un pequeño incremento de temperatura causa un gran incremento en la resistencia y por lo tanto, este tipo de sensores permite una alta sensibilidad y resolución en la medida de temperatura.

Otra de las ventajas principales de este tipo de sensores es que debido a la alta resistividad de los materiales empleados, es posible disponer de termistores de tamaño reducido, reduciendo el coste del sensor y ampliando el rango de aplicaciones posibles. Esta característica, permite también reducir bastante el tiempo de respuesta del sensor.

Por otra parte, el inconveniente principal de este tipo de sensores es su estrecho margen de medida -100 °C a 450 °C, siendo más limitado que en los termopares y los sensores RTD.

RTDs

Los RTD son sensores de temperatura basados en la variación de la resistencia eléctrica de un conductor con la temperatura. En estos sensores tienen por lo general, una variación bastante lineal en márgenes amplios de temperatura.

Los materiales empleados para la construcción de sensores RTD suelen ser conductores tales como el cobre, el níquel o el platino. Estos sensores tienen varias ventajas, entre ellas, el tener un amplio margen de funcionamiento, proporcionar medidas de temperatura con mayor exactitud y repetibilidad, mayor estabilidad con el tiempo (presentando derivas en la medida del orden de $0.1\text{ }^{\circ}\text{C/año}$), relación entre la temperatura y resistencia cuasi lineal y mayor sensibilidad que los termopares. En contraposición, dado que el platino y el resto de materiales conductores tienen todos una resistividad muy baja, para conseguir un valor significativo de resistencia es necesario devanar un hilo de conductor bastante largo, por lo que, el costo de un sensor RTD es mayor que el de un termopar o de un termistor. Adicionalmente, los sensores RTD se ven afectados por el autocalentamiento y los sensores RTD no son tan durables como los termopares ante vibraciones, golpes, etc.

Termopares

Un termopar es un dispositivo formado por la unión de dos metales distintos que en presencia de una diferencia de temperatura produce un voltaje (efecto Seebeck), que es función de la diferencia de temperatura entre uno de los extremos denominado "punto caliente" o unión caliente o de medida y el otro denominado "punto frío" o unión fría o de referencia. En Instrumentación industrial, los termopares son ampliamente usados como sensores de temperatura. Son económicos, intercambiables, tienen conectores estándar y son capaces de medir un amplio rango de temperaturas. Su principal limitación es la exactitud ya que los errores del sistema inferiores a un grado Celsius son difíciles de obtener.

La mayoría de los errores de medición, con este tipo de sensores, son causados por uniones no intencionales del termopar, debido a que cualquier contacto entre dos metales distintos creará una unión.

Hay varios tipos de termopares:

- Tipo K (Cromo (Ni-Cr) Chromel / Aluminio (aleación de Ni -Al) Alumel): con una amplia variedad de aplicaciones, está disponible a un bajo costo y en una variedad de sondas. Tienen un rango de temperatura de -200°C a $+1.372^{\circ}\text{C}$ y una sensibilidad $41\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aprox. Posee buena resistencia a la oxidación.
- Tipo E (Cromo / Constantán (aleación de Cu-Ni)): No son magnéticos y gracias a su sensibilidad, son ideales para el uso en bajas temperaturas, en el ámbito criogénico. Tienen una sensibilidad de $68\mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$.
- Tipo J (Hierro / Constantán): debido a su limitado rango, el tipo J es menos popular que el K. Son ideales para usar en viejos equipos que no aceptan el uso de termopares más modernos. El tipo J no puede usarse a temperaturas superiores a 760°C ya que una abrupta transformación magnética causa una descalibración

permanente. Tienen un rango de -40°C a $+750^{\circ}\text{C}$ y una sensibilidad de $\sim 52\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$. Es afectado por la corrosión.

- Tipo N (Nicrosil (Ni-Cr-Si / Nisil (Ni-Si)): es adecuado para mediciones de alta temperatura gracias a su elevada estabilidad y resistencia a la oxidación de altas temperaturas, y no necesita del platino utilizado en los tipos B, R y S que son más caros.

Por otro lado, los termopares tipo B, R y S son los más estables, pero debido a su baja sensibilidad ($10\ \mu\text{V}/^{\circ}\text{C}$ aprox.) generalmente son usados para medir altas temperaturas (superiores a 300°C).

6.1.2 Sensores de temperatura usadas en el MIVECO-PEMS

En el equipo portátil de medida de emisiones MIVECO-PEMS, se utilizan únicamente termopares tipo K. Uno de estos es usado para medir la temperatura de los gases de escape en el punto de la medida del caudal y otros dos para la medida de la temperatura del agua de refrigeración y del aceite del motor.

No se realizaron pruebas de laboratorio específicas para la determinación de las prestaciones de los sensores utilizados, pero se usaron transductores temperatura/voltaje calibrados en fábrica, que garantizan la calidad en la señal del voltaje medido. De todas formas, se realizaron ensayos de comprobación con agua/hielo y agua en ebullición, que en los tres casos fueron muy satisfactorias.

6.2 Medida de presión de gas de escape

6.2.1 Tecnologías de medida de presión

La normativa americana 40CFR 1065, recomienda para la medida de presión atmosférica y otras medidas de precisión, los transductores de presión del tipo capacitancia, los de cristal de cuarzo o los de galga extensométrica. Así como sistemas de calibración con compensación por temperatura del tipo neumático-digitales o de peso muerto que incluya sistema de almacenamiento de datos para evitar los errores de transcripción.

Como es bien sabido, hay una multitud enorme de instrumentos utilizados para la medida de presión, pero de manera general se pueden clasificar en: instrumentos hidrostáticos e instrumentos aneroides. Entre los primeros se encuentran la columna de líquido, los manómetros en U, los de pistón y el manómetro de McLeod. Estos se basan en las leyes de la hidrostática y se utilizan más para aplicaciones de presión estática y para la calibración de otros tipos de instrumentos de medida de presión. Por otra parte, los instrumentos aneroides, se basan en medir la deformación elástica que sufre un metal cuando se somete a una presión. Estos instrumentos, en general, no dependen del tipo de gas cuya presión se desea medir y son apropiados para la medida de presión dinámica instantánea.

Adicionalmente, existen otros tipos de sensores de presión, que se basan en alguna otra propiedad de la materia, como por ejemplo la densidad, entre los que se encuentran los sensores de presión de resonancia, los térmicos, los de ionización y otros basados en la velocidad del sonido o en el índice de refracción (Boyes, 2008).

Los instrumentos aneroides, los más utilizados en la industria para aplicaciones generales, básicamente están formados por un elemento sensible a la presión y por un elemento que detecta la deformación que ocurre en el elemento sensible. Los elementos sensibles pueden ser un tubo Bourdon, un diafragma o un fuelle; mientras que los elementos sensibles a la deformación pueden ser directamente una aguja o un transductor de deformación o desplazamiento. Los transductores de deformación más utilizados son:

- Galga extensométrica piezorresistiva: se basa en el efecto piezorresistivo que consiste en medir el cambio en la resistencia eléctrica específica (por unidad de volumen) de un semiconductor cuando este material es sometido a una deformación. Los tipos más comunes son los de silicona (monocristalina), polisilicona de película delgada o de membrana metálica. En general, las galgas extensométricas se conectan para formar un circuito de puente Wheatstone para maximizar la salida del sensor. Esta es la tecnología de medición de presión más utilizada actualmente y puede ser utilizada para la medida de presión absoluta, presión de vacío y presión diferencial.
- Capacitivos: este tipo de sensores utilizan un diafragma para crear un condensador variable que detecta la deformación causada por la presión aplicada. Para este tipo de aplicaciones lo más utilizado son diafragmas metálicos, cerámicos o de silicona. Y en general, es una aplicación apropiada para medir presiones bajas.
- Electromagnéticos: este tipo de sensores miden el desplazamiento del diafragma por cambios en la inductancia. Los tipos más comunes son los LVDT (Linear Variable Differential Transformer), Efecto Hall, o de corrientes de Eddy.
- Piezoeléctricos: Estos sensores usan el efecto piezoeléctrico de ciertos materiales como el cuarzo, siendo una tecnología muy apropiada para la medida de presión altamente dinámica.
- Otros tipos adicionales son los sensores ópticos de fibra de vidrio, usados en aplicaciones remotas de alta temperatura o en aplicaciones donde se necesite un instrumento inmune a la interferencia electromagnética (Boyes, 2008).

6.2.2 Sensores de presión utilizados en el MIVECO-PEMS

El equipo portátil de medida de emisiones MIVECO-PEMS, integra un sensor de presión absoluta para los gases de escape y uno de presión diferencial utilizado para la medida de caudal. Estos sensores de presión, de marca BD Sensors, son del tipo galga extensiométrica piezorresistiva de silicona con membrana de acero inoxidable. Como se observa en la Tabla 4.1, el tiempo de respuesta de estos sensores es muy pequeño ($T_{90} = 0,02$ s), por lo que son ideales para la medida instantánea de presión en los gases de escape de un motor.

No se realizaron pruebas de laboratorio específicas para la determinación de las prestaciones de los sensores de presión utilizados, pero se comprueban sus prestaciones de forma indirecta mediante las pruebas de prestaciones del medidor de caudal en conjunto.

6.3 Medida de caudal de gas de escape

6.3.1 Tecnologías de medida de caudal de gases de escape

La normativa americana 40CFR 1065 establece que la medida directa de caudal de gases de escape, además de poderse utilizar para la determinación del caudal másico instantáneo de emisiones según la ecuación (4-3), puede ser utilizada para la determinación de la emisión total, con base en la concentración media acumulada en bolsa (sin dilución). También esta medida puede ser utilizada, para el control en lazo cerrado de un sistema de muestreo proporcional, como en el caso de un sistema de dilución de flujo parcial (FR, 2005b).

En términos generales, el caudal de gases de escape es muy difícil de medir directamente usando caudalímetros convencionales debido a varios factores, entre los que se tienen:

- Comportamiento dinámico del caudal, con variaciones grandes de manera instantánea.
- La temperatura de los gases de escape a la salida del tubo de escape es muy alta, superando los 100°C, con variaciones significativas para los diferentes grados de carga del motor.
- La composición de los gases de escape es muy variable, especialmente en motores de encendido por compresión, cambiando drásticamente en periodos de tiempo muy cortos.
- Los gases de escape tienen un alto contenido de vapor de agua y partículas en suspensión.
- En condiciones de baja carga, los gases de escape del motor se comportan como un flujo pulsante, presentándose incluso flujo reverso o contraflujo.

Por lo cual la normativa americana establece que los caudalímetros de gases de escape deben estar diseñados apropiadamente para compensar los cambios de composición y estado termodinámico de los gases y recomienda evitar los medidores de flujo laminar y los medidores de tipo térmico. Sin embargo, recomienda utilizar tecnologías como el caudalímetro de ultrasónico, venturi subsónico, tubo de Pitot o el anemómetro de hilo caliente (FR, 2005b).

El desarrollo de caudalímetros para la medida directa de gases de escape en motores de combustión interna alternativos comenzó de forma más exhaustiva a finales de la década de lo 90 por la necesidad de estudiar las emisiones contaminantes en los transitorios de funcionamiento del motor con trabajos como el presentado por Skwarek et al (2001),

Silvis et al (2003), Nakamura et al (2005), Durst et al (2007), Sato et al (2007), Laurantzon (2010) and Laurantzon et al (2010).

Los caudalímetros cuyo principio de medida es la presión diferencial que se genera en el seno del fluido debido a la presencia del elemento de medida (caudalímetro de placa de orificio, venturi, tobera, caudalímetro de flujo laminar, tubos de pitot, etc.) y en los que la relación entre la presión diferencial medida y el caudal no es lineal, presentan un serio problema de precisión en la medida de caudales pulsantes, dado que el caudal promedio no se corresponde con el caudal correspondiente al promedio de la presión diferencial (Silvis et al 2003), como se puede observar en la gráfica de la Figura 6-2.

Figura 6-2: No linealidad entre el caudal y presión diferencial. Adaptación de (Silvis et al 2003)

Los caudalímetros de turbina y los de tipo vórtice, por su parte, según Mottram (1992) presentan serios problemas para la medida de caudal pulsante. En 1989, Horiba patentó un caudalímetro “Head-type” para medir de forma indirecta el caudal de gases de escape de MCIA en bancos de ensayo de vehículos, donde se utiliza el muestreo a volumen constante (CVS) para medida de emisiones (Lewis, 1989). Este tipo de caudalímetro, posteriormente comercializado por la compañía AVL (Silvis et al, 2003), se basa en medir la diferencia entre el caudal de gases diluídos que circula a través de la tobera del caudalímetro del CVS (Critical Flow Venturi – CFV) y el caudal de aire de dilución que se mide con un caudalímetro convencional de tipo laminar. La principal ventaja de este tipo de caudalímetro, es que al ser constante el caudal que circula a través del CVS, sólo es necesario medir el caudal de aire que permanece en condiciones constantes de presión y de temperatura. Para evitar los errores debidos al carácter oscilatorio del flujo de gases de escape, en la medida de caudal del aire de dilución se utilizan algoritmos de compensación del tipo filtros pasa bajas.

Para la medida del caudal de gases de escape de motores de uso real, como el caso de la medida en vehículos en circulación, no es posible utilizar caudalímetros voluminosos ni pesados, como es el caso de los caudalímetros ultrasónicos. Sin embargo, los caudalímetros ultrasónicos, son unos de los más efectivos para medir caudal pulsante e

incluso el contraflujo, pero tienen el inconveniente adicional de que su medida se ve afectada por la temperatura, densidad y viscosidad del fluido, que en aplicaciones de automoción es fundamental. Sin embargo, se han desarrollado diferentes técnicas para superar estos problemas entre las que se encuentra las desarrolladas en el Instituto del Automóvil de la Universidad de Leoben (Austria) (Kupnik et al., 2004 y 2006) y a nivel comercial lo desarrollado por AVL. (Beck & Hinterhofer, 1998). Actualmente, los caudalímetros ultrasónicos son ampliamente utilizados para la medida de caudal directo de gases de escape de motores en banco de rodillos.

Los anemómetros de hilo caliente, a pesar de tener una respuesta de alta frecuencia, capaz de detectar las oscilaciones de caudal a bajos grados de carga, tienen el inconveniente de que no permite discernir la dirección del flujo y por lo tanto es inadecuado para medir caudales pulsantes donde se presente flujo inverso (Laurantzon, 2010). Además, para la medida de gases de escape, estos caudalímetros tienen un problema de precisión significativo causado por la variación del coeficiente de transmisión de calor producido por el cambio continuo en la composición de los gases de escape y en especial por la variación en el contenido de humedad (Stainback & Nagabushana, 1993). Lo cierto es que a la fecha este tipo de caudalímetro no se ha llegado a utilizar para medir caudal de gases de escape de motor, pero sí es ampliamente usado para la medida del aire de admisión en motores.

El primer caudalímetro de presión diferencial que llegó a medir adecuadamente el gas de escape de los motores fue el caudalímetro Annubar, patentado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos - EPA (Breton, 2000). Este caudalímetro es similar a un tubo de pitot pero difiere en que presenta múltiples orificios a lo largo de la sección transversal del ducto o tubo, teniendo la ventaja de medir la presión diferencial media que permite tener en cuenta las variaciones que se pueden presentar en el perfil transversal del flujo (Breton, 2000).

En el año 2006 Horiba patentó otro caudalímetro tipo pitot para la medida directa de gases de escape de motores diseñado para su aplicación en banco de rodillos acoplado a un minidilutor (Nakamura et al, 2006) caracterizado por incluir una unidad electrónica que resuelve la señal de presión por frecuencia y corrige el caudal usando un coeficiente de corrección que es función de la frecuencia y la amplitud. Incluye además un generador de pulsos incluido en el conducto de admisión que permite determinar los coeficientes de corrección.

De esta forma, la mayoría de los fabricantes de equipos portátiles de medida de emisiones PEMS han apostado por usar caudalímetros tipo Pitot porque son más efectivos en términos de tamaño y costo para este tipo de aplicaciones (Nakamura et al, 2005 y Nakamura et al, 2006).

Por otro lado, independientemente del medidor utilizado, es sabido que para garantizar la medida correcta de caudal de gas se debe acondicionar el flujo antes de llegar a la zona de medida. Se deben eliminar las ondas, remolinos, flujo circular e incluso las pulsaciones del flujo, ya que estas afectan a la precisión o la repetibilidad del medidor. (40CFR§230). El acondicionamiento del flujo, normalmente se logra mediante el uso de un tubo recto de suficiente longitud (por ejemplo, una longitud igual a por lo menos 10

veces el diámetro del tubo) o mediante el uso de curvas especialmente diseñadas, placas de orificio o enderezadores para establecer un perfil de velocidad previsible (FR, 2005b).

6.3.2 Teoría sobre flujo pulsante

El flujo pulsante es un tipo especial de flujo inestable, donde se superpone una variación cíclica más o menos regular de la velocidad a una flujo medio que permanece constante (Mottram, 1992). En un motor de combustión interna alternativo, la presencia de flujo pulsante se debe a la secuencia cíclica de apertura y cierre de las válvulas de escape. Se generan dos ondas de presión en el proceso de escape: la primera más intensa, causada por la apertura instantánea de la válvula de escape un poco antes de finalizar la carrera de potencia durante la fase de purga y la segunda, de menor intensidad, ocurre mientras el pistón se mueve hacia el punto muerto superior durante la carrera de escape. Adicionalmente, se puede presentar flujo reverso de los gases de escape retornando al cilindro durante el periodo de cruce de válvulas, efecto que es mayor a bajo régimen de motor y en motores de ciclo Otto trabajando a cargas parciales.

Durante la carrera de escape, una cierta cantidad de gases es expulsada del cilindro, creando una onda de flujo que recorre el circuito de escape del motor hasta llegar al exterior. Las ondas de presión y de flujo dependen de la presión del cilindro al final de la carrera de expansión, que varía según el tipo de motor (diésel o gasolina), régimen de giro, carga, diseño y parámetros de calibración del motor. Las ondas se propagan a la velocidad local del sonido a través de todo el sistema de escape, que incluye el colector de escape, los catalizadores, silenciadores y demás elementos para el postratamiento de gases de escape. El fenómeno de propagación de las ondas generadas a la salida de las válvulas de escape es muy complejo, pues las ondas pueden sufrir reflexión, refracción, atenuación e incluso superposición en el caso de motores de varios cilindros, que depende de la configuración geométrica del sistema de escape y de las pérdidas por fricción (Annand & Roe, 1974). Sin embargo, la frecuencia principal de las ondas de presión coincide con la frecuencia de apertura de las válvulas de escape (Heywood, 1988).

Lo anterior significa que el caudal de gas de escape tiene una componente estacionaria que varía conforme las condiciones de funcionamiento del motor cambian y una componente oscilatoria a alta frecuencia que se superpone y que corresponde a la onda de presión descrita anteriormente.

Para la medida embarcada de emisiones másicas instantáneas, es necesario conocer el caudal másico medio instantáneo de gases de escape, obviando la componente oscilatoria que no aporta información útil por estar a una mayor frecuencia que los cambios de carga y régimen de giro del motor, ver apartado 8.1.1. Por lo tanto, aunque el caudal instantáneo de gases de escape es un caudal pulsante, para la realización de estudios de emisiones y consumo de un MCIA, el caudal medio es de mayor interés y tiene la ventaja de que puede ser considerado como una variable cuasi-estable.

La componente media del caudal (caudal másico $\dot{m}_E$), para un motor de cuatro tiempos, se puede calcular como se muestra en la ecuación. En donde se observa que el caudal másico de un motor depende de la densidad del aire a las condiciones del colector de

admisión ($\rho_{A,0}$), el rendimiento volumétricos (η_V), la cilindrada (V_d), régimen de giro (n) y la relación aire/combustible (m_F/m_A) actual.

$$\dot{m}_E = \frac{1}{2} \cdot \eta_V \cdot V_d \cdot n \cdot \rho_{A,0} \cdot [1 + (m_F / m_A)] \quad (6-6)$$

Adicionalmente, debido a que el número de Mach calculado en el tubo de escape de un motor de combustión interna alternativo convencional es mucho menor de 0,3 el flujo de gases de escape puede considerarse incompresible sin introducir errores importantes (Zucrow & Hoffman, 1976). En las condiciones más críticas en el tubo de escape, el número de Mach puede llegar a ser igual a $1,6 \times 10^{-4}$. Por otra parte, el número de Reynolds, que establece la relación entre las fuerzas de inersia y las fuerzas viscosas, en el peor de los casos, cuando el caudal de gases de escape es muy bajo (aprox 120 l/min en condiciones estándar) es del orden de 3×10^5 y por lo tanto siempre mayor de 10^5 . Razón por lo cual, el flujo de gases de escape se puede considerar como fluido no viscoso (Zucrow & Hoffman, 1976).

Por lo anterior, el caudal de gases de escape en un motor de combustión interna alternativo se puede considerar como flujo no viscoso e incompresible. Y por lo tanto, la componente oscilatoria del caudal de gases de escape se puede modelar como un flujo inestable en una dimensión utilizando la ecuación de Euler –ecuación (6-7) y la ecuación de continuidad –ecuación (6-8).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v) = 0 \quad (6-7)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v + \frac{1}{\rho} \nabla P = 0 \quad (6-8)$$

Estas ecuaciones se pueden resolver utilizando el método de diferencias finitas (Heywood, 1988) u otras técnicas numéricas (Liang et al, 2009). Estas ecuaciones, sin embargo, se pueden simplificar en el caso de que las variaciones de presión sean pequeñas, asumiendo un comportamiento lineal del gas con pequeñas variaciones de caudal y considerando el proceso de propagación de la onda como adiabático. De esta forma, se obtienen 2 ecuaciones, una de velocidad de propagación de la onda de presión (P) – ecuación (6-9) y otra de velocidad de las partículas (v) – ecuación (6-10) - ambas dependiendo de la velocidad del sonido (c) (Silvis et al, 2003).

$$\nabla^2 P - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 P}{\partial t^2} = 0 \quad (6-9)$$

$$\nabla^2 v - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \quad (6-10)$$

Puesto que la componente oscilatoria del caudal es debida a la apertura secuencial de las válvulas de escape, la solución de este problema es una función periódica que puede expresarse como una serie de Fourier donde la frecuencia fundamental (f) es una función del régimen de giro del motor y del número de cilindros (Nakamura et al, 2005).

Por lo tanto, la función de presión y velocidad del gas (P, v) que experimenta una partícula situada a la distancia x en el instante t , se puede expresar de forma general como se muestra en las ecuaciones (6-11) y (6-12) (Annand & Roe, 1974).

$$P = P_0 + \sum_{n=1}^{\infty} P_n \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot n \cdot (x - c \cdot t) + \varphi_p) \quad (6-11)$$

$$v = v_0 + \sum_{n=1}^{\infty} v_n \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot n \cdot (x - c \cdot t) + \varphi_v) \quad (6-12)$$

Donde P_0, v_0 son los valores medios, P_n, v_n la amplitud de cada armónico y φ_p y φ_v los ángulos de desfase de la onda de presión y velocidad respectivamente.

6.3.3 Caudalímetros de tubo de Pitot

El tubo de Pitot sirve para medir la velocidad de flujo por medio de la medida de la presión dinámica P_D , que es la diferencia entre la presión total o presión de estancamiento P_T y la presión sensible P_S , como se puede apreciar en la Figura 6-3. Existen varios tipos de configuraciones de tubo de pitot, el primero es el “Tubo de Pitot Estático”, conocido también como tubo Prandtl, que permite medir la velocidad del fluido en un punto determinado. El tubo de pitot estático consiste de dos tubos concéntricos no conectados entre sí que se instala apuntando directamente a la dirección del flujo, con el fin de tener un punto donde la velocidad del fluido sea cero, como se observa en la Figura 6-3. Este punto de velocidad cero se conoce con el nombre de punto de estancamiento o de remanso (punto 2 de la Figura 6-3).

Figura 6-3: Esquema de un tubo de Pitot convencional o tubo Prandtl.

Existe otra configuración, que a diferencia de la anterior permite medir la velocidad media en una sección de tubería circular y por lo tanto el caudal, conocida con el nombre de “averaging pitot tube” en la literatura inglesa, ver Figura 6-4. Para lograr esta medida se asume que el flujo es turbulento y está completamente desarrollado. El tubo de Pitot incluye varios orificios distribuidos a lo largo de la sección transversal de la tubería tanto para la medida de la presión de remanso, como para la medida de la presión estática (Laurantzon, 2010).

Figura 6-4: Esquema de un tubo de Pitot de velocidad media o Averaging Pitot tube. Adaptado de (Laurantzon, 2010).

Su principio de funcionamiento se basa en que el tubo de pitot permite medir la presión de remanso o presión total (P_T), que se define como la presión que experimenta el fluido cuando este se desacelera completamente de forma isoentrópica. De forma alternativa también se puede entender la presión de remanso como la presión estática que debe tener un fluido en un recipiente infinito para que se acelere isoentrópicamente hasta la velocidad v , como se muestra en la Figura 6-5.

Figura 6-5: Condiciones de remanso. Adaptado de (Zucrow & Hoffman, 1976).

Las propiedades termodinámicas (presión y temperatura) del fluido en condiciones de remanso (P_T y T_T) dependen de la compresibilidad del fluido y por lo tanto del número de Mach. En la ecuación (6-13) se muestra la expresión matemática para la presión de estancamiento P_T (Zucrow & Hoffman, 1976), que también puede ser expresada, usando el teorema del binomio, como se muestra en la ecuación (6-14).

$$\frac{P_T}{P_s} = \left(1 + \frac{\gamma-1}{2} M^2 \right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}} \quad (6-13)$$

$$P_T = P_s + \frac{1}{2} \rho v^2 \left[1 + \frac{M^2}{4} + \frac{2-\gamma}{24} M^4 + \dots \right] = P_s + \frac{1}{2} \rho v^2 \cdot f(M, \gamma) \quad (6-14)$$

Sin embargo, para números de Mach menores de 0,3 (Zucrow & Hoffman, 1976), se puede asumir perfectamente que el flujo es incompresible y por lo tanto se puede hacer uso de la ecuación de Bernoulli que establece la relación entre la presión y la velocidad del fluido dentro de una tubería. Aplicando la ecuación de Bernoulli entre un punto cualquiera aguas arriba del tubo de Pitot (punto 1 de la Figura 6-3) y el punto de remanso, se obtiene la ecuación (6-15).

$$\frac{P_2}{\rho} = \frac{P_1}{\rho} + \frac{v_1^2}{2} \quad (6-15)$$

Donde ρ , es la densidad del fluido, P_2 es la presión de remanso (también conocida como presión total) P_T , P_1 es la presión en el punto 1, que es igual a la presión sensible o estática P_s y v_1 es la velocidad del flujo en el punto 1, que es igual a la velocidad del flujo v . Por lo tanto, reescribiendo esta ecuación y despejando la velocidad, se obtiene la ecuación (6-16). En esta ecuación se observa que la velocidad del fluido, suponiendo los efectos de compresibilidad despreciables, es proporcional a la raíz cuadrada de la diferencia entre la presión total y la presión estática, llamada comúnmente presión dinámica P_D o presión diferencial.

$$v = \sqrt{\frac{2(P_T - P_s)}{\rho}} = \sqrt{\frac{2 \cdot P_D}{\rho}} \quad (6-16)$$

En la práctica, debido a los efectos de la propia configuración física del Pitot y a las características del fluido que se mide, la igualdad presentada en la ecuación (6-16) no se cumple perfectamente. Por lo tanto, se usa la expresión (6-17) en donde se incluye el factor k_p que es conocido como constante del Pitot. Esta constante, es un valor cercano a la unidad cuando se usan tubos de pitot convencionales y con aire seco (Klopfenstein, 1998). En el trabajo de investigación presentado por Etemad (Etemad et al, 2003), se determinaron de forma analítica las constantes de Pitot para otras configuraciones de tubos de pitot y fluidos con viscosidades diferentes y comportamientos no newtonianos.

$$v = k_p \cdot \sqrt{\frac{2(P_T - P_s)}{\rho}} = k_p \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_D}{\rho}} \quad (6-17)$$

Figura 6-6: Perfiles de velocidad en un tubo de sección circular, para flujo turbulento y flujo laminar. Adaptado de (Zucrow & Hoffman, 1976)

Adicionalmente, cuando se usa el tubo de Pitot, como el presentado en la Figura 6-3, para medir el caudal en un tubo de sección circular, es necesario tener en cuenta los efectos de capa límite. Debido a que el perfil de velocidad no es estrictamente plano. Si el flujo es turbulento -número de Reynolds mayor o igual a 2300, el perfil de velocidad dentro del tubo tiende a ser plano, pero si el flujo es laminar -número de Reynolds menor a 2000, el perfil de velocidad toma una forma muy curva con el máximo de velocidad en el centro del tubo, como se muestra en la Figura 6-6. La ecuación (6-17) representa de forma aproximada el perfil de velocidades en una tubería circular, donde v_0 es la velocidad máxima que se presenta en el centro del tubo, R es el radio interno de la tubería, r la distancia radial y n es una variable que depende del número de Reynolds (Laurantzon, 2010).

$$v = v_0 \cdot \left(1 - \frac{r}{R}\right)^{\frac{1}{n}} \quad (6-18)$$

Por lo tanto, si se mide la velocidad máxima del flujo con un tubo de Pitot situado en el centro del tubo, la velocidad media del flujo será menor y proporcional. Para la correcta medida de la velocidad máxima, el tubo de Pitot debe ser instalado con el orificio de presión total completamente enfrentado al flujo y situado exactamente en el centro de la tubería. Y con el fin de determinar el caudal medio se utiliza un factor experimental k_H que se suele denominar en la literatura inglesa como “Horn Factor” y que agrupa todos los efectos de capa límite y posibles defectos de localización y orientación del tubo de Pitot, como se muestra en la ecuación (6-19). Esta constante se determina experimentalmente por medio del proceso de calibración (Klopfenstein, 1998 y Laurantzon, 2010).

$$\bar{v} = k_H \cdot v \quad (6-19)$$

De acuerdo a lo anterior, el caudal $\dot{V}$ se puede calcular como se muestra en la ecuación (6-20), conociendo el área transversal A del tubo, o el diámetro d y definiendo K_{Pitot} como una constante única que agrupa los efectos de la configuración física del tubo de pitot (k_p) y los efectos debido a la capa límite y localización del tubo de pitot dentro del tubo de muestra (k_H).

$$\dot{V} = A k_p \cdot k_H \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_D}{\rho}} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot K_{Pitot} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_D}{\rho}} \quad (6-20)$$

Para el caso de la medida de caudal de gases a baja presión, donde se pueda considerar el gas como ideal, se puede expresar la densidad del gas ρ en función de la temperatura (T), presión estática (P_s) y peso molecular del fluido (M), de acuerdo a la ecuación (6-3). Para este caso, el caudal se puede calcular de acuerdo a la ecuación (6-21).

$$\dot{V} = A K_{Pitot} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_D \cdot R \cdot T}{P_s \cdot M}} = \frac{\pi}{4} d^2 \cdot K_{Pitot} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot P_D \cdot R \cdot T}{P_s \cdot M}} \quad (6-21)$$

De esta forma, medir el caudal de gases de escape involucra, además de la medida de la presión dinámica P_D , la medida de la temperatura de los gases T y de la presión estática

P_s , por medio de un sensor de temperatura (ver apartado 6.1) y de un transductor de presión (ver apartado 6.2) respectivamente.

Medida de flujo inverso en un tubo Pitot

En la Figura 6-7 se ha representado el comportamiento de un tubo de pitot ante una situación de flujo turbulento inverso, donde el número de Reynolds es mayor de 10^5 . En esta figura, se observa el punto de remanso justo en el punto central enfrente al flujo, donde se cumple la ecuación (6-16). Se observa, además, que por el efecto de contracción de vena, producido por la sección transversal del tubo de Pitot, un aumento de la velocidad del fluido y por lo tanto una reducción en la presión, que se mantiene a lo largo del tubo de pitot hasta alcanzar el extremo del tubo de Pitot. En este punto, se genera una depresión y por lo tanto, la diferencia entre la presión y la presión estática del flujo es negativa.

Figura 6-7: Esquema de flujo inverso en tubo de pitot en flujo turbulento $Re > 10^5$.
Adaptado de (Douglas et al, 1979).

Por otro lado, en fluidos laminares, donde el número de Reynolds es menor de 2000, además del simple efecto de contracción de vena, se presenta un fenómeno de arrastre viscoso, que implica en si mismo pérdidas por fricción y por lo tanto es un fenómeno más complejo que en la presente tesis no se trata.

Por lo tanto, en flujo turbulento si medimos la diferencia de presión entre la boca del tubo de pitot (P), en la Figura 6-7 y la presión estática en una zona no afectada por la perturbación (P_0), la presión diferencial (P_D) se puede expresar en función de la velocidad del fluido aguas abajo como se muestra en la ecuación (6-22).

$$P_D = P - P_0 = -K'_{Pitot} \cdot \frac{v_0^2}{2} < 0 \quad (6-22)$$

Por lo tanto, en condiciones de flujo inverso es previsible que el comportamiento del tubo de pitot, pueda ser expresado en función de una constante K'_{Pitot} diferente o por lo menos no necesariamente igual a la constante del Pitot en flujo directo. De hecho, el caudalímetro tipo Pitot patentado por Horiba (Nakamura et al, 2006) considera igual la constante del tubo de pitot en flujo inverso al del correspondiente al flujo directo en las reivindicaciones 13 y 25. Para otras configuraciones de caudalímetros como el presentado también por Horiba en (Nakamura et al, 2005) la constante del flujo inverso es diferente a la de flujo directo. Por lo tanto, de forma general la expresión matemática para el cálculo del caudal inverso utilizando un tubo de pitot, se muestra en la ecuación (6-23). Donde la constante K'_{Pitot} debe ser determinada experimentalmente en un proceso de calibración.

$$\dot{V} = -A \cdot K'_{Pitot} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_D| \cdot R \cdot T}{P_S \cdot M}} \quad (6-23)$$

6.3.4 Caudalímetro del MIVECO-PEMS

Caudalímetro comercial

Como primera opción se decidió medir el caudal de gases de escape con un caudalímetro comercial usado para la medida de emisiones a nivel industrial, tipo tubo de Pitot, que se puede apreciar en la Figura 6-8. Con el fin de verificar la calibración de fábrica del caudalímetro comercial, se realizaron ensayos en condiciones estacionarias de flujo, utilizando a manera de referencia un caudalímetro de flujo laminar (MERIAM Instrument modelo 50MH10-3 NT) y un soplante centrífugo de caudal variable. En la Figura 6-8 se muestra el montaje utilizado para estas pruebas. Los resultados de estos ensayos fueron muy satisfactorios y se comprobó la exactitud y repetibilidad de la medida de caudal en condiciones estacionarias.

Figura 6-8: Montaje utilizado para las pruebas de verificación del caudalímetro comercial en condiciones estacionarias.

Posteriormente se hicieron ensayos de validación en banco de motor, con flujo parcial de gases de escape de un motor diésel de inyección directa marca IVECO de 7,6 litros, como se puede observar en la Figura 6-9. Se hicieron pruebas en condiciones estacionarias en diferentes puntos de operación del motor, entre 1200 y 1800 min^{-1} y entre 40 y 500 Nm. Los resultados de estas pruebas rebelaron la incapacidad de este caudalímetro para medir correctamente caudal de gases de escape, aún en condiciones estacionarias de funcionamiento, ya que se obtuvieron gráficas similares a la presentada en la Figura 6-10 para casi todos los regímenes y cargas del motor.

Figura 6-9: Montaje utilizado para las pruebas de validación en banco de motor.

Debido a los resultados obtenidos, se planteó la hipótesis del ensuciamiento y/u obstrucción del Pitot, procediéndose a realizar una limpieza profunda del tubo Pitot por diferentes métodos mecánicos y químicos. Después de comprobar nuevamente la calibración con flujo estacionario del caudalímetro, según el montaje de la Figura 6-8, se volvieron a repetir los ensayos en banco de motor, obteniendo los mismos resultados que la primera prueba.

Figura 6-10: Medida errónea de caudalímetro comercial en banco de motor. Prueba con motor diésel IVECO 6,7 L a 1600 min^{-1} , 40 Nm.

Como última alternativa, se realizaron pruebas de verificación con un Peugeot 205 de gasolina, ver Figura 6-11, con el objeto de contrastar los resultados obtenidos en el banco de motor. Los resultados corroboraron la incapacidad del caudalímetro comercial utilizado para la medida directa de caudal de gases de escape de motores de combustión interna alternativos.

Figura 6-11: Prueba de verificación del caudalímetro comercial con un Peugeot 205 gasolina.

Por lo anterior, se llegó a la conclusión que los tubos de Pitot convencionales, como el de la Figura 6-3 o el de la Figura 6-8, constituidos por estrechos conductos de presión, son inapropiados para la medida caudal de gases con alto contenido de humedad y partículas, pues se forman gotas de agua por condensación dentro de estos conductos, que con la mezcla de partículas en suspensión, taponan de forma descontrolada los conductos, ocasionando una medida de caudal errónea.

Diseño del caudalímetro MIVECO-PEMS

Con base en la discusión sobre la medida de caudales pulsantes presentada por Nakamura (Nakamura et al, 2005), se construyó un caudalímetro sencillo pero capaz incluso de medir las oscilaciones de caudal que se presentan en condiciones de baja carga en un motor. Se optó por la configuración presentada en la Figura 6-12, en la cual se propuso medir físicamente de forma independiente la presión total y la presión estática. Para evitar la obstrucción del punto de remanso, se construyó un tubo de Pitot con un ángulo de 5° que permite la evacuación de las gotas de condensado que se puedan formar en este. Para la presión estática se decidió construir una corona de igualación de presión con tres tomas independientes a la altura de la boca del tubo de Pitot, para garantizar que la presión estática, corresponde exactamente al punto de medida de presión total.

Adicionalmente, se seleccionó un medidor de presión diferencial y de presión absoluta con un tiempo de respuesta lo suficientemente bajo, que permitiera el muestreo a 1kHz.

Las características de los medidores de presión diferencial utilizados se relacionan en la Tabla 4.1 y se comentan brevemente en el apartado 6.2.2.

Figura 6-12: Esquema de medida de emisiones en banco de rodillos.

Para el acondicionamiento del flujo en el caudalímetro MIVECO-PEMS, además de respetar la longitud mínima de tubería recta que es necesaria aguas arriba del caudalímetro para garantizar que el flujo está completamente desarrollado (Tolentino et al, 2001), se diseñó e instaló aguas arriba un enderezador de flujo tipo panal de abejas, que se muestra en la Figura 6-13.

Figura 6-13: Acondicionamiento flujo en el equipo MIVECO-PEMS. a) Tubo de toma de muestra. b) Detalle del enderezador de flujo.

En la Figura 6-14, se muestran fotografías de los diferentes componentes del caudalímetro MIVECO-PEMS.

Figura 6-14: Caudalímetro tipo Pitot, equipo MIVECO-PEMS.

Prueba de vibraciones del caudalímetro que integra el MIVECO-PEMS

Se realizaron pruebas adicionales para determinar el influjo de la vibración del coche sobre la medida de caudal del caudalímetro MIVECO-PEMS con un turismo Peugeot

205 de gasolina. Para esto se hicieron varios recorridos por calles adoquinadas y pendientes pronunciadas, midiendo la presión diferencial del gas de escape del motor en el tubo de pitot durante este recorrido y comparando con la misma medida pero con los puertos de presión del medidor de presión diferencial a presión atmosférica, para determinar la robustez del equipo a la vibración del coche. Como se observa en la Figura 6-15, con medidas con un tiempo de muestreo de 4 ms, la vibración del coche no afecta la medida de presión diferencial y por consiguiente no afecta la medida de caudal.

Figura 6-15: Efecto de vibraciones sobre el medidor de presión diferencial que integra el MIVECO-PEMS

Calibración del caudalímetro MIVECO-PEMS en flujo estacionario

Como primer paso para la determinación de la constante de calibración del caudalímetro MIVECO-PEMS en flujo estacionario K_{Pitot} ecuación (6-21), se calibró el medidor de presión diferencial BD Sensors modelo DPS100-200-050-2-3-5-Y00 (Tabla 4.1) utilizando una columna de agua. La recta de calibración se presenta en la Figura 6-16.

Figura 6-16: Calibración del sensor de presión diferencial BD SENSORS que integra el equipo MIVECO-PEMS.

Seguidamente, para la determinación de la constante del pitot (K_{Pitot}) se utilizó un soplante centrífuga y un caudalímetro de flujo laminar calibrado marca MERIAM Instrument modelo 50MH10-3NT, con un montaje similar al presentado en la Figura

6-8. Para la utilización del caudalímetro MERIAM, se tuvo en cuenta la curva de calibración de fábrica y la curva de corrección por temperatura para cada uno de los puntos medidos, dado que el caudalímetro fue calibrado a 70°F y la temperatura del aire osciló entre 20 y 40°C por el calentamiento a su paso por el soplante. Las condiciones de medida fueron: temperatura ambiente 20°C y presión atmosférica alrededor de 94000 Pa. Debido a la diferencia de temperatura y presión estática entre el punto de medida del caudal con el caudalímetro de referencia (MERIAM) y el caudalímetro MIVECO, se comparó el caudal másico (g/s) medido con el caudalímetro de referencia MERIAM con el caudal MIVECO sin constante ($K_{pitot}=1$) para 30 caudales diferentes, que se ajustaron variando la apertura de entrada de aire al soplante y una válvula reguladora de caudal que incluye el soplante a la salida del mismo. En la Figura 6-17 se muestra la calibración realizada en donde se muestra una regresión lineal con un factor de correlación de 0,997 y una correlación de segundo orden con un ajuste un poco mejor, $R^2=0,9981$. De estos resultados se desprende que la mejor aproximación es la polinómica de segundo orden, relación que se entiende por la influencia de la compresibilidad del fluido, ecuaciones (6-13) y (6-14), sin embargo, se demuestra que la aproximación lineal es también muy adecuada y que los efectos de la compresibilidad son mínimos.

Figura 6-17: Calibración con flujo estacionario caudalímetro tipo Pitot, equipo MIVECO-PEMS.

Por lo anterior, se decidió utilizar la regresión lineal para la determinación del caudal. De donde se desprende que la $K_{pitot} = 0,901$, con una exactitud de $\pm 0,59$ g/s ($\pm 0,2\%$ FSO) y una desviación estándar del error de 0,661 g/s (0,3% FSO). Se observa que el error a bajos caudales es significativamente mayor que a altos caudales, debido principalmente a la relación no lineal que existe entre la presión diferencial y el caudal, que hace que la falta de exactitud del sensor de presión diferencial sea más notoria a bajos caudales, especialmente en condiciones de caudal cero.

Verificación de medida de caudal oscilante.

Para la verificación de la medida de caudal pulsante se realizó el montaje mostrado en la Figura 6-18. Para esta prueba, se utilizó un turismo de gasolina 1100 cm³ (Peugeot 205) y un turismo diésel de 2000 cm³ (Peugeot 406). Se instaló el caudalímetro MIVECO a la

salida del tubo de escape del coche para medir el caudal oscilatorio. El caudalímetro de referencia, marca MERIAM Instruments modelo 250 MH10-2, se conectó aguas abajo de un tanque de amortiguación, que incluye un elemento de caucho fácilmente deformable, que elimina las ondas de presión y de caudal del flujo.

Para la medida correcta con el caudalímetro de referencia, se realizaron las correcciones por pérdida de humedad por condensación a la temperatura de medida del MERIAM, corrección por temperatura y por composición del gas, según lo establece las instrucciones de fábrica del caudalímetro.

Figura 6-18: Montaje utilizado para las pruebas de verificación del caudalímetro MIVECO con flujo pulsante.

Para esta prueba, se midió a una frecuencia de 1 kHz con el fin de cumplir el teorema de muestreo de Nyquist-Shannon, en el cual se establece que la frecuencia mínima de muestreo sea el doble de la máxima frecuencia de la señal a medir, que en este caso es el doble de la frecuencia de apertura de las válvulas de escape, siendo esta frecuencia de muestreo aceptable para medir hasta un régimen de giro del motor de 15000 rpm. En la Figura 6-19 se puede observar las medidas en condiciones de ralentí de los dos vehículos turismo. Se observa por un lado, el caudal medio instantáneo medido con el caudalímetro de referencia MERIAM y por otro, las ondas de caudal medidas con el caudalímetro que integra el equipo MIVECO_PEMS. Se observa principalmente que la forma senosoidal de la onda de caudal no es debida a una suavización de la señal sino que por el contrario la forma observada es real.

Figura 6-19: Comparación de caudal másico instantáneo en régimen pulsante con caudal medio. Turismo diésel 2000 cm³ (P406) y turismo gasolina 1100 cm³ (P205).

Las condiciones de medida de los datos presentados en la Figura 6-19 se muestran en la Tabla 6.3. Para el cálculo del caudal inverso se ha utilizado la misma constante de calibración del pitot presentada en la Figura 6 12.

Tabla 6.1 Condiciones de medida de datos presentados en la Figura 6-19

Vehículo Turismo	Régimen de motor (rev·min ⁻¹)	Texh MIVECO (°C)	Texh MERIAM (°C)	Factor lambda λ	Temp. Amb (°C)	Presión atm. (Pa)
Diésel 2000 cm ³ (P406)	821,4	37,2	32,5	5,01	27,7	93.906
Gasolina 1100 cm ³ (P205)	859,3	51,4	39,1	1,03	26,5	93.939

Con el fin de comparar el promedio del caudal másico instantáneo medido con el equipo MIVECO a 1 kHz con el caudal másico medio medido con el caudalímetro de referencia, MERIAM Instruments modelo 250 MH10-2, se midieron en el turismo diésel 2 litros y en el turismo gasolina de 1,1 litros varios puntos de funcionamiento en vacío (ralentí, 1600, 2500 rev·min⁻¹, etc). La comparación de estas medidas de caudal se muestran en la Figura 6-20. En esta gráfica se observa que el grado de ajuste de la medida del caudalímetro MIVECO es muy bueno.

Figura 6-20: Comparación de medida de caudal másico instantáneo en régimen pulsante con medida de caudal másico medio. Turismo diésel 2000 cm³ (P406) y turismo gasolina 1100 cm³ (P205).

Resultados previos con flujo pulsante.

Una vez calibrado el caudalímetro en condiciones estacionarias, y verificada la medida de caudal oscilatorio a una frecuencia de muestreo de 1 kHz, se procedió a realizar una serie más exhaustiva de ensayos con el objetivo de explorar la naturaleza oscilatoria del caudal de gases de escape en condiciones diversas de funcionamiento del motor. Esta prueba se realizó en banco de rodillos y los resultados que se pueden observar en la Figura 6-21 y en la Figura 6-22. La Figura 6-21 muestra diferentes condiciones de funcionamiento del motor en vacío, mientras que la Figura 6-22, muestra condiciones de funcionamiento bajo carga pero en régimen estacionario (a velocidad constante). Estos ensayos se realizaron con un turismo diésel de 2,1 litros y 4 cilindros (Peugeot 406 BK STDT).

Figura 6-21: Caudal instantáneo en condiciones estandar de gases de escape en condiciones de vacío. Peugeot 406 BK STDT 2.1

En la Figura 6-21 y en la Figura 6-22 se observa que el caudal es fuertemente oscilante únicamente en condiciones de muy bajo grado de carga, especialmente a ralenti (la frecuencia de oscilación del caudal en condiciones de ralenti para un motor de 4 tiempos de un turismo diésel es de aproximadamente 28 Hz). También se observa que fuera del ralenti el caudal presenta ligeras oscilaciones, pero en esencia se puede considerar como un caudal estable. Estas curvas son similares a las publicadas por Nakamura en el año 2005 (Nakamura et al, 2005).

Figura 6-22: Caudal instantáneo de gases de escape a velocidad constante. Peugeot 406 BK STDT 2.1

Frecuencia de muestreo y registro del caudal

Debido a la naturaleza oscilatoria del caudal de gases de escape, lo ideal sería almacenar los valores instantáneos de caudal a la frecuencia de 1 kHz, como se demostró en los apartados anteriores. Pero esto no es posible en un equipo PEMS debido a que simultáneamente se deben registrar un número considerable de variables (más de 30 variables) entre las que se encuentran todos los valores instantáneos de concentración de las especies analizadas y las condiciones dinámicas del vehículo, que haría inmanejable los ficheros de datos y haría necesario una alta capacidad de procesamiento.

Por otra parte, como se demostrará en el apartado 8.1.1 y en la Figura 8-3, la frecuencia mínima de registro, que permite el estudio de las condiciones transitorias de funcionamiento de un motor de un turismo en tráfico real, es de 9 Hz. Por todo lo anterior, se decidió utilizar como frecuencia de registro de datos de 10 Hz, suficientemente alta para apreciar adecuadamente los transitorios de funcionamiento del motor y suficientemente baja para que los ficheros tipo texto generados no superen el tamaño de 4 MB por hora de ensayo.

Con el fin de obtener un registro de caudal a 10 Hz, se hicieron varias pruebas. La primera fue, haciendo el muestreo de la presión dinámica a 10 Hz y calculando el caudal a esa frecuencia (en la Figura 6-23 “Caudal medido 10 Hz”), donde se observa una medida errónea del caudal con una onda muy pronunciada de igual amplitud que la onda real de caudal pero a baja frecuencia. La segunda fue calculando el caudal a 10 Hz con base en el promedio a 10 Hz de la presión dinámica medida a 1 kHz. Como se observa también en la Figura 6-23 “Caudal prom. Calculado 10 Hz”, esta forma de medir el caudal también es errónea, debido a que la relación entre la presión dinámica y el caudal no es lineal, problema que expresa con mucha claridad Nakamura (Nakamura et al, 2005) y mostrado anteriormente en la Figura 6-2. La tercera forma, fue calculando el caudal a una frecuencia de 1 kHz con base en la presión dinámica medida a esta misma frecuencia, pero registrando un promedio de caudal calculado a 10 Hz, en la Figura 6-23 “Caudal prom. calculado 1kHz”. Esta última forma de medir el caudal se observa que es la correcta, a pesar de que muestra cierta oscilación que se reduciría si se promediase a una menor frecuencia, pero que no se hace para evitar el suavizar excesivamente la curva de caudal y poder así observar adecuadamente el caudal en régimen transitorio.

Figura 6-23: Efecto de frecuencia de adquisición y cálculo de caudal de gases de escape en condiciones de ralentí.

Metodología para cálculo de caudal en posprocesamiento

En la práctica no es posible el cálculo en tiempo real del caudal instáneo por la falta de sincronización de las diferentes señales que se utilizan (presión diferencial, presión absoluta, temperatura de los gases de escape y el peso molecular que se calcula con base composición del gas como se muestra en la ecuación (6-4) y (6-5)) y por la limitación en la capacidad de procesamiento de los ordenadores portátiles utilizados para los ensayos. Razón por la cual se propone una metodología para calcular con precisión el caudal medio de gases de escape almacenando a 10 Hz el promedio de las variables medidas a 1

kHz, pero teniendo en cuenta la no lineal que existe entre el caudal y la presión diferencial medida en el caudalímetro Pitot, problema representado en la Figura 6-2.

La metodología propuesta se basa en el hecho de que la onda de presión diferencial medida en el tubo de Pitot se puede aproximar a una onda senoidal perfecta. En la Figura 6-24 se puede observar la onda de presión diferencial medida a 1 kHz para los dos turismos ensayados en condiciones de ralentí.

Figura 6-24: Comparación de medida de presión diferencial instantánea del pitot a ralentí. Turismo diésel 2000 cm³ (P406) y turismo gasolina 1100 cm³ (P205).

En la Figura 6-24 se comprueba que la frecuencia fundamental de la onda de presión está directamente relacionada con la frecuencia del proceso de escape de los cilindros. De esta forma se verifica que la frecuencia de la onda de caudal es igual a dos veces la velocidad de giro del motor para motores de 4 cilindros y 4 tiempos (Nakamura et al, 2005), siendo igual a 27,4 Hz para el motor diésel cuyo régimen de giro a ralentí es igual a 821 rpm e igual a 28,6 Hz para el motor de gasolina cuyo régimen a ralentí es igual a 859 rpm. Por lo tanto, teniendo sólo en cuenta la aportación de la frecuencia fundamental y obviando por su irrelevancia el ángulo de fase existente entre la onda de presión diferencial y el movimiento de las válvulas de escape, simplificando la ecuación de la onda de presión - ecuación (6-11), la onda de presión diferencial (P_D) se pueden expresar en función del régimen de giro (N en s⁻¹) como se muestra en la ecuación (6-24).

$$P_D = P_{D_d} \cdot \cos(4\pi \cdot N \cdot t) + P_{D_0} \quad (6-24)$$

Donde P_{D_d} es la amplitud de la onda y P_{D_0} es el valor medio.

Adicionalmente, una onda periódica como la expresada en la ecuación (6-24), al ser discretizada, se puede caracterizar por su desviación estándar, que está relacionada con la amplitud de la onda y por el valor medio de la señal. Por lo tanto, una señal discreta que se corresponde con una función periódica perfecta, está completamente definida por su valor medio, desviación estándar y frecuencia de la onda. Con base en este hecho, la metodología propuesta se fundamenta en la posibilidad de reconstruir la onda de presión diferencial conociendo el valor medio, la desviación estándar y la frecuencia natural. Esta metodología para el cálculo del caudal se compone de varias fases:

1. En tiempo real durante la adquisición de datos:

- A 1 kHz se mide de forma continua la presión diferencial (P_D), la relación aire/combustible relativa (λ), la presión estática (P_S), la temperatura de los gases de escape (T) y el régimen de giro del motor (N).
- A una frecuencia de 10 Hz, se calcula el valor medio de cada una de las variables medidas: presión diferencial ($\overline{P_D}$), relación aire/combustible relativa ($\overline{\lambda}$), la presión estática ($\overline{P_S}$), la temperatura de los gases de escape ($\overline{T}$) y el régimen de giro del motor ($\overline{N}$) y se calcula la desviación estándar de la señal de presión diferencial ($\sigma(P_D)$).
- Se registra en un fichero los valores medios de las variables y la desviación estándar de la presión diferencial a 10 Hz.

2. En la fase de posprocesamiento de datos:

- Se sincronizan las diferentes señales, proceso que se discute ampliamente en el apartado 8.1.3.
- Se calcula el peso molecular medio para todos los datos registrados a 10 Hz – ecuaciones (8-2) y (8-3) y la densidad promedio – ecuación (6-25).

$$\rho = \frac{\overline{P_S} \cdot \overline{M_E}}{R \cdot \overline{T}} \quad (6-25)$$

- Se calcula una media móvil simple, en una ventana de 1 segundo, de la señal de presión diferencial, con el fin de corregir el defecto causado por el hecho de no haber utilizado un número entero de períodos de la onda para el cálculo del promedio a 10 Hz. Eliminando con este procedimiento el rizado de la señal.
- Se hace un ajuste del cero de la señal de presión diferencial ($\overline{P_D}^*$) para evitar problemas de exactitud. Este ajuste se hace en base a la señal de presión diferencial medida al comienzo y al final del ensayo cuando el caudal de gases de escape es igual a cero. Esta operación se realiza, porque se ha detectado variaciones significativas del cero, además de problemas de histéresis, que hace necesario realizar esta corrección.
- Para reconstruir la onda de presión diferencial, primero se genera un vector de tiempo entre 0 y 0,1 s con tiempo de muestreo de 1ms. Ecuación (6-26)

$$t = 0 : 0,001 : 0,1 \quad (6-26)$$

- Se genera una señal discreta correspondiente a una onda seno con una frecuencia natural igual a dos veces el régimen de giro del motor para el vector de tiempo antes generado. La onda se genera con una amplitud (P_{Dd}) igual a 1 y un valor medio (P_{D0}) igual a cero -ecuación (6-27).

$$P_{D_reconstruida_0}(t) = \sin(4\pi \cdot \overline{N} \cdot t) \quad (6-27)$$

- Seguidamente se hace la corrección en la amplitud de la onda, con base en la relación que hay entre la desviación estandar de la onda anteriormente generada ($P_{D_reconstruida_0}$) y la desviación estándar de la señal de presión diferencial registrada a 10 Hz. Ecuación (6-28).

$$P_{D_reconstruida_1}(t) = \frac{s(P_D)}{s(P_{D_reconstruida_0})} \sin(4\pi \cdot \overline{N} \cdot t) \quad (6-28)$$

- Para minimizar el error en el cálculo del valor medio de la señal causado por promediar un número no entero de períodos de la onda, se calcula cuántos períodos enteros hay en el intervalo de tiempo considerado (0,1s) y se genera una base de tiempo modificada como se muestra es la ecuación (6-29), donde el tiempo máximo (t_{max}) se calcula como se muestra en la ecuación (6-30), donde “int” es la función que retorna la parte entera del número.

$$t^* = 0 : 0,001 : t_{max} \quad (6-29)$$

$$t_{max} = \frac{\text{int}(0,1 \cdot (2 \cdot \overline{N}))}{2 \cdot \overline{N}} \quad (6-30)$$

- Para la corrección del valor medio, se calcula el promedio de la onda recostruida 1 - ecuación (6-28), pero considerando únicamente el intervalo de tiempo corregido (t^*), que se resta del valor medio de la presión diferencial corregida ($\overline{P_D^*}$). Por lo tanto, la onda de presión reconstruida se expresa como se muestra en la ecuación (6-31).

$$P_{D_reconstruida}(t) = P_{D_reconstruida_1}(t) + \overline{P_D^*} - \overline{(P_{D_reconstruida_1}(t^*))} \quad (6-31)$$

- Una vez reconstruida la onda de presión diferencial se calcula, para cada uno de sus valores, el caudal como se muestra ecuación (6-32) usando la constante de calibración del pitot presentada en la Figura 6 12 y la densidad media del intervalo de 0,1 s calculado previamente – ecuación (6-25).

$$\dot{V}(t) = A \cdot K_{Pitot} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot |P_{D_reconstruida}(t)|}{\rho}} \quad (6-32)$$

- Seguidamente el caudal se promedia para obtener el valor correcto de caudal medio a 10 Hz.
- Para finalizar, se vuelve a hacer una media móvil en una ventana de 1 segundo para eliminar todos los posibles defectos de rizado.

En la Figura 6-25, se muestra la comparación entre una onda de presión diferencial medida y la onda de presión reconstruida según la metodología presentada. Se observa la gran similitud entre las ondas, aunque como es de esperar, se observa también que la onda real no es perfectamente regular.

En el apartado 6.3.5 se presentan los resultados de las pruebas de prestaciones del caudalímetro, en donde se ha utilizado la metodología presentada en este apartado.

Figura 6-25: Onda de Presión diferencial. Comparación entre la onda real medida y onda reconstruida. Turismo diésel 2000 cm³ (P406).

Influencia de los accesorios del caudalímetro sobre la medida de caudal

Algunas investigaciones previas han demostrado que las ondas de caudal se ven influenciadas por la dimensión de la tubería y las conexiones aguas arriba y aguas abajo del caudalímetro (Laurantzon, 2010). Y unido al hecho de que para la realización de ensayos de medida de emisiones en tráfico real con el equipo MIVECO-PEMS se requiere el uso de tubos flexibles de extensión aguas arriba y aguas abajo del caudalímetro, como se muestra en la Figura 6-26, se decidió realizar una serie de ensayos conducentes a determinar el efecto de la longitud y curvatura de los tubos flexibles de extensión sobre la onda de caudal en el caudalímetro MIVECO-PEMS. Para la realización de estos ensayos se utilizó un turismo diésel de 2000 cm³ (Peugeot 406) y se probó varias longitudes y curvaturas del tubo de extensión de aguas abajo del caudalímetro según se muestra en la Tabla 6.2.

Figura 6-26: Instalación del caudalímetro en un turismo.

Tabla 6.2 Efecto de la longitud y curvatura del tubo de extensión sobre la onda de presión diferencial.

Ensayo No.	Tubo de extensión flexible		Presión diferencial (Pa) a 10Hz (promedio señal a 1kHz)	
	Longitud (mm)	Curvatura	Presión diferencial (valor medio en 60 s)	Desviación estandar (sobre 60 s)
1	3600	180°	7,4	119
2	3600	0°	7,7	124
3	3600	30°	7,7	132
4	0 (sin tubo de extensión)	0°	6,6	18
5	850	0°	7,1	34

Figura 6-27: Efecto de la extensión y curvatura del tubo de extensión sobre la onda de presión diferencial. a) Presión diferencial ensayos 1,2 y 3. b) Desviación estándar ensayos 1,2 y 3. c) Presión diferencial ensayos 2, 4 y 5. d) Desv.estándar ensayos 2, 4 y 5

En la Tabla 6.2 y en la Figura 6-27 a y b se muestra que la curvatura del tubo de extensión aguas abajo del caudalímetro no influye en la onda de presión diferencial puesto que la presión diferencial media y la desviación estándar registradas a 10 Hz son similares. Sin embargo, la longitud del tubo flexible si tiene un efecto importante. Se puede observar en la Figura 6-27 c y d que el incremento de la longitud del tubo de extensión incrementa significativamente la oscilación, a pesar de que el valor medio de la onda sobre un intervalo de 60 segundos permanece constante.

Es importante observar que la oscilación que se muestra en la Figura 6-27 a y c no es real, porque como se mostró anteriormente en la Figura 6-23, esta oscilación se debe al proceso de muestreo y promediado. Por esta razón, en la metodología de cálculo de caudal medio presentado anteriormente, se realiza una media móvil en ventana de 1 segundo.

6.3.5 Resultado de las pruebas de prestaciones del caudalímetro MIVECO-PEMS.

Con el fin de cuantificar exactamente el tiempo de respuesta del caudalímetro no se realizó ninguna prueba específica, simplemente, con base a los resultados mostrados en la Figura 6-23, se concluye que el caudalímetro desarrollado tiene una respuesta dinámica adecuada para registrar de forma instantánea el caudal de gases de escape en motores de combustión interna alternativos.

En cuanto a la exactitud, repetibilidad y ruido, la prueba se realizó de igual forma que con los diferentes analizadores (ver apartados 5.2.4, 5.3.3, 5.4.4, etc), utilizando los resultados de los ensayos realizados en el banco de rodillo del INSIA, en donde se midió de forma simultánea con el equipo OBS-2200 de Horiba como equipo de referencia. El procedimiento de cálculo se ha ajustado a la norma americana, expuesto en el apartado 5.1.2 y a las adaptaciones realizadas en el apartado 5.2.4. La comparación se realiza en valores de caudal másico, debido a que la temperatura de los gases de escape y la presión estática no era igual en los dos caudalímetros, por estar conectados en serie.

En las primeras pruebas de validación realizadas con el equipo de referencia, OBS-2200, se detectó que el equipo utilizado no cambia de forma automática el sensor de presión diferencial utilizado, pues tiene uno de “baja” y otro de “alta”. Esto obligó a que el cambio de medidor de presión se hiciera de forma manual, por lo que hay partes de los ensayos con valores no válidos, por estar medidos con el sensor de presión inadecuado. Los resultados de ruido del caudalímetro se muestran en la Tabla 6.3.

Tabla 6.3 Ruido en la medida de caudal másico. Equipo MIVECO-PEMS.

$ruido = 2 \cdot rms_{\sigma}$	VPE (g/s)	% ruido	% ruido máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,9184	125	0,7%	1%	Si

Para la determinación de la exactitud y la repetibilidad, se utilizaron los datos del ensayo 1133 (ver descripción en Tabla 5.1). En la Figura 6-28 se muestran los intervalos de medida utilizados. Este ensayo se realizó en su totalidad con el “sensor de alta” del equipo de referencia, por lo que los caudales a bajo grado de carga del motor no son válidos. Razón por la cual, los intervalos 1, 9, 11 y 13, no se consideran para el cálculo de las prestaciones. Los resultados de la exactitud, repetibilidad y exactitud, calculada según la ecuación (5-23), se muestran en la Tabla 6.4, Tabla 6.5 y Tabla 6.6 respectivamente.

Tabla 6.4 Exactitud en la medida de caudal másico. Equipo MIVECO-PEMS.

Exactitud = $\frac{\sum_{i=1}^{13} \bar{y}_i - \bar{y}_{ref-i} }{13}$	VA (g/s)	Exactitud (%)	Exactitud máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
1,7	123	1,4%	4%	Si

Tabla 6.5 Repetibilidad en la medida de caudal másico. Equipo MIVECO-PEMS.

Repetibili dad = $2\sigma_{\varepsilon}$	VA (g/s)	Repetibilidad (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J	Cumplimiento
0,69	123	0,6%	2%	Si

Tabla 6.6 Precisión en la medida de caudal másico. Equipo MIVECO-PEMS.

Precisión = $\frac{\sum_{i=1}^n (2 * \sigma_{\varepsilon-j})_i}{n}$	VA (g/s)	Precisión (%)	Repetibilidad máx 40CFR 1065-J (ref)	Valoración
0,99	123	0,8%	2%	Buena

Figura 6-28: Intervalos para la determinación de la exactitud y repetibilidad en la medida de caudal. Ensayo de validación 1133. Caudalímetro MIVECO-PEMS.

Adicionalmente, en la Figura 6-29 se observa los resultados de las medidas de caudal en la parte urbana de un ciclo NEDC, en donde las medidas de caudal con el equipo de referencia se realizaron con el “sensor de baja”. En esta figura, por lo tanto, se puede comprobar visualmente la exactitud real del caudalímetro MIVECO-PEMS.

Figura 6-29: Ensayo de validación 1133, parte urbana ciclo NEDC. Caudalímetro MIVECO-PEMS. Turismo diésel de 2000 cm³ (Peugeot 406)

La Figura 6-30, muestra el caudal medido con el MIVECO PEMS en comparación con el caudal medido con el equipo de referencia HORIBA OBS-2200 en un coche de gasolina de 1100 cm³. También en esta gráfica se muestra la calidad de la medida de caudal del equipo MIVECO- PEMS.

Figura 6-30: Ensayo de validación ciclo NEDC. Caudalímetro MIVECO-PEMS. Turismo gasolina de 1100 cm³ (Toyota Yaris 2000)

En la Figura 6 27 también se puede apreciar el grado de precisión a bajos caudales, mientras que en la Figura 6 25 se observa la precisión para altos caudales.

6.3.6 Conclusiones sobre problemas en la medida de caudal

Como se mostró en la ecuación (4-3), el caudal total de gases de escape, es quizás la variable más importante e influyente en la determinación de todos los factores de emisión. Razón por la cual, merece un estudio y comprobación detallada.

Como se discutió en la introducción de este apartado, no todas las tecnologías actuales de medida de caudal son apropiadas para medir gases de escape de motores de combustión interna alternativos, ni siquiera tecnologías tan desarrolladas como el anemómetro de hilo caliente ni los Venturi. Los ultrasónicos teóricamente podrían ser utilizados, pero su gran volumen y alto coste los hacen inapropiados para aplicaciones con equipos embarcados, en especial en aplicaciones con vehículos turismo.

La tecnología actualmente más utilizada comercialmente en este tipo de fluido es el caudalímetro basado en tubo de Pitot (ver apartado 2.2 y 6.3.1), aunque no se pueden utilizar los tubos de Pitot convencionales conocidos también como tubos Prandtl, porque estos tienen configuraciones internas fácilmente obstruibles por condensación del vapor de agua presente en los gases de escape y por retención de partículas.

Un caudalímetro tipo tubo de Pitot para medida de gases de escape se puede construir en base a configuraciones físicas muy distintas, pero siempre basados en la premisa de evitar la condensación y la obstrucción por partículas de las tomas de presión estática y dinámica.

Una vez construido el caudalímetro tipo tubo de pitot, es necesario llevar a cabo un proceso de calibración adecuado en condiciones estacionarias en laboratorio, para la determinación de la constante del Pitot, cuyo valor depende de factores constructivos, de la forma del perfil de velocidad dentro del tubo de medida y de la localización radial del punto de remanso dentro del conducto de gas de escape.

Es necesario utilizar sensores de presión con tiempo de respuesta del orden del milisegundo para que sea posible realizar el muestreo de la señal a 1 kHz, y de esta forma poder medir el caudal a ralentí, que es la condición más crítica que se tiene. La calibración periódica del sensor de presión diferencial es muy importante para garantizar la medida correcta del caudal.

Como se demostró experimentalmente, la exactitud del caudalímetro tipo Pitot es peor a bajos caudales, debido a que la relación entre la presión diferencial y el caudal no es lineal. Razón por la cual es necesario que el sensor de presión diferencial tenga una alta precisión en el cero. Sin embargo, el caudalímetro tipo Pitot es adecuado para medir directamente el caudal de gases de escape de un MCIA, porque el bajo caudal se presenta en condiciones de ralentí donde la onda de caudal es muy pronunciada y permite así trabajar el sensor de presión diferencial en zonas de mayor exactitud.

Se ha presentado una metodología para la determinación del caudal medio en condiciones de ralentí, que está basado en el hecho de que el caudal de gases de escape, en estas condiciones, es un caudal fuertemente oscilatorio con una frecuencia fundamental que depende de forma directa del régimen de giro del motor. Esta

metodología se presenta por el hecho de que en tiempo real no es posible determinar con exactitud el caudal debido a la falta de sincronización de las diferentes señales involucradas y por lo tanto el caudal se calcula off-line durante la etapa de posprocesamiento de las señales. La metodología para el cálculo del caudal tiene por lo tanto dos fases: Fase on-line que incluye la medida de las variables involucradas a frecuencia de 1 kHz con registro de datos a 10 Hz y la fase Off-line que incluye la reconstrucción de la onda de presión diferencial a 1 kHz y el cálculo del caudal volumétrico de másico de gases de escape.

Para la validación final del caudalímetro es indispensable hacer ensayos de comparación con equipos certificados, usados como referencia, para medir el caudal de gases de escape a diferentes grados de carga, porque realmente sólo en estas condiciones se aprecia si el caudalímetro es o no adecuado.

De la experiencia adquirida durante el desarrollo del equipo MIVECO-PEMS, concluimos que los caudalímetros comerciales no desarrollados específicamente para la medida de caudal instantáneo de gases de escape de motores de combustión interna alternativos, aunque vengan calibrados de fábrica, no deben ser utilizados sin antes contrastar los resultados con algún caudalímetro de gases de escape certificado, porque puede inducir a errores graves, que pueden incluso invalidar los resultados de los factores de emisión hallados.

Adicionalmente, el uso de Portable Emission Measurement Systems -PEMS comerciales también puede llevar a errores importantes en la determinación de los factores de emisión, debido a que al ser una “caja negra” los operadores normalmente no saben si sus medidas son correctas o no. Por lo tanto, aún en estos casos, se considera de suma importancia la realización de ensayos de validación con algún equipo de referencia, que sea de otro fabricante. Además hay que tener en cuenta que los PEMS comerciales están muy desarrollados y ajustados para la medida en vehículos pesados, pero su aplicación en turismos aún no está lo suficientemente validada. Como en el caso del equipo de referencia utilizado en el que se detectó que el cambio automático entre el sensor de baja y de alta presión no se estaba haciendo, causando la saturación de la señal de caudal y por lo tanto, pudiendo causar errores importantes en la determinación de los factores de emisión.

Capítulo 7

SUBSISTEMA DE MEDIDA DE VARIABLES DEL MOTOR Y VEHÍCULO, VARIABLES AMBIENTALES Y VARIABLES DE INFRAESTRUCTURA

7.1 Medida de variables de motor

De cara a la determinación de los factores de emisión, no es necesaria la medida de las variables de motor: régimen, temperatura de aceite y temperatura del refrigerante, pero son variables importantes si se desea hacer estudios de emisiones desde el punto de vista de las condiciones operativas del motor y si se desea estudiar el efecto del estilo de conducción.

El régimen permite la elaboración de mapas de emisiones de los diferentes motores y permite conocer el estilo de conducción utilizado (Casanova et al, 2009). La temperatura del aceite y del refrigerante, permite estudiar y/o discriminar el efecto de la temperatura del motor sobre las emisiones contaminantes y el consumo.

7.1.1 Medida de régimen de motor

Para medir el régimen de funcionamiento de un motor existen muchas alternativas comerciales, entre las que se tiene:

- Medidas Ópticas

- Medidas Mecánicas
- Medidas Inductivas
- Medidas por rizado del voltaje DC del alternador
- Medidas por vibración

Para las medidas ópticas los dispositivos suelen utilizar una emisión de luz y un captador que recibe la señal reflejada por una marca reflectante en el eje giratorio. Este tipo de sensores requieren tener fácil acceso al eje o a la pieza que realiza el giro, por lo que para aplicaciones de medida de emisiones con equipos embarcados, donde se necesitan equipos no intrusivos y de fácil montaje, no es adecuado.

Las medidas mecánicas de régimen de giro son inapropiadas para su aplicación en PEMS porque necesitan de contacto con una de las partes o piezas que se encuentre en movimiento. Así mismo las medidas inductivas, que utilizan ruedas dentadas, mediante un sensor inductivo o magnético que genera señales cuya frecuencia es proporcional al régimen de giro de la rueda.

La medida de régimen mediante la frecuencia del rizado de la tensión continua de salida del alternador es adecuada para la medida con equipos embarcados, pues solo requiere la conexión a alguna toma de corriente continua dentro del coche, como puede ser la toma del encendedor de cigarrillos de un coche. Requiere que el suministro de energía provenga del alternador y por lo tanto en las condiciones de arranque no es posible obtener una medida. En algunos motores de última generación, además se puede producir pérdidas de sincronización entre la velocidad del motor y del alternador, o incluso desaparecer la señal de rizado en ciertas condiciones de funcionamiento.

En cuanto a las medidas por vibración, se usa un acelerómetro que mediante el contacto físico con el motor se registra la frecuencia de vibración. El régimen del motor es proporcional a la frecuencia de vibración. Debido a que normalmente se usan sensores magnéticos, este tipo de medidor es universal y de fácil instalación y no tiene limitaciones como los medidores por rizado de voltaje del alternador, por lo que es el más adecuado para ser utilizado en un PEMS.

Figura 7-1: Instalación del medidor de régimen de motor, que integra el MIVECO-PEMS.

Por lo anterior, para el equipo MIVECO-PEMS, se ha elegido un medidor de vibración TB 8600 de la marca Centralauto. En la Figura 7-1, se puede apreciar la facilidad en la instalación del medidor de régimen que integra el MIVECO-PEMS y en la Figura 7-2, se muestra un ejemplo de medida de régimen en condiciones de tráfico real.

Figura 7-2: Ejemplo de medida real de régimen de motor & caudal de gases de escape. MIVECO-PEMS.

7.1.2 Medida de temperatura de aceite y temperatura de refrigerante

Debido a la necesidad de que la sensorización del vehículo sea totalmente no intrusiva, se han usado termopares tipo K para la medida de la temperatura de aceite y temperatura del refrigerante, de tal forma que el termopar que mide la temperatura del aceite se introduce al motor por el orificio de la varilla de nivel y la temperatura del refrigerante, se mide con un termopar de contacto, situado en el manguito de entrada de agua al radiador. En la Figura 7-3 se puede observar la instalación de estos termopares en un vehículo.

Figura 7-3: Medida de temperatura del motor en el MIVECO-PEMS. a) Temperatura de aceite. b) Temperatura de refrigerante.

Es importante anotar que debido a que no se puede instalar un sensor de temperatura en contacto directo con el refrigerante, la temperatura que se mide es solo aproximada, pero permite identificar perfectamente cuando el motor está frío o cuando el motor ya empieza a necesitar disipar calor por el radiador, como se puede observar en la Figura 7-4.

Figura 7-4: Ejemplo de medida real de temperatura de aceite y de refrigerante del motor. MIVECO-PEMS.

7.2 Medida de actividad del vehículo

De cara a la determinación de los factores de emisión con PEMS (ecuaciones (4-1) y (4-2)), es necesario principalmente medir con precisión la posición o la velocidad instantánea del vehículo, pues determina la distancia total recorrida y determina la potencia de tracción, según se especificó en la ecuación (4-4). También podría ser interesante medir la posición de los pedales, especialmente del acelerador para conocer el grado de carga del motor, del embrague y freno, para estudiar la forma de conducir del conductor. Pero debido a que el objeto del presente trabajo se trata de configurar un equipo portátil de medida de emisiones universal y no intrusivo, la medida de posición de los pedales, que exigiría actuaciones sobre la estructura del vehículo y que sería diferente para cada modelo de vehículo, se decidió no incluirlo en el diseño.

7.2.1 Medida de posición de pedales

De acuerdo a la experiencia adquirida con el desarrollo del MIVECO-PEMS, medir la posición de los pedales con precisión, de manera no intrusiva, no es fácil con equipos universales y sin influir en la seguridad de la conducción. Se probaron, durante la primera fase del desarrollo del equipo, una serie de potenciómetros instalados cerca de los pedales, como se muestra en la Figura 7-5, y también en el caso de un motor de gasolina, con un potenciómetro acoplado al eje de la mariposa. La dificultad de instalarlos de manera segura sin hacer orificios, sin interferir en la conducción, teniendo que ser fácilmente desmontable y con la posibilidad de ser universal y utilizado en cualquier vehículo, hizo inviable su aplicación. Adicionalmente, los datos que se registraron durante los ensayos tenían incoherencias y señales parasitas causadas por el movimiento de los pies del conductor, que en la práctica inhabilitó su utilización.

Figura 7-5: Potenciómetros para la medida de posición de los pedales. Utilizados durante la primera fase de desarrollo del MIVECO-PEMS.

7.2.2 Medida de velocidad

Para la medida de velocidad del vehículo, existen varias alternativas comerciales, entre las que se tiene la medida indirecta de velocidad por velocidad de giro de uno de los ejes, el uso de sistemas de posicionamiento global (GPS) y sensores de radar por efecto Doppler.

La medida indirecta de velocidad por medida de velocidad de giro de uno de los ejes. Este tipo de medida no es adecuado para su uso en PEMS, debido a que es un tipo de medida intrusivo. Tiene, además, la desventaja que no considera los deslizamientos de los neumáticos en el asfalto y por lo tanto no mide la velocidad real del vehículo.

Medida de velocidad por GPS

Esta medida de velocidad se realiza gracias a los datos de la posición del vehículo obtenidos a través de satélite. Para la medida en tráfico urbano, la precisión del GPS en el plano horizontal es un poco baja, aunque para el caso de la altitud es totalmente inadecuada, como se puede observar en la Tabla 7.1. Adicionalmente, la precisión depende del número de satélites captados (7, 8 o 9 satélites) y de que estos entre sí tengan una geometría adecuada, por lo que en tráfico urbano, en ciudades con edificios altos, la precisión se reduce aún más. Por otro lado, esta se podría mejorar si se usa un sistema de corrección de señales llamado SBAS (Satellite Based Augmentation System), pero actualmente está limitado su uso a aplicaciones aéreas y militares.

Adicionalmente, existen otras fuentes de error que afectan la precisión en la medida del GPS como son el retraso de la señal en la ionosfera y la troposfera, el rebote de la señal en edificios cercanos, errores en los datos de órbita y errores locales en el reloj del GPS. Sin embargo, en la Figura 7-6 se puede observar que las medidas de posición instantánea realizadas con el GPS, integrado en el equipo MIVECO-PEMS, son adecuadas.

Tabla 7.1 Precisión en la medida de posición con GPS.

Nivel de confianza	Precisión (m)	
	Plano Horizontal	Precisión en altitud
50,00%	2,5	5,6
68,27%	3,8	7,4
95,45%	7,0	14,4
99,73%	9,8	21,3

Figura 7-6: Medida real de posicionamiento con GPS integrado en el MIVECO-PEMS.

El mayor inconveniente de los GPS, es la pérdida de señal en túneles, por lo que puede ser aconsejable el uso de un segundo sistema de medida de velocidad. Además la frecuencia máxima del GPS es de tan sólo 1 dato por segundo, por lo que es necesario aplicar técnicas de interpolación en PEMS con frecuencias de muestreo mayores.

Medida de velocidad por radar Doppler

Un radar Doppler es un radar especializado que hace uso del efecto Doppler para medir la velocidad de objetos a distancia. Esto se hace mediante la transmisión y recepción de señales de microondas hacia el objetivo deseado, de tal forma que la velocidad del objeto es proporcional a la variación en la frecuencia de la señal reflejada. Esta variación, proporciona mediciones directas y de alta precisión. Los radares Doppler se utilizan en la aviación, los satélites de sondeo, para el control de la velocidad en carreteras, entre otros.

Este tipo de sensores, es muy adecuado para ser usado como parte de un PEMS, puesto que son de tamaño muy reducido, livianos, portátiles y de bajo consumo, como se puede observar en la Figura 7-7. Adicionalmente, la señal de salida suele ser tipo tren de pulsos con una frecuencia proporcional a la velocidad, por lo que es muy sencillo su acople dentro de un sistema de adquisición de datos.

Este tipo de medida, sin embargo, tiene dos inconvenientes: el primero es la necesidad de un sistema adicional para la calibración del sensor, pues la señal de salida depende de la ubicación específica y de la orientación del mismo (ver Figura 7-7). Y el segundo, es la interferencia de objetos cercanos, por ejemplo, en tráfico urbano es frecuente que durante las retenciones crucen peatones cerca del coche. Por ejemplo, en la Figura 7-8, aproximadamente en el segundo 750, se observa este fenómeno durante una retención.

Figura 7-7: Radar Delta DRS1000 de la marca GMH Engineering, integrado en el equipo MIVECO-PEMS.

Por lo tanto, debido a las deficiencias que tiene tanto la medida de velocidad con GPS y con radar, para la configuración del equipo MIVECO-PEMS, se optó por integrar los dos sistemas a la vez. De tal forma que el GPS se utiliza para la calibración global del radar (ver Figura 7-9), prefiriendo de manera general la medida instantánea de velocidad con este último, a excepción de los momentos de retención y de los momentos donde el GPS pierda la señal. Por lo tanto, combinando los dos sistemas de medida de velocidad se obtiene un error de $\pm 1,8$ km/h al 95% de confianza, que equivale a un error acumulado de $\pm 1,2\%$ en distancia acumulada, valor que se calcula con base en la velocidad medida.

Figura 7-8: Comparación entre medida de velocidad por GPS y por radar. Equipo MIVECO-PEMS.

Figura 7-9: Calibración del radar con el GPS. Equipo MIVECO-PEMS.

7.3 Medida de variables ambientales

La medida de las condiciones medioambientales, tales como temperatura ambiente, humedad relativa, presión absoluta, altitud y velocidad del viento, es de mucha utilidad en un PEMS, aunque no indispensable. Esta medida permite realizar estudios sobre la influencia del clima en las emisiones y el consumo, así como calcular de manera precisa la potencia de tracción con la velocidad frontal del viento (ecuación (4-4)). Adicionalmente, como se verá más adelante, la forma más precisa de medir la pendiente de la vía es a través de la medida de altitud, variable muy importante también para la determinación de la potencia de tracción instantánea y en general para la realización de estudios de emisiones y consumo en tráfico real.

Por lo anterior, se decidió incorporar en el equipo MIVECO-PEMS una estación meteorológica. Comercialmente, hay una gran variedad de estaciones meteorológicas, aunque la gran mayoría diseñadas para aplicaciones estacionarias. Razón por la cual, fue necesario buscar una estación meteorológica portátil, de bajo consumo, con registro de datos a frecuencia de mínimo 1 Hz, de fácil instalación y de fácil integración en el PEMS. En la Figura 7-10, se muestra la estación meteorológica SKYWATCH GEOS 11, que integra el MIVECO-PEMS.

Figura 7-10: Estación meteorológica SKYWATCH GEOS 11 que integra el equipo MIVECO-PEMS.

En la Figura 7-11, se muestra una comparación entre la medida de la componente frontal de la velocidad del viento y la velocidad del vehículo con GPS, medidas un día sin viento atmosférico. Se observa que siguen una misma tendencia, pero claramente se observan diferencias, por lo que para el cálculo de la fuerza aerodinámica, ecuación (4-4), se utiliza la velocidad de viento frontal.

Figura 7-11: Medida de velocidad de viento frontal versus velocidad del vehículo. Equipo MIVECO-PEMS.

7.4 Medida de variables de infraestructura

Para la realización de estudios de emisiones y consumo, la variable de infraestructura más importante, es la pendiente de la vía, puesto que afecta fuertemente el consumo y las emisiones contaminantes. La pendiente, además, es necesaria para la determinación de la potencia de tracción (ecuación (4-4)).

Para el desarrollo del MIVECO-PEMS, inicialmente, se ensayó la medida de pendiente usando un sensor inercial (acelerómetro+giroscopo), pero se descartó porque se ve afectada por el movimiento pendulante que experimenta el vehículo durante las aceleraciones y desaceleraciones, como se puede apreciar en la Figura 7-12.

Figura 7-12: Medida de pendiente con giroscopo versus pendiente calculada con base en la altitud. Equipo MIVECO-PEMS.

De forma indirecta, la pendiente de la vía en un punto determinado se puede determinar en base al perfil topográfico, como se expresa en la ecuación (7-1), donde z es la altura sobre el nivel del mar o altitud y x es la distancia recorrida en el plano horizontal.

$$Pendiente = \frac{dz}{dx} \quad (7-1)$$

Sin embargo, el valor de pendiente media en un tramo de vía, se puede hallar de forma aproximada como la relación entre la diferencia de altitud entre dos puntos de la vía y la distancia que los separa (Δl), como se expresa en la ecuación (7-2)

$$\overline{Pendiente} \approx \frac{\Delta z}{\Delta l} \quad (7-2)$$

Por lo tanto, una vez descartado el uso del sensor inercial para la medida de la pendiente de la vía, se optó por verificar la medida de altitud del GPS. Esta medida también se descartó pues en ciudad, donde los edificios interfieren con la recepción de los satélites, con el coche detenido el GPS indicaba cambios de altitud en algunos casos de hasta 25 metros, que confirma la baja precisión presentada en la Tabla 7.1.

Se estudiaron otras dos posibilidades: determinar la altitud en base a planos cartográficos digitalizados y determinar la altitud en base a la presión atmosférica medida por la estación meteorológica. La altitud sobre el nivel del mar (z) se puede calcular como se muestra en la ecuación (7-3), donde T_m es la temperatura media entre el suelo y la temperatura del aire a la altura z , R es la constante universal de los gases, M_a es el peso molecular del aire, g la gravedad y P_0/P es la relación entre la presión de referencia y la presión barométrica a la altura z .

$$z = \frac{R \cdot T_m}{M_a \cdot g} \cdot \ln \frac{P_0}{P} \quad (7-3)$$

Como primera aproximación, considerando una atmósfera isotérmica con una densidad ρ_0 igual a 1,292 kg/m³ y P_0 la presión barométrica a nivel del mar (101325 Pa), la altitud se puede calcular como se muestra en la ecuación (7-4).

$$z \approx \frac{P_0}{\rho_0 \cdot g} \cdot \ln \frac{P_0}{P} \approx 8000 \cdot \ln \frac{P_0}{P} [m] \quad (7-4)$$

La medida de altitud por este procedimiento tiene el inconveniente de que la presión barométrica del lugar está afectada por el estado del tiempo que presenta importantes variaciones estacionales, mensuales, diarias e incluso horarias. Por esta razón, la determinación de la altitud con base en una sola medida tiene un error muy significativo. Sin embargo, se puede reducir los errores debidos a los efectos dinámicos meteorológicos, conociendo con precisión la altitud de un punto de referencia o conociendo el valor de presión normalizada que reportan diariamente las agencias meteorológicas, la cual idealmente se presenta a una altitud de 0 m.s.n.m., 20°C de temperatura ambiente y 65% de humedad relativa. De esta forma, para reducir el error

por el efecto meteorológico, la presión de referencia P_0 que se debe usar en la ecuación (7-3) debe ser la presión normalizada del lugar.

En base a las consideraciones anteriores, se desarrolló una metodología para determinar el perfil topográfico de una vía o recorrido determinado, usando una estación meteorológica portátil como la mostrada en la Figura 7-10, que incluye los siguientes pasos:

1. Instrumentar un vehículo con el equipo MIVECO-PEMS o mínimo con la estación meteorológica, el GPS, el sensor de velocidad Doppler y el sistema de adquisición y registro de datos.
2. Antes de iniciar el recorrido es necesario conocer la presión barométrica real, midiendo con un barómetro o calculándola en base a la presión normalizada, ecuación (7-3).
3. Recorrer la vía o el recorrido que se desea caracterizar como mínimo 4 veces registrando los datos del GPS, la velocidad medida con el sensor Doppler y la presión atmosférica medida con la estación meteorológica. Teniendo cuidado de iniciar cada uno de los ensayos en el mismo sitio y realizar el mismo recorrido. Diferencias en la forma de conducir o en la velocidad no afectan la medida. También es importante realizar los ensayos en días donde la atmósfera sea estable, de forma que las variaciones de presión se deban únicamente al cambio de altura y por lo tanto se minimicen los errores por causas meteorológicas.
4. Registro de forma simultánea de las diferentes señales de la estación meteorológica, el GPS y el sensor de velocidad Doppler a una frecuencia máximo de 10 Hz o en caso de que no sea posible esta frecuencia, registrar a la mayor frecuencia posible (en nuestro caso 2 Hz para la estación meteorológica, 1 Hz para el GPS).
5. Una vez terminado cada ensayo, durante la etapa de posprocesamiento, que se verá de forma más ampliada en el apartado 8.1, se transforman las diferentes señales a una base de tiempo común a una frecuencia de 10 Hz, usando la técnica de interpolación, y luego se sincronizan aplicando los retardos correspondientes. La velocidad se determina según se especificó en el apartado 7.2.2.
6. Se calcula la altitud del lugar para cada uno de los puntos del vector de tiempo en base a la medida de la presión atmosférica (P), usando la ecuación (7-3) con la temperatura ambiente (T_m) medida por la estación meteorológica y la presión normalizada del día (P_0).
7. En base a la posición geográfica o en base a la distancia recorrida, que se calcula integrando de forma discreta la señal de velocidad, se tiene para cada ensayo un vector de altitud correspondiente al vector de posición para cada uno de los puntos del vector de tiempo.

8. Las parejas ordenadas Distancia-Altitud de cada uno de los ensayos realizados se transforman a una base común en distancia, usando la técnica de interpolación, creando para este fin un vector de distancia de referencia con puntos equidistantes.
9. Una vez se tienen de todos los recorridos realizados las parejas ordenadas Distancia-Altitud en la misma base de distancia, se procede a promediar y a sacar un perfil topográfico promedio, como me muestra en la Figura 7-13.

Figura 7-13: Metodología para determinación del perfil topográfico.

10. Una vez determinado el perfil promedio de la vía o recorrido, se procedió al cálculo de la pendiente media, usando la ecuación (7-2), como se muestra en la Figura 7-14, para el caso del recorrido extraurbano de la Figura 7-13.

Figura 7-14: Pendiente calculada según metodología MIVECO-PEMS.

Por último, comparando el perfil topográfico obtenido a través de la presión atmosférica con el perfil topográfico obtenido con los planos cartográficos digitales se detectaron importantes diferencias, como se muestra en la Figura 7-15 para el caso de un recorrido urbano en el que se realizaron las medidas en condiciones meteorológicas no muy estables. Se observa que las medidas de altitud de la estación meteorológica en tres ensayos diferentes, aunque con diferencias entre si causadas por la inestabilidad ambiental, tienen una tendencia similar que es diferente a la reportada en los planos cartográficos.

Se realizaron comprobaciones similares en 5 circuitos diferentes, observándose tendencias similares: gran similitud entre las medidas realizadas con la estación meteorológica y diferencias importantes con los datos cartográficos. Las anteriores diferencias motivaron a realizar una inspección visual que corroboró el perfil obtenido

en base a la presión atmosférica y los errores de los datos cartográficos que pueden ser debidos a la falta de precisión o a la falta de actualización. Por lo anterior, para estudios sobre la influencia de la pendiente de la vía sobre el consumo y las emisiones contaminantes, se optó por usar la metodología de la presión atmosférica, descrita anteriormente, como preferente para determinar la altitud, logrando de esta forma una precisión media de $\pm 2,3$ m al 95% de confianza, y un error máximo de ± 5 m.

Figura 7-15: Medida de altitud. Comparación entre medidas con base a la estación meteorológica y a planos cartográficos.

7.5 Conclusiones generales sobre medida de variables de motor, actividad del vehículo, variables ambientales y de infraestructura

Con base en la experiencia adquirida durante el desarrollo del equipo MIVECO-PEMS, se ha llegado a la conclusión de que la tecnología más apropiada para la medida de régimen de motor en un PEMS es la medida por vibración, por ser un sistema totalmente universal, de bajo consumo, bajo peso, fácil de instalar, no intrusivo y fácil de integrar en un PEMS. Adicionalmente tiene una alta precisión. No se recomienda el uso de tacómetros basados en la medida del rizado del voltaje del alternador.

Por otro lado, la medida de velocidad en un PEMS, es de suma importancia, pues interviene directamente en la determinación de los factores de emisión. Razón por la cual se recomienda llevar un doble sistema de medida. Se ha comprobado que los sistemas de medida de velocidad más adecuados, para ser integrados en un PEMS, son el GPS y el radar por efecto Doppler. Que si bien ambos sistemas presentan deficiencias, una combinación adecuada de los dos sistemas, garantiza una buena precisión en el valor de velocidad y en la determinación de la distancia total.

En cuanto a la medida de la pendiente, no se recomienda el uso de sensores inerciales, ni el uso de planos topográficos digitalizados. Se ha desarrollado una metodología para determinar el perfil topográfico en base a la medida de la presión atmosférica y de la velocidad del vehículo, que usa la presión atmosférica local (presión normalizada), para reducir el error debido a los cambios meteorológicos. Se ha demostrado, que de esta forma, se puede medir no solo la altura sobre el nivel del mar sino también la pendiente ascendente o descendente de cada instante durante los ensayos.

Capítulo 8

SUBSISTEMA DE ADQUISICIÓN, REGISTRO Y POSPROCESADO DE DATOS

En un equipo portátil de medida de emisiones, lo importante no solamente es garantizar que la medida de cada uno de los instrumentos involucrados sea correcta (exactitud, repetibilidad y precisión) sino que también es necesario garantizar la calidad del proceso de adquisición y registro de datos, y de forma muy especial del posprocesamiento, pues influyen de forma importante sobre la confiabilidad de los factores de emisión obtenidos. Por lo tanto, en este apartado se aborda sistemáticamente los problemas que se pueden presentar en la adquisición, registro y posprocesado de datos.

8.1 Subsistema de adquisición, registro y acondicionamiento de señales

En un equipo portátil de medida de emisiones, todas las señales de los diferentes instrumentos utilizados deben ser recogidas a través de un sistema de adquisición de datos. Las señales pueden ser analógicas o digitales. Las señales analógicas, son fáciles de integrar en un equipo PEMS, debido a que pueden ser muestreadas de forma simultánea a la frecuencia de muestreo deseada. Las señales analógicas, sean de voltaje, corriente, resistencia o tren de pulsos, tienen la característica de ser proporcionales a la medida del instrumento. Los sistemas convencionales de adquisición de datos (DAQ) son instrumentos de propósito general diseñados para medir señales de voltaje, por lo que las señales de corriente, resistencia o tren de pulsos requieren de un acondicionamiento que transforme esta salida en voltaje continuo.

Por el contrario, la integración como parte de un PEMS de señales digitales requiere del conocimiento de los protocolos de comunicación de cada instrumento y es necesario hacer una subrutina específica para la adquisición de cada una de estas señales. Por la complejidad del mecanismo de comunicación con el instrumento, normalmente las señales digitales no permiten tiempos de muestreo elevados, estando limitados a 1 o máximo 2 datos/segundo, como es el caso del GPS. Pero estas señales tienen la ventaja de no necesitar de una tarjeta de adquisición de datos externa, pues se conectan directamente a los puertos del PC.

Por otro lado, hay instrumentos que no tienen salidas de señal, sino que tienen un software propio y cerrado, en el que se adquiere y almacenan los datos de forma autónoma directamente en el ordenador. Este tipo de instrumentos, se pueden integrar como parte de un PEMS, si tiene la funcionalidad de generar ficheros tipo texto o en algún formato abierto como Excel, con las medidas instantáneas a una frecuencia de muestreo constante y con registro de tiempo. Si los datos los almacena en formatos muy particulares, se puede tener el riesgo de no poder ser integrados dentro del PEMS para su posterior tratamiento.

Y aunque es obvio decirlo, no es posible integrar en un PEMS instrumentos de medida que no tengan salidas de datos o al menos almacenamiento de datos interna (datalogger) que después del ensayo se pueda descargar en algún formato básico como txt.

8.1.1 Frecuencia de muestreo y de registro

Según la normativa americana 40CFR 1065, el sistema PEMS en su conjunto debe ser capaz de actualizar y registrar la medida de cada una de las variables a una frecuencia mínima de 1 Hz, lo que implica que cada uno de los instrumentos involucrados debe ser capaz de actualizar su medida a esta frecuencia y que el sistema de adquisición de datos debe ser capaz de leer todas las señales y registrarlas a esta frecuencia.

Como se comentó en el apartado 3.3.2, la normativa americana 40CFR 1065 parte J, establece los requerimientos mínimos de los PEMS para la medida de emisiones de vehículos pesados. En este tipo de vehículos, las variaciones en las condiciones de carga del motor son relativamente más lentas que en vehículos ligeros en tráfico urbano. Los turismos en tráfico urbano, debido a la baja inercia y las condiciones propias de aleatoriedad de este tipo de tráfico, muestran cambios en las condiciones operativas del motor en tiempo significativamente más cortos. Esta característica hace que para este caso, la frecuencia mínima de muestreo establecida por la normativa americana quede escasa, siendo necesario utilizar frecuencias de muestreo superiores.

Por ejemplo, en la Figura 8-1, se muestran 20 segundos de un ensayo de medida de emisiones con el equipo MIVECO-PEMS, utilizando un turismo diésel Peugeot 406 en tráfico urbano, con un tiempo de muestreo de 0,01 s (100 Hz). En esta figura, se observa que si se reduce la frecuencia de muestreo a 1 Hz, se perdería información importante sobre las condiciones operativas del motor.

Figura 8-1: Variación del dosado y régimen del motor en turismos durante tráfico urbano. Ensayo realizado con el equipo MIVECO-PEMS a 100 Hz.

Para determinar la frecuencia de muestreo mínima, se usa el Teorema de Nyquist (utilizado en teoría de señales), que establece que la frecuencia de muestreo mínima de una señal analógica debe ser el doble de la máxima frecuencia espectral de la señal (Ogata, 1995).

Para el caso especial del caudal, según se discutió en el apartado 6.3, que tiene un carácter altamente pulsante sobre todo en condiciones de ralentí, la frecuencia de muestreo mínima debe ser superior a los 200 Hz para motores de automoción ($2 \text{ carreras de escape por revolución en un motor de 4 tiempos} \times \text{Régimen máximo motor en Hz}$). En la Figura 8-2, se muestra la gráfica de densidad espectral de la señal de caudal, donde se observa el pico a 28 Hz, correspondiente al ralentí y donde se observa que aún a 50 Hz la densidad espectral de energía es importante.

Figura 8-2: Densidad espectral de energía del caudal de gases de escape. Medidas realizadas con MIVECO-PEMS a 100 Hz.

Sin embargo, como ninguna otra de las señales adquiridas en un PEMS tiene carácter oscilatorio, no es necesaria una frecuencia de muestreo tan alta. De todo el conjunto de señales, la más variable es la relación aire/combustible relativa (λ), cuya gráfica de densidad espectral se muestra en la Figura 8-3. Donde se observa que la máxima frecuencia espectral está alrededor de los 4,5 Hz, por lo que la frecuencia mínima de muestreo, adecuada para el estudio de las condiciones transitorias de operación de un motor de un turismo en tráfico real, debe ser superior a los 9 Hz.

Por lo tanto, en el caso del MIVECO-PEMS, se decidió muestrear el caudal y todas las variables con una frecuencia de 1 kHz, que es muy superior a las mínimas requeridas. Pero debido a la imposibilidad de almacenar esta cantidad de información, el caudal y las demás variables se promedian a una frecuencia de 10 Hz, generando ficheros de datos a esta frecuencia, que como se dijo anteriormente, es adecuada para el estudio de las condiciones transitorias de operación de los motores de los turismos en tráfico urbano.

Figura 8-3: Densidad espectral de energía de la relación aire/combustible relativa (λ). Medidas realizadas con MIVECO-PEMS a 100 Hz.

8.1.2 Calibración de señales

En el caso de instrumentos con salidas de señal de tipo analógico, es necesario realizar un proceso de calibración de cada señal, aparte del proceso de calibración propia que requiere el instrumento de medida. Las rectas de calibración, son usadas por el programa de adquisición de datos para convertir los valores de voltaje medidos en las magnitudes físicas medidas. Este proceso de calibración debe realizarse y verificarse periódicamente para garantizar que el sistema de adquisición de datos está interpretando correctamente la información de la señal analógica.

En el proceso de calibración se engloban todas las fuentes de error de la señal, como son el conversor digital/análogo del propio instrumento, el acondicionamiento de la señal (convertidores de señal: frecuencia/voltaje, TTR/voltaje, termopar/voltaje, etc.) y la adquisición de la señal. En el caso de los analizadores de gas, este proceso debe ser realizado directamente con gases de calibración (“gas cero” y “Spam”). Además es necesario verificar la linealidad, según lo establece la normativa americana 40CFR §1065.307.

8.1.3 Sincronización de señales

A pesar de que todas las señales son muestreadas de forma cuasi-instantánea (cuasi debido al multiplexado o conmutación entre las diferentes entradas de la tarjeta de adquisición de datos) las señales no están sincronizadas entre si. Las causas principales de la falta de sincronización entre las señales son:

- Fenómeno de transporte de gases. Como se observa en la Figura 8-4, desde el instante en que se generan las emisiones contaminantes dentro del motor (momento en el que se miden las variables operativas del motor y del vehículo: régimen y velocidad, hasta que salen por el tubo de escape y entran al tubo de muestreo, se genera un primer retraso. Este retraso lo sufre la señal de caudal y todas las señales que se miden directamente en los gases de escape, como son el NO_x y el factor lambda, en el caso del MIVECO-PEMS. Los analizadores de muestra, sufren adicionalmente el tiempo de retraso causado por la línea de muestreo, que depende de la longitud y del diámetro del tubo de muestreo, así como del caudal muestreado, como en el caso del analizador HC discutido con anterioridad en el apartado 5.5.4.

Figura 8-4: Esquema de tiempo de retraso de señales. Adaptado de Aríztegui, 2005.

- Retrasos debidos a la tecnología de medida. En algunos casos, el proceso de medida en si involucra procedimientos internos que toman un determinado tiempo para su realización, causando un retraso. Por ejemplo, en el caso del GPS (comentado en el apartado 7.2.2) la señal de posición medida lleva un retraso, causado por el tiempo que toma la comunicación con los satélites, tiempo que dependen del estado de la ionosfera y en la troposfera.
- Los retrasos electrónicos, debidos al multiplexado de las señales y al tiempo de transmisión de las señales eléctricas son despreciables, por ser varios ordenes de magnitud por debajo del tiempo de muestreo.

Como se comentó en el apartado 2.3, el INRETS (Instituto Francés para la investigación sobre el transporte y la seguridad), en un estudio realizado sobre exactitud en la medida de emisiones en banco de rodillo, recomienda modelar analíticamente los fenómenos de transporte y mezcla para la sincronización de las señales (Joumard et al., 2006). Se estudió adicionalmente la posibilidad de utilizar el procedimiento de sincronización de señales utilizado por Mata (Mata, 2010), basado en hacer coincidir el primer punto en el que se presenta una variación brusca en la derivada del dosado con el primer punto en el que se presente una variación brusca en cada una de las señales de las emisiones, pero se descartó debido a que el tiempo de respuesta de los analizadores puede influir negativamente. Por lo tanto, de manera general para el desarrollo del MIVECO-PEMS se ha optado por hacer una sincronización empírica como parte del

posprocesamiento, que permita recoger directamente todas las causas de retrasos de las diferentes señales. Esta sincronización se basa en los valores de retraso de señal medidos para cada uno de los analizadores, como se mostró en el capítulo 5, pero con la verificación posterior y análisis gráfico de los resultados.

Por ejemplo en la Figura 8-5 a), se observa gráficamente la falta de sincronización entre la señal de dosado ($1/\lambda$) y la medida de CO_2 y en la Figura 8-5 b), se observa estas mismas señales después de aplicar la corrección al tiempo de retraso.

Figura 8-5: Ejemplo de medidas realizadas con el equipo MIVECO-PEMS. a) Señales no sincronizadas. B) Señales sincronizadas.

Por lo tanto, como medida para garantizar la correcta sincronización de las señales, se propone la inspección visual detallada de todas las señales, y la determinación visual del tiempo de retraso en caso necesario. Es muy importante tener en cuenta que el tiempo de retraso está asociado a la longitud de las líneas de muestreo y a las tecnologías de medida en sí. Por lo que, una variación en el muestreo o un cambio de analizador o instrumento, hace necesario una nueva determinación de los tiempos de retraso.

8.1.4 Propagación de errores en la adquisición y registro

Hasta el registro de las medidas en los ficheros, se han venido sumando varias fuentes de error:

- Los errores de calibración de los analizadores, del caudalímetro y de los demás instrumentos de medida.
- Los errores de calibración de las diferentes señales en el sistema de adquisición de datos.
- Errores causados por el tiempo de respuesta de los analizadores.

- Y los errores debidos a la falta de sincronización.

Errores de calibración

Es importante anotar, que los errores de calibración, engloban los errores en la medida en condiciones estacionarias. Para el caso del MIVECO-PEMS, los errores de calibración de los analizadores y del caudalímetro están incluidos dentro de la exactitud medida, puesto que la exactitud se calculó con base en la medida registrada por el sistema de adquisición de datos, y no directamente sobre la medida de los analizadores. Por lo tanto, las exactitudes halladas (Tabla 5.7, Tabla 5.12, Tabla 5.18, Tabla 5.30 y Tabla 6.4) engloban tanto los errores de exactitud del propio equipo, como los errores en la calibración del sistema de adquisición de datos. En la Tabla 8.1 se resumen los valores de exactitud de cada uno de los analizadores de los que se compone el equipo MIVECO-PEMS.

Tabla 8.1 Errores de exactitud y calibración MIVECO-PEMS.

Señal	Exactitud				
	Valor absoluto	VA (Referencia)	Unidad	%	Tabla
NO _x	4,55	420	ppmV	1,1%	5.7
CO	5,8	374	ppmV	1,5%	5.12
CO ₂	0,03	9	% V	0,4%	5.18
HC	2,93	72	ppmC3	4,1%	5.30
Caudal escape	1,7	123	g/s	1,4%	6.2

Errores debidos al tiempo de respuesta de analizadores

A diferencia de los errores de calibración, los errores debidos al tiempo de respuesta miden el error en el que se puede incurrir durante los transitorios de operación y por lo tanto son muy difíciles de determinar. Para una adecuada determinación, sería necesario contar con un equipo de referencia con un tiempo de respuesta muy bajo, menor o igual al tiempo de muestreo del sistema de adquisición de datos, que tecnológicamente, en la actualidad, no es posible tener.

En el equipo MIVECO-PEMS, es posible medir aproximadamente este tipo de error para el caso de la medida de concentración de CO₂ en los gases de escape, puesto que como se comentó ampliamente en el apartado 5.4, esta concentración se calcula a partir de la relación aire/combustible relativa (λ) y se mide directamente por medio de un analizador NDIR.

Como se puede observar en la Tabla 5.14, el tiempo de respuesta del analizador NDIR es más de doce veces mayor que el tiempo de respuesta del medidor lambda, presentado en la Tabla 5.15 ($t_{n-NDIR_CO2} = 7,4$ s & $t_{n-LAMBDA} = 0,6$ s), por lo que el analizador NDIR es incapaz de detectar la concentración real en los picos y en los valles repentinos de emisión, como se puede apreciar en la Figura 5-41. Por lo tanto, se puede observar que a pesar de que el equipo NDIR tenga una adecuada exactitud en condiciones estacionarias

(Tabla 5.18), para la realización de medidas en tiempo real, se puede incurrir en errores instantáneos de hasta $\pm 4,6\%$ V de CO_2 , con un error medio de $\pm 0,66\%$ V. Este error es muy importante para el caso de medidas de emisiones en turismos en tráfico real, puesto que la frecuencia de cambio en las condiciones de operación del motor es muy alta. Para su uso en vehículos pesados este problema no es muy importante, debido a que las condiciones de operación son más estables, salvo en los momentos de arranque y parada.

Con el fin de estimar los errores debidos al tiempo de respuesta de los diferentes analizadores (ver Tabla 5.4, Tabla 5.10, Tabla 5.14 y Tabla 5.26), se asume la hipótesis de que este error es proporcional al tiempo de respuesta del analizador, por lo que con base en la medida de error medido para el analizador NDIR de CO_2 , se pueden estimar los errores en los que se está incurriendo por la suavización de la curva de concentración instantánea de los otros analizadores. En la Tabla 8.2 se muestran los errores estimados, en donde se observa que para el caso del HC los errores en condiciones transitorias podrían ser casi del 12%.

Tabla 8.2 Errores estimados por efecto del tiempo de respuesta MIVECO-PEMS.

Señal	VA (Referencia)	Unidad	Tiempo de respuesta (s)	Propagación de errores	
				Error	%
NO_x	420	ppmV	5,7	23,72	5,6%
CO	374	ppmV	8,3	30,76	8,2%
CO_2	9	% V	7,4	0,66	7,3%
HC	72	ppmC3	11,9	8,49	11,8%

Errores por sincronización

Con respecto a los errores causados por la falta de sincronización, la EPA publicó que para el caso de las pruebas NTE realizado en motores de vehículos pesados en uso, ver apartado 2.5.4 (Fiest et al, 2008), estos errores pueden ser del orden de $\pm 6,7\%$ y $\pm 2\%$ para el caso de CO y NO_x respectivamente (promedio de los errores calculados por los tres métodos de la Tabla 2.7).

Para el caso de la medida de PEMS en turismos en tráfico real, no hay publicado ningún resultado, ni ninguna metodología al respecto, pero en el presente trabajo de tesis, se propone cuantificar este error con base en la variabilidad temporal de las emisiones instantáneas medidas en tráfico real. Por lo tanto, se calcula las diferencias entre valores de emisión sucesivos, muestreados con un periodo de muestreo Δt (en el caso del MIVECO-PEMS $\Delta t = 0,1$ s), con el fin de calcular el error medio en que se puede incurrir cuando hay desalineamiento temporal de un Δt .

En la Tabla 8.3, se muestra, que con base en la variabilidad de los valores de emisión medidos en tráfico real, se puede tener un error puntual máximo de 26 ppmV de NO_x al tener un desalineamiento temporal de 0,1 s, pero en media, esta desalineación puede significar un error de 4,35 ppmV por cada 0,1 s de desalineamiento o 43,5 ppmV por cada segundo de desalineamiento. En la Tabla 8.3, se muestra que para el caso de coches

de encendido por compresión, el NO_x , el problema de desalineación tiene un mayor impacto. También son importantes los errores que causa el desalineamiento temporal sobre la medida de CO_2 y de caudal.

Tabla 8.3 Errores de sincronización al 68,2% de confiabilidad. MIVECO-PEMS.
Resultados con base a ensayos en tráfico real con un turismo diésel.

Señal	VA (Referencia)	Errores por sincronización					
		Máximo	Medio	Unidad	%	Total	Unidad
NO_x	420	25,67	4,35	ppmV/ Δt	1,04%	43,49	ppmV/s
CO	374	2,50	0,36	ppmV/ Δt	0,10%	3,57	ppmV/s
CO_2	9	0,40	0,09	%V/ Δt	0,97%	0,87	%V/s
HC	72	4,17	0,04	ppmV/ Δt	0,06%	0,40	ppmV/s
Caudal escape	123	30,56	2,60	g/s/ Δt	2,11%	25,96	g/s/s

8.2 Subsistema de posprocesamiento de datos

El posprocesamiento de los datos se realiza en varias etapas:

- Cálculo del caudal volumétrico y másico de gases de escape (descrito con profundidad en el apartado 6.3.4)
- Cálculo de caudal másico de emisiones
- Cálculo de consumo instantáneo
- Cálculo de variables dinámicas secundarias (aceleraciones y marcha)
- Cálculo de la potencia de tracción instantánea
- Cálculo de consumo y emisiones totales
- Cálculo de factores de emisión y de consumo
- Caracterización de los ensayos: tiempo de ensayo, tiempo parado, pendiente media, aceleraciones medias, porcentaje de tiempo en cada marcha, régimen medio, velocidad media, velocidad de circulación media (running speed).
- Cálculo de rendimiento global

8.2.1 Cálculo del caudal másico de emisiones

Como se comentó en el apartado 4.2, el caudal másico de cada una de las emisiones ($\dot{m}_i$) se calcula de acuerdo con la ecuación (4-3), con base en los valores instantáneos de concentración medidos por los analizadores (χ_i) y del caudal másico instantáneo de gases de escape ($\dot{m}_E$). Este último se calcula con base en el caudal volumétrico medido ($\dot{V}$) y a la densidad de los gases de escape (ρ_E), de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$\dot{m}_E = \rho_E \cdot \dot{V} = \frac{P_E \cdot M_E}{R \cdot T_E} \cdot \dot{V} \quad (8-1)$$

Donde M_E , T_E y P_E son el peso molecular, la temperatura y presión absoluta de los gases de escape a la altura del caudalímetro.

A pesar de que el peso molecular de los gases de escape se puede considerar como un valor constante, e incluso igual al del aire, este se puede calcular de una forma más precisa con base en la relación aire combustible relativo (λ) y con base en la composición del combustible ($C_aH_bO_d$), como se muestra en las ecuaciones (8-2) y (8-3) para mezcla pobre y rica respectivamente. Donde, los coeficientes estequiométricos e y i , se calculan según las ecuaciones (5-62) y (5-63).

$$M_E = \frac{a \cdot M_{CO_2} + \frac{b}{2} \cdot M_{H_2O} + 3,773 \cdot \lambda \cdot \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) \cdot M_{N_2} + (\lambda - 1) \cdot \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) \cdot M_{O_2}}{a + \frac{b}{2} + 3,773 \cdot \lambda \cdot \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) + (\lambda - 1) \cdot \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right)} \quad (8-2)$$

$$M_E = \frac{a \cdot M_{CO_2} + e \cdot M_{H_2O} + 3,773 \cdot \lambda \cdot \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) \cdot M_{N_2} + i \cdot M_{H_2}}{a + e + 3,773 \cdot \lambda \cdot \left(a + \frac{b}{4} - \frac{c}{2}\right) + i} \quad (8-3)$$

El error en la determinación del caudal másico de cada una de las emisiones, se puede determinar con base en las reglas de propagación de errores, asumiendo la hipótesis de independencia. Esta hipótesis es correcta debido a que las fuentes de error involucradas son de distinta procedencia y por lo tanto independientes. Para este cálculo se tiene en cuenta el error de calibración del analizador (Tabla 8.1) y el error de sincronización, considerando un desalineamiento de la señal mínimo (Tabla 8.3), pues la alineación es verificada cuidadosamente. Adicionalmente, se considera el error debido al tiempo de respuesta (Tabla 8.2) y el error debido a la determinación del caudal (Tabla 8.1). Por lo tanto, el error relativo total es igual a la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de cada uno de los errores relativos. En la Tabla 8.4, se resumen los distintos errores involucrados en la medida y se muestra el error total en la determinación de las emisiones másicas instantáneas del equipo MIVECO-PEMS.

Tabla 8.4 Propagación de errores en el cálculo de emisiones másicas instantáneas.
Equipo MIVECO-PEMS

Emisión másica instantánea	Propagación de errores				
	Calibración	Sincronización	T. de respuesta	Caudal escape	Total
NO _x	1,1%	1,04%	5,6%	1,4%	6,0%
CO	1,5%	0,10%	8,2%	1,4%	8,5%
CO ₂	0,4%	1,00%	7,3%	1,4%	7,5%
HC	4,1%	0,06%	11,8%	1,4%	12,6%

Es de tener en cuenta, que en caso de haber errores de sincronización mayores (del orden de 1,5 segundos) muy probable en el caso de usar un tiempo de muestreo de 1 segundo, los errores de las emisiones másicas instantáneas aumentan considerablemente, por ejemplo en el caso del NO_x , el error puede llegar a ser mayor del 18%. Es importante ver que los mayores errores son debidos al tiempo de respuesta, por lo cual, este factor se vuelve crítico en la configuración de PEMS para su uso en turismos en condiciones de tráfico real.

8.2.2 Cálculo de consumo instantáneo

El consumo instantáneo por su parte, se calcula por balance de carbonos, sea con base en la medida de las emisiones en los gases de escape o con base en la medida de la relación aire/combustible relativa (λ) de la combustión.

El cálculo del consumo instantáneo con base en la medida de las emisiones se basa en el hecho de que todas las moléculas de carbono que contiene el combustible que entra en la cámara de combustión salen en forma de CO_2 principalmente y de CO , HC o partículas. Por lo tanto, el consumo instantáneo de combustible ($\text{C}_a\text{H}_b\text{O}_d$) se puede calcular según la ecuación (8-4), en donde los HC están en base metano y asumiendo que las partículas son enteramente hollín (sólo carbono). Por su parte, el peso molecular del combustible se calcula según la ecuación (8-5).

$$\dot{m}_f = M_f \left(\frac{\dot{m}_{\text{CO}_2}}{a \cdot M_{\text{CO}_2}} + \frac{\dot{m}_{\text{CO}}}{a \cdot M_{\text{CO}}} + \frac{\dot{m}_{\text{HC}}}{a \cdot M_{\text{HC}}} + \frac{\dot{m}_{\text{partículas}}}{a \cdot M_{\text{C}}} \right) \quad (8-4)$$

$$M_f = a \cdot M_{\text{C}} + b \cdot M_{\text{H}} + c \cdot M_{\text{O}} \quad (8-5)$$

Esta forma de calcular el consumo es general, sin importar el grado de riqueza de la mezcla, pero tiene el inconveniente de que depende de 5 medidas instantáneas independientes, como son el caudal de gases de escape, la concentración de CO_2 , de CO , HC y partículas en los gases de escape. Por lo tanto, la incertidumbre en la medida de consumo, calculado de esta forma es aproximadamente del 7,78%, como se muestra en la Tabla 8.5.

Tabla 8.5 Error en el cálculo de consumo con base en medida de emisiones en los gases de escape. Equipo MIVECO-PEMS

Emisiones másicas instantáneas:	CO	CO2	HC	Partículas *3	Consumo gasoil
Máximas en tráfico real (g/h)*1	8,2	26010,5	0,2	18,7	8183,5
Errores relativos, Tabla 8.4	8,5%	7,5%	12,6%	100,0%	
Errores absolutos (g/h)	0,69	1961,19	0,02	18,68	
Consumo comb. equiv. (g/h)	0,34	615,10	0,02	21,48	
% error *2	0,004%	7,516%	0,000%	0,263%	7,78%

*1: Datos corresponden a máximas instantáneas en tráfico urbano real en un Turismo diésel Seat León 2L.

*2: Calculado con base en el consumo instantáneo máximo en tráfico urbano. Turismo diésel Seat León 2L.

*3: Como no ha sido posible verificar el error en la medida de partículas, se asume un error máximo

El consumo instantáneo de combustible en litros ($\dot{V}_f$), se calcula con base en la densidad del combustible (ρ_F), como se muestra en la ecuación (8-6)

$$\dot{V}_f = \dot{m}_F \cdot \rho_F \quad (8-6)$$

Para el caso de motores de encendido por compresión utilizando gasóleo, casi el 99,7% de las moléculas de carbono salen en forma de CO_2 y sólo un 0,2% en forma de CO y menos de 0,1% sale en forma de HC más partículas. Por lo tanto, de forma aproximada, despreciando los HC y las partículas, el consumo instantáneo ($\dot{V}_f$) se puede calcular sabiendo que 1 dm³ de gasóleo equivale a 2650,83 g de CO_2 y a 1689,67 g de CO, y por lo tanto:

$$\dot{V}_f \left[\frac{1}{s} \right] = \frac{\dot{m}_{\text{CO}_2} \left[\frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{s} \right]}{2650,8 \left[\frac{\text{g}_{\text{CO}_2}}{1_{\text{gasoil}}} \right]} + \frac{\dot{m}_{\text{CO}} \left[\frac{\text{g}_{\text{CO}}}{s} \right]}{1689,7 \left[\frac{\text{g}_{\text{CO}}}{1_{\text{gasoil}}} \right]} \quad (8-7)$$

Por otro lado, el cálculo de consumo de combustible se puede también realizar con base únicamente en la medida de la relación aire/combustible relativa (λ), cuya definición se presentó en la ecuación (5-31). Y por lo tanto, para mezcla pobre - ecuación (5-32) y para mezcla rica - ecuación (5-61), el consumo de combustible se puede calcular de acuerdo a la ecuación (8-8).

$$\dot{m}_F = \frac{\dot{m}_E}{\lambda \left(\frac{m_A}{m_F} \right)_s + 1} \quad (8-8)$$

De esta forma, el error el que se puede incurrir por calcular el consumo de esta forma sería igual al error de calcular el caudal másico de CO_2 con base en el factor lambda. En la Tabla 8.6, se muestra los resultados de la propagación de errores, en donde el error de calibración, se midió con base en los periodos estacionarios de un ciclo NEDC (ensayo del 9 de julio de 2009) realizado en paralelo con un OBS-2200; el error de sincronización se midió de igual forma que para las otras emisiones (Tabla 8.3) y el error correspondiente al tiempo de respuesta se considera nulo, debido al reducido tiempo de respuesta (Tabla 5.15).

Tabla 8.6 Error en el cálculo de consumo con base en medida de lambda. Equipo MIVECO-PEMS

	Propagación de errores				
	Calibración	Sincronización	T. de respuesta	Caudal escape	Total
Consumo base λ	2,07%	1,96%	0,0%	1,4%	3,2%

Por lo tanto, comparando los resultados de la Tabla 8.5 y Tabla 8.6, se ve que el menor error para el cálculo de caudal se obtiene a partir de la medida de relación

aire/combustible (λ), debido a la rapidez en la respuesta de este sensor y a los bajos errores de calibración.

8.2.3 Cálculo de variables dinámicas secundarias (aceleraciones y marcha)

La aceleración instantánea es importante para analizar el estilo de conducción utilizado, y para el cálculo de la potencia de tracción que se tratará en el apartado 8.2.4, razón por la cual es importante establecer un procedimiento que permita garantizar la calidad en la determinación de esta variable. La aceleración se puede calcular con base en la velocidad instantánea medida pero debido a los errores inevitables que se tienen en su medida (ver apartado 7.2.2), es aconsejable el uso de un acelerómetro en la dirección del movimiento. El error en que se incurre al calcular la aceleración con base en el valor instantáneo de velocidad es $\pm 10,6\%$. En la Figura 8-6, se muestra la comparación entre la aceleración calculada como derivada de la velocidad y la medida con el acelerómetro.

Figura 8-6: Curvas de aceleración instantánea con el equipo MIVECO-PEMS. Ensayo en tráfico real, Seat León 2.0 L.

De cara a determinar el estilo de conducción, es muy útil conocer la marcha actual del vehículo, pero medirla directamente con sensores ópticos complicaría en demasía el PEMS. Una alternativa viable es obtener esta información a través de la OBD si se tiene acceso a la unidad electrónica del vehículo – ECU. En el caso del MIVECO-PEMS, las medidas deben ser independientes del vehículo utilizado y por lo tanto, no se registran señales a través de la OBD, razón por la cual, en el MIVECO-PEMS se hace uso de la relación de transmisión de cada marcha en los casos en que esta sea conocida.

En los casos en los que la relación de transmisión correspondiente a cada marcha no es conocida, se estima mediante un algoritmo basado en la relación régimen/velocidad instantánea. Esta relación es constante en los momentos en los que el motor está totalmente embragado a la caja de cambios, por lo que es posible, con base en algún ensayo real del coche, encontrar los valores de régimen/velocidad correspondientes a cada marcha y el rango en el que esta relación se mantiene durante los instantes en los que el embrague está accionado parcialmente. En la Figura 8-7 se muestra un tramo de un ensayo en tráfico real de un turismo Seat León, donde se observa las curvas de

régimen, velocidad y la relación régimen/velocidad. Se observan los tramos más o menos constantes de régimen/velocidad que corresponden a cada una de las marchas.

De cara a programar de forma automática la determinación de la marcha, se establecen para cada vehículo unos valores máximos de régimen/velocidad por encima de los cuales se puede considerar que el coche está en una determinada marcha. En el caso del turismo diésel Seat León 2 litros, si la relación régimen/velocidad es mayor que 80, corresponde a primera marcha, si está entre 80 y 49, corresponde a 2ª, si está entre 49 y 36 corresponde a 3ª marcha, si está entre 36 y 24 corresponde a 4ª, si está entre 24 y 22,5 corresponde a 5ª y por último si es menor que 22,5 y mayor que 0 corresponde a 6ª marcha.

Figura 8-7: Determinación de la marcha instantánea en el MIVECO PEMS. Ensayo en tráfico real, Seat León 2.0 L.

8.2.4 Cálculo de la potencia de tracción y potencia motor instantánea

La potencia instantánea de tracción, se calcula conforme a lo expuesto anteriormente en el apartado 4.2., ecuaciones (4-4) y (4-5). Simplemente apuntar, que el coeficiente de resistencia a la rodadura (f_r) es difícil de determinar con exactitud debido a que depende de múltiples factores. Los factores más importantes que influyen son la velocidad, la presión de inflado de los neumáticos, el tipo de neumático, la superficie de rodadura y el vehículo.

En la bibliografía especializada, hay varias expresiones empíricas, como la expresión (8-9) definida para neumáticos de turismo sobre pavimento de hormigón, donde el coeficiente de resistencia a la rodadura está dada en función de velocidad del vehículo (v en km/h) y de dos parámetros (f_o y f_s) que dependen de la presión de inflado de los neumáticos (Aparicio, 2001). Para presiones de inflado entre 2,2 y 2,4 kPa, rango normal de inflado de neumáticos en turismos, f_o es aproximadamente 0,009 y f_s es igual a 0,005.

$$f_r = f_o + f_s \left(\frac{v}{100} \right)^{2,5} \quad (8-9)$$

Otros autores, presentan curvas experimentales de coeficiente de rodadura en función de la velocidad como por ejemplo en el Automotive Handbook de Bosch (Bosch, 1993), cuya expresión empírica se muestra en la ecuación (8-10) . Pero es una práctica normal que se considere el coeficiente de rodadura como constante para velocidades inferiores a 100 km/h. En la Figura 8-8 se muestra la comparación del coeficiente de rodadura según las diferentes fuentes bibliográficas, y se observa la gran diferencia que existe entre ellas, en especial a alta velocidad.

$$f_r = 0,0125 - 2e^{-6} \cdot v + 2e^{-7} \cdot v^2 \quad (8-10)$$

Figura 8-8: Coeficiente de rodadura para turismos sobre pavimento de hormigón/asfalto.

Debido a la falta de acuerdo entre las diferentes fuentes bibliográficas, se ha optado por la curva presentada por Bosch, ecuación (8-10), para el desarrollo del presente trabajo de tesis doctoral, pues es más consistente con la bibliografía general, puesto que está en función de la velocidad y a bajas velocidades es prácticamente constante.

Por lo tanto la expresión completa utilizada para el cálculo de la potencia de tracción instantánea se muestra en la ecuación (8-11).

$$N_t = v \cdot F_t = v \left(m \frac{dv}{dt} + m \cdot g \cdot \text{sena} + m \cdot g \cdot f_r + \frac{1}{2} \cdot C_x \cdot A_{vb} \cdot \rho_a \cdot v_{viento}^2 \right) \quad (8-11)$$

Donde m la masa del vehículo, g la aceleración de la gravedad, a el ángulo de pendiente de la vía, C_x el coeficiente de resistencia aerodinámica, ρ_a la densidad del aire, A_{vb} el área frontal del vehículo y v_{viento} la velocidad del viento.

Por otro lado, la potencia efectiva desarrollada por el motor (N), es igual a la potencia de tracción (N_t) más la potencia de pérdidas mecánicas en el sistema de transmisión del

vehículo ($N_{pérdidas}$), que incluyen las pérdidas en la caja de cambio, en el diferencial y en la transmisión, ecuación (8-12).

$$N = N_t + N_{pérdidas} \quad (8-12)$$

Las pérdidas en el sistema de transmisión se pueden determinar en un banco de rodillos inercial, en donde se acelera el vehículo a plena carga en la relación de marcha directa. Cuando se alcanza la máxima velocidad, se suelta el acelerador y se hace el cambio a punto muerto, dejando que el vehículo se frene por acción de la fuerza de rodadura y por las pérdidas en el sistema de transmisión. En la Figura 8-9, se muestra un esquema de un banco de rodillos inercial.

Figura 8-9: Esquema general de un banco de rodillos inercial. Fotografía del detalle del contacto del neumático con el rodillo.

En un banco de rodillos inercial, cuando se acelera el vehículo, la potencia transmitida al rodillo es igual a la potencia desarrollada por el motor (N_{motor}), menos las pérdidas en el sistema de transmisión ($N_{pérdidas_transmisión}$) y menos las pérdidas de rodadura ($N_{rodadura}$), como se expresa en la ecuación (8-13).

$$N_{rodillo\ aceleración} = N_{motor} - N_{pérdidas\ transmisión} - N_{rodadura} \quad (8-13)$$

Cuando se entra en la fase de desaceleración, se aprieta el ambrague y se deja la marcha engranada y por lo tanto el motor se desacopla, pero todo el sistema de transmisión continúa girando a medida que se frena el vehículo por acción de las pérdidas en el sistema de transmisión y pérdidas de rodadura, como se expresa en la ecuación (8-14)

$$N_{rodillo\ desaceleración} = -N_{pérdidas\ transmisión} - N_{rodadura} \quad (8-14)$$

Y de esta forma, las pérdidas en la transmisión se determinan con base a la potencia de frenado transmitida al rodillo en la fase de desaceleración y las pérdidas de rodadura (de los neumáticos acoplados al rodillo) calculadas con el coeficiente de rodadura de la ecuación (8-10), considerando sólo el porcentaje del peso del vehículo en el eje de tracción.

La potencia transmitida por el vehículo al rodillo ($N_{rodillo}$) se mide teniendo en cuenta que esta se utiliza para acelerar toda la inercia acoplada al rodillo, que es conocida ($I_{rodillo}$). Por lo tanto, la potencia de tracción es igual al producto vectorial del par en el rodillo ($M_{rodillo}$) y la velocidad angular de este ($\omega_{rodillo}$), ecuación (8-15). Donde el par en el rodillo se calcula con base en la inercia del rodillo ($I_{rodillo}$) y la aceleración angular ($a_{rodillo}$), ecuación (8-16).

$$N_{rodillo} = M_{rodillo} \times \omega_{rodillo} \quad (8-15)$$

$$M_{rodillo} = I_{rodillo} \cdot a_{rodillo} \quad (8-16)$$

De esta forma, se obtiene experimentalmente la curva de potencia en el rodillo, que se muestra en la Figura 8-10. La parte de potencia negativa, corresponde a la curva de potencia en el rodillo en el momento de la desaceleración, desacoplando el motor, y que por lo tanto incluye las pérdidas en el sistema de transmisión y las pérdidas de rodadura, que se muestran también en la Figura 8-10.

Figura 8-10: Curva de potencia de tracción real obtenida en banco de rodillos inercial. Peugeot 407 2.0 HDI. Datos reales cortesía de Motorpress Ibérica.

La potencia de pérdidas mecánicas, se puede aproximar a un polinomio de tercer orden, como se muestra en la Figura 8-10 y debido a que estas son diferentes para cada vehículo por depender del tamaño de la caja de cambio, y del sistema de transmisión en si, se considerarán de manera general como se expresa en la expresión (8-17), donde a , b y c son constantes que deben ser determinadas con base en ensayos en banco de prueba inercial para cada vehículo en particular.

$$N_{pérdidas} = a \cdot v^3 + b \cdot v^2 + c \cdot v \quad (8-17)$$

8.2.5 Cálculo de factores de emisión y de consumo

Las ecuaciones básicas utilizadas para la determinación de los factores de emisión, se presentaron en el apartado 4.2, ecuaciones (4-1) y (4-2). Pero aplicados específicamente a la medida en tráfico real, para un determinado recorrido, los factores de emisión se calculan con base en la masa total emitida de cada contaminante y la energía de tracción total consumida en el recorrido realizado, como se expresa en las ecuaciones (8-18) y (8-19). Donde la masa total emitida de cada contaminante (m_i), se calcula con la suma total de la masa instantánea de contaminante ($\dot{m}_i$) emitida en cada intervalo de tiempo (Δt) y energía de tracción total (E_t), se calcula como la sumatoria de los valores instantáneos positivos de potencia de tracción (N_t^+), puesto que los valores negativos corresponden a la disipación de energía en el frenado. Por su parte, el factor de emisión por kilómetro, se calcula con base a la distancia total del recorrido (l).

$$FE_i [\text{g/kW} \cdot \text{h}] = \frac{m_i}{E_t} = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{m}_i [\text{g/h}] \cdot \Delta t}{\sum_{j=1}^n N_t^+ [\text{kW}] \cdot \Delta t} \quad (8-18)$$

$$FE_i [\text{g/km}] = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{m}_i [\text{g/h}] \cdot \Delta t}{l [\text{km}]} \quad (8-19)$$

El cálculo de los factores de consumo (FC), se realiza de forma similar a los factores de emisión. Y así para el caso de medida con PEMS, la expresión para el cálculo del factor de consumo se muestra en la ecuación (8-20) y (8-21), donde $\dot{m}_F$ es el consumo instantáneo de combustible en masa y ρ_F es la densidad del combustible.

$$FC [\text{l/kW} \cdot \text{h}] = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{m}_F [\text{g/h}] \cdot \Delta t}{\sum_{j=1}^n N_t^+ [\text{kW}] \cdot \Delta t} \cdot \frac{1}{\rho_F [\text{g/l}]} \quad (8-20)$$

$$FC [\text{l/100} \cdot \text{km}] = \frac{\sum_{j=1}^n \dot{m}_F [\text{g/h}] \cdot \Delta t}{l [\text{km}]} \cdot \frac{1}{\rho_F [\text{g/l}]} \quad (8-21)$$

8.2.6 Cálculo de rendimiento global

El rendimiento global del vehículo en un determinado recorrido, se calcula como la relación entre la energía de tracción total consumida y la energía calorífica aportada en

cada intervalo de tiempo, como se muestra en la ecuación (8-22), donde H_C es el poder calorífico del combustible.

$$\eta_V = \frac{E_t}{m_F \cdot H_C} = \frac{\sum_{j=1}^n N_t^+ [\text{kW}] \cdot \Delta t}{\sum_{j=1}^n \dot{m}_F [\text{g/h}] \cdot \Delta t} \cdot \frac{1}{H_C [\text{J/g}]} \quad (8-22)$$

8.2.7 Caracterización de los ensayos

Con el fin de realizar un adecuado análisis de resultados de los datos de emisiones medidos en tráfico real, es importante calcular ciertas variables que permiten tener un mayor conocimiento sobre las condiciones del tráfico y el estilo de conducción, como son:

- Tiempo de ensayo. Corresponde al tiempo total desde que el vehículo empieza a realizar el recorrido, hasta que termina de realizarlo. No incluye los tiempos a ralentí de antes ni de después del ensayo.
- Tiempo parado. Corresponde al tiempo total que el vehículo está con velocidad igual a cero, contado desde el instante en que el vehículo empieza el recorrido, hasta que termina.
- Velocidad media de marcha (running speed), se calcula como la relación entre la diferencia tiempo de ensayo menos tiempo parado y la distancia recorrida.
- Velocidad media, se calcula como la relación entre el tiempo de ensayo y la distancia recorrida.
- Pendiente media. Se calcula con base a los datos orográficos del recorrido medidos según se detalló en el apartado 7.4. Esta pendiente media se calcula como la altura sobre el nivel del mar del punto final del recorrido – la altura sobre el nivel del mar del punto de inicio, dividido entre la distancia entre los dos puntos.
- Aceleración media positiva, se calcula, para un determinado recorrido, como el valor promedio de aceleración, considerando sólo los instantes en los que el coche está en movimiento y aumentando su velocidad instantánea.
- Aceleración media negativa, se calcula, para un determinado recorrido, como el valor promedio de aceleración, considerando sólo los instantes en los que el coche está en movimiento y disminuyendo su velocidad instantánea.
- Porcentaje de tiempo en cada marcha, se calcula, para un determinado recorrido, con base en el tiempo total del recorrido menos el tiempo parado.
- Régimen medio, se calcula sólo teniendo en cuenta los periodos de tiempo en los que el coche está en movimiento.

8.3 Conclusiones generales sobre el subsistema de adquisición, registro y posprocesamiento de datos

Aunque es muy importante garantizar la calidad de cada uno de los analizadores y demás instrumentos que integran un equipo portátil de medida de emisiones PEMS, el sistema de adquisición, registro y posprocesamiento de datos es quizás el sistema más importante porque en un equipo de estas características, lo importante no es la medida independiente de cada instrumento, sino el valor de las variables derivadas que requieren del concurso de al menos dos de las variables medidas de forma directa. Las características más importantes que debe tener este subsistema son:

- Frecuencia de muestreo: en base a la dinámica de los motores de vehículos turismo en tráfico real, se comprobó que para la medida de emisiones, la frecuencia de muestreo mínima para los analizadores es de 9 Hz y para la medida de caudal es de 200 Hz. Utilizar una frecuencia menor en el muestreo de las señales implicará una pérdida de información y por consiguiente un aumento en el error acumulado en la determinación de los factores de emisión.
- Base de tiempo común: a pesar de utilizar diferentes frecuencias de muestreo en los diferentes analizadores o demás instrumentos, como parte del posprocesamiento es necesario llevar todas las señales adquiridas a una base de tiempo común, que será mínimo equivalente a la mayor frecuencia de muestreo de los analizadores. En el caso de instrumentos en donde la frecuencia de muestreo sea menor, es necesario transformar la señal empleando alguna técnica de interpolación.
- Sincronización: debido a que un equipo portátil de medida de emisiones PEMS incluye la medida de muchas variables muy diferentes entre sí, los instrumentos y analizadores que lo conforman también tienen tecnologías de medida muy diversas. Esto hace que cada analizador o instrumento tenga su propio tiempo de retardo, que depende por un lado de la tecnología de medida en sí misma y por otro lado del tipo de señal de salida que tenga. Es muy importante garantizar la correcta sincronización de las señales, porque esta puede ser una fuente de error muy importante. Un error en la sincronización de la señal de un analizador de 1,5 segundos puede representar en factor de emisión alrededor de un 20% de error en el factor de emisión calculado. El proceso de sincronización empieza por determinar la variable con menor tiempo de retardo, de tal forma que en base a esta señal se corrijan todas las otras señales. Es necesario realizar ensayos experimentales que permitan determinar el tiempo de retardo de cada señal, teniendo en cuenta las condiciones de montaje tal y como está integrado en el PEMS. También es necesario desarrollar un proceso de revisión visual de las señales sincronizadas antes su utilización porque se pueden presentar problemas puntuales durante los ensayos que afecten el retardo de las señales y que un proceso automático no podría detectar. Un proceso de sincronización adaptativo automático no se ha desarrollado, por la complejidad intrínseca que implica, al ser necesario un estudio profundo de la relación física entre cada una de las variables medidas, que sobrepasa el objetivo de la presente tesis doctoral. Sin embargo, el

desarrollo de un proceso de sincronización adaptativo automático puede ser uno de los objetivos para trabajos futuros en esta línea.

- Calibración: el proceso de calibración implica dos partes: la primera la calibración propia del analizador y la segunda la calibración de la señal de salida y su adecuado reconocimiento por el subsistema de adquisición de datos. Los errores de calibración pueden ser fácilmente reducidos estableciendo procedimientos de recalibración o verificación periódica de la calibración individual de los diferentes analizadores e instrumentos de medida involucrados en un equipo PEMS y de su correcta interpretación por el subsistema de adquisición de datos. Sin embargo, pueden haber errores de calibración propios del analizador o instrumento utilizado que sólo pueden ser corregidos si implica una falta de exactitud en la medida que pueda ser determinada experimentalmente.
- Tiempo de respuesta de los analizadores e instrumentos involucrados: aunque esta no es una característica del subsistema de adquisición, registro y posprocesamiento de las señales, se analiza su influencia sobre las emisiones másicas totales y sobre los factores de emisión calculados. Se observa que por la naturaleza de la medida en tiempo real, sin almacenamiento, el tiempo de respuesta de los analizadores es la principal fuente de error. El comportamiento de los motores de vehículos, en especial de los turismos en tráfico urbano, es principalmente una secuencia de estados transitorios, donde el motor nunca alcanza a trabajar en puntos estables de funcionamiento. Caracterizado por presentar situaciones transitorias con variaciones fuertes en la riqueza de mezcla (en los motores de encendido por compresión) o en el caudal de mezcla admitida (en los motores de encendido provocado) que afectan de forma decisiva sobre la formación de contaminantes estableciéndose picos no sólo de caudal de gases de escape, sino también de emisiones volumétricas de contaminantes. Por esta razón, si el analizador no tiene un bajo tiempo de respuesta, deformará la señal medida aplanándola y no llegará a detectar el verdadero pico de emisión que normalmente coincide con el pico de caudal. Los errores debidos a este fenómeno pueden llegar a ser superiores al 10% durante la determinación de las emisiones másicas. Por esta razón, se comprueba que es más exacta la medida del consumo de combustible a partir de la medida de la relación aire/combustible (factor λ) que en base al balance de carbonos que requiere de la medida de CO_2 , CO , HC y demás contaminantes.

Capítulo 9

VALIDACIÓN DEL EQUIPO MIVECO-PEMS

A semejanza del estudio de validación de los diferentes equipos PEMS comerciales realizado por la Universidad de California y financiado por organismos estatales norteamericanos como son California Air Resources Board (CARB) y la Agencia de Protección Ambiental (US EPA) durante el año 2006 (Miller et al, 2006), se realizó una validación del equipo MIVECO-PEMS. El objetivo de esta validación es contrastar la medida integrada de los factores de emisión y de consumo medidos en el PEMS con respecto a la medida de estos factores utilizando el procedimiento normalizado (método de referencia americano y europeo) que se basa en el muestreo a volumen constante (CVS) con acumulación en bolsas, presentado en el apartado 1.1.4.

Es importante resaltar que en el estudio realizado por la Universidad de California (Miller et al, 2006) se probaron 8 equipos PEMS comerciales diferentes, entre ellos el equipo Horiba OBS-2200, OBS-1300 y el Sensors Semtech D system. En este estudio, se encontró que el equipo con mayor exactitud fue el equipo Sensors Semtech D system, mostrando errores de máximo un +8% en la medida del factor de emisión de NO_x y de un -5% en el factor de emisión de CO_2 y mostrando que algunos de los otros equipos PEMS ensayados presentan errores incluso de hasta -50% y hasta +30% en el factor de emisión de NO_x y de -55% en la medida del factor de emisión de CO_2 . Durante estos ensayos el equipo Horiba OBS-2200 mostró errores desestimando el factor de emisión de NO_x y de CO_2 en más del 10%. Sin embargo, un año más tarde, el equipo OBS-2200, tras un año de intenso trabajo, presentó un mejor resultado de validación, llegando a alrededor de un -7% en el factor de emisión de CO_2 y entre un -5 y -10% en el factor de emisión de NO_x (Nakamura et al, 2007).

En cuanto a los factores de emisión de HC y CO, este estudio, arrojó resultados aún peores, con diferencias entre los diferentes equipos PMS y el procedimiento

normalizado de incluso cerca del 400% para el factor de emisión de HC y entre un 10 y un 50% para el factor de emisión de CO. (Miller et al, 2006)

9.1 Validación de la medida equipo MIVECO-PEMS en laboratorio oficial de certificación de emisiones de vehículos.

Con el fin de comprobar el grado de exactitud de las medidas, se hicieron pruebas en el banco de rodillos del Centro de experimentación y Certificación de vehículos del INTA, de manera similar a las pruebas de validación realizadas por Gierczak et al. (2007). La validación se hizo comparando en ciclos NEDC los valores totales de consumo y factores de emisión de gases, las medidas del equipo MIVECO-PEMS con respecto a la medida en bolsa realizada con los equipos de medida de emisiones usados para la certificación de emisiones de vehículos en banco de rodillos.

Para los ensayos de validación se utilizó el vehículo Peugeot 406 diesel 2 litros y los ensayos consistieron en realizar varias veces el ciclo de conducción europeo NEDC. En la Figura 9-1 se muestra el vehículo Peugeot 406 durante la realización de los ensayos de validación en laboratorio oficial de certificación de emisiones del INTA.

Figura 9-1: Fotografía de la validación del equipo MIVECO-PEMS.

Debido a la imposibilidad física de medir simultáneamente las emisiones con los equipos de análisis de gases del INTA y con el equipo MIVECO-PEMS, fue necesario duplicar el número de ensayos realizados. Se realizaron en total 3 ciclos NEDC midiendo con los equipos de análisis de gases del INTA y 3 ciclos NEDC midiendo únicamente con el equipo MIVECO-PEMS. Como se observa en las gráficas presentadas en la Figura 9-2 y en la Figura 9-3, existe cierta variabilidad de los resultados obtenidos con los equipos del

INTA, especialmente en cuanto a la medida de CO y HC. Esto se debe a propia falta de repetibilidad de los ensayos pues dependen de la pericia del conductor para seguir estrictamente las indicaciones de velocidad del ciclo y dependen también de la temperatura inicial del motor que tiene un importante efecto sobre las emisiones de HC y CO. Los intervalos de confianza que se muestran en las gráficas corresponden a los valores máximos y mínimos medidos.

En la Figura 9-2, se muestran los resultados de validación del consumo de combustible. En esta gráfica además de los valores promedio, máximo y mínimo medidos con los equipos de análisis de gases del INTA, se muestran los valores promedio, máximos y mínimos medidos con el equipo MIVECO-PEMS. Los valores señalados como “MIV LAMBDA” corresponden al factor de consumo obtenido con base en el factor lambda, calculado usando las ecuaciones (8-8) y (8-21). Los valores señalados como “MIVECO CO_x” corresponden al factor de consumo calculado como balance de carbonos sumando las medidas de CO, CO₂ y HC como se expresó en la ecuación (8-7).

Se observa que la medida con base en el factor lambda es más precisa que la realizada con base en el balance de carbono (error del 2,9% con base lambda, frente a un -7,5% por balance de carbonos), por lo que de carácter general se debe usar el factor lambda para la medida del consumo de combustible. El 2,9% de error en la determinación del consumo con base en el factor lambda, es consecuente con el error calculado que se presentó en la Tabla 8.6. El medir aproximadamente un 7,5% menos con base en el balance de carbonos, se explica principalmente por el elevado tiempo de respuesta de los analizadores de CO y CO₂, errores que se previeron con anterioridad y que se relacionan en la Tabla 8.2 y la Tabla 8.5.

Figura 9-2: Consumo de combustible. Resultados de validación equipo MIVECO-PEMS en laboratorio oficial de certificación de emisiones INTA.

En la Figura 9-3, se muestran los resultados de validación del CO₂, CO, HC y NO_x y en la Tabla 9.1 se muestra el resumen de los resultados de validación. Por un lado se observa que el equipo MIVECO-PEMS mide un 7,3% menos de CO₂ comparado con la medida de los equipos de laboratorio. Este resultado es coherente con los errores calculados en la Tabla 8.2 y en la Tabla 8.4, donde se observa que la principal causa de este error es el elevado tiempo de respuesta del analizador. Es importante mencionar que este resultado es muy similar al presentado en la validación del equipo Horiba OBS-2200 conforme con la norma 40CFR parte 1065 (Nakamura et al, 2007).

Figura 9-3: Factor de emisión de CO₂, CO, HC y NO_x. Resultados de validación equipo MIVECO-PEMS en laboratorio oficial de certificación de emisiones INTA. Ciclo NEDC, Peugeot 406 2 lt, Euro 2.

Con relación a la medida de CO, se observa que la variabilidad de las medidas realizadas con los equipos del INTA es muy alta, muy probablemente debido a diferencias en la temperatura del motor del vehículo al comienzo de cada uno de los ensayos. Por ejemplo, la medida más alta que se registró con el equipo MIVECO-PEMS corresponde a un factor de emisión de CO de 3,41 g/km, ensayo en el que la temperatura inicial de los gases de escape fue de 24 °C, en comparación con los otros 2 ensayos en el que se registró un factor de emisión de aproximadamente 1,8 g/km, con una temperatura inicial de los gases de escape entre 81 y 83 °C. Por lo anterior, solamente se puede concluir que las medidas del equipo MIVECO-PEMS están dentro de la variabilidad observada, pero no se puede precisar el error real de medida. También es importante recordar que en el estudio de validación de equipos PEMS realizado por la Universidad de California (Miller et al, 2006), las diferencias encontradas entre el método normalizado y los PEMS ensayados en el mejor de los casos fue del 5%, pero en general los errores de los diferentes equipos PEMS estuvieron en el rango entre el 10 y el 50%.

Con relación a la medida de NO_x, en la Figura 9-3 y en la Tabla 9.1, se observa que el equipo MIVECO-PEMS está sistemáticamente midiendo alrededor de un 8% menos. Esto se puede explicar en gran medida por el cálculo de error presentado en la Tabla 8.4, Este resultado es similar al obtenido por el equipo Horiba OBS-2200 en la validación conforme a la norma americana 40CFR parte 1065, en donde presenta errores entre el -5% y el -10% con respecto a la medida en laboratorio con CVS y acumulación en bolsa (Nakamura et al, 2007).

En cuanto a la medida de HC, se observa que el equipo MIVECO-PEMS mide casi un 30% menos. El error real es mucho mayor que el error predicho en la Tabla 8.4. Esto probablemente se debe a que estos ensayos de validación se hicieron antes de instalar la calefacción y aislar adecuadamente el filtro de entrada a la línea de muestreo de HC. Con estos cambios es esperable que el error quede en el entorno del 12% según se calculó en la Tabla 8.4.

Tabla 9.1 Resumen resultados de validación equipo MIVECO-PEMS en laboratorio oficial de certificación de emisiones INTA.

Factor	Unidad	INTA			MIVECO Promedio	Promedio MIVECO incluido en variabilidad INTA	Error %
		Promedio	MIN	MAX			
Consumo	l/100 km	6,65	6,57	6,77	6,84	no	2,9%
FE CO	g/km	0,29	0,19	0,43	0,22	si	--
FE CO ₂	g/km	175,95	173,49	178,28	163,13	no	-7,3%
FE HC	g/km	0,07	0,06	0,09	0,05	no	-29,2%
FE NO _x	g/km	0,41	0,39	0,43	0,38	no	-7,6%

9.2 Conclusiones generales sobre los ensayos de validación

En base a los resultados de validación presentados, se demuestra que el equipo MIVECO-PEMS tiene un grado de exactitud similar o en algunos casos incluso mejor que algunos de los equipos PEMS que están actualmente en el mercado.

También se comprueba que el equipo MIVECO-PEMS es adecuado para la determinación de factores de emisión y consumo en tráfico real.

El error en la medida del factor de consumo del equipo MIVECO-PEMS es menor del 3%, mientras que los factores de emisión de CO₂ y NO_x medidos con el equipo MIVECO-PEMS son alrededor de un 7% menos que los medidos en el equipo de referencia. Estos errores son similares a los del equipo Horiba OBS-2200 según la validación de conformidad con norma americana 40CFR parte 1065 (Nakamura et al, 2007).

El factor de emisión de HC del equipo MIVECO-PEMS presenta un error muy elevado, debido a que durante los ensayos de validación aún no se había incluido el sistema de calefacción del filtro de la línea calefactada. Por esta razón es de esperar que con las mejoras realizadas el error se haya reducido de forma importante.

En cuanto a la medida del factor de emisión de CO, no se puede concluir debido a la falta de repetitividad de los ensayos, causada por la gran influencia que tiene la temperatura del motor sobre estas emisiones. Para determinar el error en este factor de emisión sería necesario realizar nuevas medidas en donde se pudiera medir de forma simultánea con el equipo normalizado (CVS y almacenamiento en bolsa) y el MIVECO-PEMS.

Por lo anterior, el equipo MIVECO-PEMS se considera apropiado para la determinación de factores de emisión y consumo de vehículos en tráfico real.

Parte III.

Aplicación del equipo MIVECO- PEMS al estudio de emisiones contaminantes y consumo de vehículos en tráfico real

Capítulo 10

METODOLOGÍA DE MEDIDA DE EMISIONES EN TRÁFICO REAL

10.1 Introducción

Figura 10-1: Fotografías de medida de emisiones en tráfico real con el equipo MIVECO-PEMS.

El equipo MIVECO-PEMS se ha ensayado en 5 turismos diesel, 2 todoterreno diesel y 3 turismos gasolina, con 6 conductores diferentes, y se realizaron ensayos en 6 rutas urbanas y en tres rutas extraurbanas demostrándose la universalidad del equipo y la validez de las soluciones que se fueron adoptando durante su investigación y desarrollo.

Durante el año 2009, se obtuvieron 233 ensayos válidos, que suman más de 1300 km recorridos en tráfico real, en su mayoría en tráfico urbano y que corresponden a más de 150 horas de ensayo, de las cuales se guarda registro de emisiones, variables dinámicas del conductor, del coche y datos medioambientales. Durante el año 2010 y 2011 se hicieron más de 1500 km de ensayos válidos en su mayoría extraurbanos. Esta información se ha usado para acometer diferentes estudios, algunos ya publicados y otros aún pendientes de publicación. Capítulo 10

10.2 Planteamiento general

Como se especificó en los objetivos e hipótesis planteados en el apartado 1.4, en esta tercera parte de la tesis doctoral, se aborda el desarrollo de la metodología para la realización de los ensayos en tráfico real, así como el resultado de algunos estudios sobre la influencia de factores exógenos y endógenos sobre el consumo de combustible y las emisiones contaminantes de turismos en tráfico real.

El consumo de combustible y las emisiones instantáneas de un vehículo dependen del punto de operación del motor (par y régimen) y de las condiciones de funcionamiento (calidad de la mezcla, temperatura del motor, aceleración angular o rotacional, cambio instantáneo de par, etc.), que dependen principalmente de la potencia de tracción demandada por el vehículo (tratado antes en el apartado 8.2.4) y de las características del sistema de transmisión. Esta potencia, por su parte está ligada al comportamiento dinámico del vehículo (velocidad, aceleración, etc.), a la pendiente de la carretera, a las características de rodadura y a las características físicas del vehículo (área frontal, masa, resistencia aerodinámica, etc.), como se mostró en la ecuación (8-11).

Por otra parte, desde el punto de vista del vehículo, en tráfico real, el comportamiento dinámico del vehículo está condicionado por factores exógenos y endógenos. Entre los factores exógenos al vehículo están el tipo de calle o infraestructura vial, el tráfico, las condiciones atmosféricas y el estilo de conducción. Por ejemplo, el tipo de calle (número de carriles, calidad del firme, cruces, semáforos, pendiente, etc.), el tráfico (fluido o congestionado) y las condiciones atmosféricas (lluvia o calor, noche o día, etc.) determinan o en muchos casos imponen el límite de velocidad y la necesidad de realizar paradas. Por su parte, el estilo de conducción determina la utilización de las diferentes marchas del vehículo, y la forma de operar sobre el acelerador y el freno.

Los factores endógenos son, entre otros, el tipo y características técnicas del motor, peso y forma del vehículo, características técnicas del sistema de transmisión y sistema de rodadura. Por ejemplo, la relación potencia de motor y peso del vehículo impone un límite a la aceleración. La interacción de todos estos factores da como resultado un determinado patrón de conducción (curva de velocidad), que dependiendo de la marcha

en la que el conductor conduzca, determina en cada instante la condición de operación del motor, y por lo tanto el consumo y las emisiones contaminantes.

Por lo anterior, realizar ensayos en tráfico real para medir las emisiones reales de los vehículos involucra una variabilidad muy elevada, dada por la misma condición cambiante del tráfico, las condiciones atmosféricas, la pendiente de la vía, el estilo de conducción, etc., que debe ser tomada en cuenta y por lo tanto registrada y analizada. Razón por la cual es necesario contar con una metodología que permita, a pesar de la variabilidad que se presenta, obtener información válida y contrastada, útil para estudiar el efecto de los diferentes factores sobre las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

La metodología desarrollada para realizar los ensayos en tráfico real, incluye 5 fases a saber: diseño del ensayo, preparación de los ensayos, realización de los ensayos, posprocesamiento y análisis. En los siguientes subapartados, se detalla cada una de las fases de la metodología, de forma aplicada al caso del análisis de la influencia de los factores exógenos sobre las emisiones y el consumo de combustible.

Figura 10-2: Esquema general metodología de ensayos de emisiones en tráfico real.

10.3 Diseño del ensayo

En esta primera fase, se define el objetivo del ensayo y se determinan las variables de interés sobre las cuales se debe poner especial atención a la hora de realizar los ensayos. También se define el (los) recorrido(s) o circuitos(s) a utilizar, se selecciona el vehículo o los vehículos y se seleccionan los pilotos. Se hace el diseño de experimentos con el fin de garantizar la repetitividad y la aleatorización de los factores y se programan los ensayos. A continuación se detalla cada uno de los aspectos que es necesario desarrollar en esta primera fase de la metodología.

Objetivo e hipótesis de partida

La definición clara del objetivo del estudio es muy importante para el adecuado diseño de los ensayos. Se debe precisar qué se desea conocer y en base a información bibliográfica, experiencia preliminar o intuición técnica se debe fijar así mismo una hipótesis de partida, que indique el resultado esperado.

Escogencia de variables

Con base al objetivo del estudio, es importante seleccionar variables que representen y caractericen adecuadamente las condiciones que se desean estudiar. Para lo cual, es

necesario hacer un estudio bibliográfico específico, en donde se pueda profundizar sobre los aspectos a estudiar y de donde se puedan extraer un número suficiente de variables que representen el fenómeno en cuestión. También es importante introducir en esta parte del estudio, todas las variables que intuitivamente puedan ser significativas para el estudio. En caso de disponer de datos experimentales previos, se puede hacer un análisis estadístico de correlación de todas estas variables para determinar estadísticamente las variables más importantes y el número mínimo de variables independientes que describen completamente el fenómeno.

Selección de circuitos

La selección de los circuitos depende del objetivo del ensayo. Los circuitos deben incluir todos los tipos de calles, cruces y pendientes que se deseen estudiar. Cada uno de los circuitos se debe caracterizar de forma precisa para cada calle o tramo de recorrido, la longitud, tipos de vía, número y tipo de intersecciones viales, perfil orográfico, velocidad sin tráfico, límite de velocidad, ocupación diaria, número de carriles, etc.

En cuanto al **tipo de vía** incluyendo vías urbanas e interurbanas, se han definido 8 tipos de vías:

- Calles locales: calles de 1 sólo carril para circulación. Estas calles son interiores en los diferentes barrios y se caracterizan por tener cruces con ceda el paso, paso de peatones y semáforos en los cruces con calles de mayor circulación. De este tipo de calles no se tienen datos medios de ocupación diaria. Con límite de velocidad en España menores o iguales a 50 km/h.
- Calles secundarias: Estas calles se caracterizan por tener entre 2 y 3 carriles, con ocupaciones medias diarias por carril entre 1500 y 10000 vehículos y ocupación media total entre 3000 y 18000 vehículos diarios. Con límite de velocidad en España de 50 km/h.
- Calles principales: Estas calles se caracterizan por tener entre 3 y 4 carriles, con ocupaciones medias diarias por carril entre 4000 y 9000 vehículos y ocupación media total entre 18000 y 40000 vehículos diarios. Con límite de velocidad en España de 50 km/h.
- Calles arteriales: Son las calles urbanas hacia las cuales afluyen calles principales y secundarias y que recogen un gran porcentaje del transporte urbano. Están caracterizadas por tener más de una calzada y más de 4 carriles por sentido. Las ocupaciones medias diarias por carril son mayores de 6000 vehículos y la ocupación media total están por encima de 50000 vehículos diarios. Con límite de velocidad en España de 50 km/h.
- Carreteras no principales: Carreteras interurbanas en donde el límite de velocidad en España para turismo es de 90 km/h.

- Carreteras principales: Carreteras interurbanas convencionales señalizadas como vías para automóviles y en el resto de carreteras convencionales, siempre que estas últimas tengan un arcén pavimentado de 1,50 metros o más de anchura, o más de un carril para alguno de los sentidos de circulación, donde el límite de velocidad para turismos en España es de 100 km/h.
- Circunvalación o ronda periférica. Es una autopista que circula alrededor o dentro del área metropolitana, rodeándola total o parcialmente, con el fin de evitar que los vehículos que realicen una ruta, sin intención de entrar en ella, eviten atravesarla en travesía. En Madrid, se tienen los anillos M30 y M40, con más de una calzada y mínimo 4 carriles por calzada. Las ocupaciones medias totales son superiores a los 200000 vehículos diarios. Con límites de velocidad por encima de 90 km/h.
- Autopistas y autovías interurbanas, con calzadas independientes para cada sentido de circulación, acceso limitado a y desde las propiedades colindantes y sin cruces al mismo nivel con otras sendas, vías, líneas de ferrocarril o tranvía ni por servidumbre de paso alguna. El límite de velocidad en España para turismos es de 120 km/h.

El **perfil orográfico**, como se comentó en el apartado 7.4, se puede conocer a partir de planos cartográficos, pero la precisión que se obtiene para las zonas urbanas en baja, por lo que se demostró que la medida más precisa se obtiene por medio de la medida de la presión atmosférica.

Una vez definido el recorrido, es necesario recorrerlo varias veces para determinar tiempo medio de recorrido y variaciones máximas por congestión de tráfico. Adicionalmente es necesario verificar el estado actual de la vía, evitando tramos en reparación o donde hayan obras en construcción que puedan ocasionar interrupciones del tráfico.

Selección del vehículo

El vehículo se selecciona principalmente de acuerdo al objetivo del estudio a acometer, teniendo en cuenta el tipo de motor, año de fabricación, normativa de emisiones que cumple y por lo tanto sistema de postratamiento de gases que incluye. A la hora de seleccionar los vehículos es importantes establecer el estado de mantenimiento deseado y el tipo y estado de los neumáticos que se usarán.

Selección de pilotos

La selección de pilotos es de suma importancia, porque los factores de emisión y consumo, como se verá más adelante, son en gran medida afectados por el estilo de conducción. Por lo tanto es importante que el piloto sea experimentado con mínimo de 5 años de experiencia y con formación específica y experiencia en eco-driving (conducción eficiente). Adicionalmente es importante que el conductor tenga capacidad para cambiar el estilo de conducción y de mantener de forma controlada el estilo de conducción durante el recorrido que así lo demande.

De cara a estudiar la influencia del estilo de conducción, no es adecuado el uso de diferentes conductores, porque la conducción suave de un conductor puede ser la conducción normal de otro y la conducción agresiva de uno puede ser la conducción normal del otro.

Diseño experimental

El diseño experimental es uno de los principales factores a tener en cuenta durante esta fase con el fin de garantizar la validez estadística. Se deben determinar las variables de causa y las variables de efecto, para con ellas organizar una matriz y determinar el número de ensayos totales que es necesario realizar de cara a conocer el efecto de cada variable causa sobre cada una de las variables efecto. Normalmente se deben realizar 3 ensayos para cada una de las parejas variable causa-variable efecto. Sin embargo, por limitación de recursos, no siempre es posible realizar la totalidad de los ensayos que se debería hacer. En estos casos es necesario determinar las variables más importantes tanto de entrada como de salida y limitar los ensayos a estas variables. Es importante en todo caso tener la capacidad de registrar los valores de todas las variables “causa” en cada uno de los ensayos a realizar.

Programación de los ensayos

En la programación de ensayos se debe determinar los días y el horario disponible para la realización de los mismos. Es necesario tener en cuenta el tiempo de preparación de los equipos para cada uno de las jornadas de medida (tiempo de calibración, etc.), así como el tiempo máximo que el equipo PEMS puede trabajar en continuo, puesto que las baterías son el mayor limitante del tiempo de ensayo. También es importante tener en cuenta el tiempo y la logística necesaria para el proceso de carga y/o reemplazo de las baterías. Una vez determinado el tiempo neto máximo disponible para la realización de los ensayos en cada una de las jornadas de medida, se debe programar cada uno de los ensayos (según el diseño experimental realizado) de forma aleatoria, con el fin de garantizar la validez estadística de los datos obtenidos, evitando llegar a conclusiones erróneas debidas a errores de calibración que afectan de igual forma a todos los ensayos realizados en una misma jornada de ensayos.

10.4 Preparación de los ensayos

La fase de preparación de los ensayos incluye la instalación del equipo en el interior del vehículo, validación de la instalación en cuanto a garantizar la seguridad vial y la verificación del funcionamiento del equipo PEMS.

Instalación del equipo

En esta fase de preparación remota se hace la instalación del equipo PEMS en el vehículo seleccionado. Es necesario estudiar la distribución volumétrica dentro del

vehículo y las posibilidades de accesibilidad de los equipos al vehículo. En los vehículos turismo de tamaño medio, el equipo MIVECO-PEMS cabe perfectamente en el maletero del coche, como se muestra en la Figura 10-3, sin embargo en los turismos de menor tamaño (por ejemplo en el Toyota Yaris 1.3) es necesario levantar o quitar los asientos traseros.

De forma adicional, debido a que el peso de los equipos es de aproximadamente 50 kg y el peso de cada batería eléctrica es de 60 kg, es necesario hacer un adecuado reparto de masas dentro del vehículo. Se debe dejar previsto que una de las ventanas traseras se ha de usar para a través de esta, entren y salgan los diferentes conductos de gases y conexiones eléctricas de los diferentes sensores.

Figura 10-3: Fotografía de instalación del equipo MIVECO-PEMS.

Para la correcta instalación del equipo MIVECO-PEMS se ha redactado un manual de instalación con ilustraciones e instrucciones detalladas, que permiten garantizar la correcta instalación de los equipos y de esta forma proteger los equipos.

Validación de la instalación

Debido que el equipo MIVECO-PEMS para su funcionamiento requiere la instalación en el exterior del vehículo del tubo de muestreo y algunos instrumentos de medida adicionales, es necesario garantizar que la sujeción de todos estos elementos es segura y que no reducen el campo visual ni tapan los dispositivos de alumbrado y señalización del vehículo. Razón por la cual es necesario que se realice una inspección por parte de una entidad acreditada para garantizar que la instalación del equipo MIVECO-PEMS cumple con las directivas técnicas en cuanto a la seguridad vial y por lo tanto autoricen la circulación del vehículo en tráfico real.

Verificación del funcionamiento del MIVECO-PEMS

Una vez realizada la validación de la instalación exterior del equipo MIVECO-PEMS en cuanto a la seguridad vial, es necesario realizar una verificación de la instalación por parte de un técnico experimentado en el manejo y operación de estos equipos, siguiendo un protocolo preparado para este fin. Incluye una inspección visual del conexionado de los diferentes componentes del equipo, puesta en marcha del equipo MIVECO-PEMS, y la verificación del funcionamiento de cada uno de los analizadores e instrumentos de medida que hacen parte del equipo MIVECO-PEMS.

Una vez superadas estas tres fases, se hace una última verificación con el vehículo en movimiento, midiendo de igual forma cómo si fuera un ensayo definitivo. Los datos medidos durante este ensayo de verificación deben ser analizados en profundidad para detectar problemas en el sistema de adquisición de datos o en la propia medida de los diferentes analizadores y/o demás instrumentos.

10.5 Realización de los ensayos

Una vez verificado el correcto funcionamiento de los equipos dentro del vehículo y hecha la programación de los ensayos se procede a la realización de los mismos. Cada una de las jornadas de medición incluye varias etapas, cuyo registro debe quedar por escrito en la “hojas de ensayo” del día, diseñadas exclusivamente para este fin.

Encendido y calentamiento de los equipos

Los equipos deben estar a la temperatura normal de operación antes de comenzar el proceso de calibración y por lo tanto es necesario encenderlos por lo menos con una hora de antelación. Este proceso de calentamiento se hace alimentando eléctricamente los equipos desde la red para evitar que se descargue las baterías.

Calibración

Se ha desarrollado una hoja de procedimiento para el proceso de calibración de todos los analizadores que integran el equipo MIVECO-PEMS, este proceso es minucioso y se requieren gases de calibración debidamente certificados, como se observa en la Figura 10-4. Una vez calibrado cada uno de los analizadores según lo establece el propio fabricante, se hace una verificación, midiendo la concentración de cada especie en el gas contenido en una bolsa de Tedlar a presión atmosférica llena de gas de calibración, haciendo el muestreo de gas directamente desde el punto de muestreo como se mide de forma normal durante los ensayos. Debido a la dificultad de garantizar la estanqueidad de todas las conexiones de las líneas de muestreo de gas y en especial porque estas líneas trabajan en vacío, se presentan pequeñas filtraciones de aire, que reducen las concentraciones de los diferentes componentes del gas y que por lo tanto reduce el valor de concentración medido en los diferentes analizadores. Así mismo el proceso de calibración electrónico de los analizadores puede no ser perfecto, quedando errores de

“offset” que afectan las medidas realizadas. Para corregir el efecto de estas filtraciones durante los ensayos y los posibles errores de “offset”, se registra en la “hoja de ensayo” el valor de la concentración real de los gases de calibración y la concentración medida desde la bolsa de Tedlar y en la etapa de posprocesamiento de las señales se corrige la concentración medida en base a esta diferencia, como se indicó en el caso del CO₂ apartado 5.4.4.

Figura 10-4: Proceso de calibración del equipo MIVECO-PEMS.

La diferencia entre el valor de calibración y el valor medido en bolsa deben ser menores del 10%, en caso de que sean mayores las diferencias se deben revisar todas las conexiones de las líneas de muestreo.

Cambio de alimentación eléctrica

Una vez esté terminada la calibración y se verifique que es correcta y válida se realiza el cambio de alimentación eléctrica de red hacia el sistema de baterías. Para ello es necesario apagar todos los equipos, cambiar las conexiones a tierra, conectar los equipos a los conjuntos baterías/inversores y reiniciar los equipos. Este procedimiento se debe realizar justo antes de que se desee salir a medir.

Recorrido de calentamiento

Debido a la influencia de la temperatura sobre la formación de emisiones y sobre el funcionamiento de los elementos de postratamiento de los gases de escape (catalizadores), es necesario garantizar que la temperatura del motor sea estable durante

todos los ensayos que se van a realizar durante la jornada de medición. Por esta razón es necesario realizar un recorrido de calentamiento de mínimo 5 km, que además permita constatar que todas las señales se están midiendo correctamente.

Realización de cada uno de los ensayos individuales

Para la realización de cada uno de los ensayos, en el equipo MIVECO-PEMS, es necesario comenzar la adquisición de datos con el vehículo quieto y el motor apagado. Es recomendable dejar el motor a ralentí por lo menos 5 segundos inmediatamente después del encendido y antes de acelerar el motor. El proceso de finalización del ensayo debe ser de forma inversa: estacionar, detener el vehículo, apagar el motor y por último finalizar el proceso de adquisición de datos. De cada uno de los ensayos realizados, aunque sean ensayos fallidos, se debe registrar la hora exacta del comienzo del ensayo, el recorrido, el consumo final del recorrido en caso de que el vehículo permita conocer esta información, distancia total medida por el vehículo y el tipo de conducción utilizado.

Adicionalmente hay una lista de chequeo que permite verificar cada una de las señales medidas para identificar en campo posibles fallos en los equipos. Cualquier anomalía se deja por escrito en la “Hoja de ensayo”, indicando con la mayor precisión posible el problema presentado, la hora exacta en que se presentó y la acción correctiva realizada.

Verificación de los datos registrado durante cada jornada de ensayos

Al finalizar cada una de las jornadas de ensayos es necesario que una persona con experiencia haga la verificación de cada uno de los ficheros registrados, para verificar que todas las señales se hayan medido de forma correcta. Es importante realizar esta labor al finalizar cada jornada porque pueden haber problemas en la medida de alguna variable que sean imperceptibles para el operador del equipo de medida durante la realización de los mismos y que pueden invalidar los mismos. Por lo tanto es importante identificar cuanto antes estos fallos para corregirlos oportunamente y de esta forma no perder tiempo ni recursos.

10.6 Posprocesamiento de datos

Para el posprocesamiento de los datos se desarrolló una aplicación informática sobre la plataforma LabView®, que permite obtener de forma automática los diferentes factores de emisión y consumo, así como todas las variables dependientes comentadas ampliamente en el apartado 8.2. A forma de resumen se relacionan las etapas del posprocesamiento:

- Tratamiento inicial de datos: este subprograma incluye la sincronización de señales, realizada según lo comentado en el apartado 8.1.3; cálculo de caudal según se comentó en el apartado 6.3.4 y el cálculo de la velocidad del vehículo, según se

comentó en el apartado 7.2.2 utilizando tanto la señal del GPS como la señal obtenida del sensor doppler. Así mismo en este subprograma se incluye la generación de un fichero “klm” que permite visualizar en la aplicación Google Earth el recorrido realizado, en base a la posición geográfica medida con el GPS.

- Corrección de las señales por filtraciones y errores de “Offset”, en base a las medidas de verificación de la calibración en bolsa, como se comentó en el apartado anterior.
- Cálculo de las emisiones máscas de CO₂, CO, HC, NO_x y consumo instantáneo.
- Adecuación de las señales provenientes de la estación meteorológica: Incluye la transformación de la base de tiempo propia a la base de tiempo general del sistema MIVECO-PEMS y la sincronización de estas señales con el resto de señales.
- Determinación de la pendiente instantánea en base al perfil orográfico obtenido como se indicó en el apartado 7.4.
- Cálculo de la potencia instantánea de tracción, potencia térmica instantánea consumida y cálculos de rendimiento, como se comentó en el apartado 8.2.4.
- Cálculo de las variables dinámicas secundarias como son las aceleraciones y la marcha actual, según se indicó en el apartado 8.2.3.
- Generación del fichero “unificado” el cual incluye de forma sincronizada todas las variables medidas y calculadas en una base de tiempo común a 10 Hz.
- Finalmente se calcula de forma automática para el recorrido completo y por zonas (definidas manualmente) el tiempo total, el tiempo que el coche estuvo detenido, consumo de combustible (L) y emisiones máscas totales (g), distancia recorrida (km), factores de consumo (L/100 km) y emisión (g/km), pendiente media, aceleración media, tiempo que el vehículo estuvo en cada una de las marchas y el porcentaje de tiempo correspondiente, tiempo que el motor operó por encima de un determinado régimen de giro y el porcentaje correspondiente, promedio de régimen de motor, velocidad media, energía de tracción demandada, la energía consumida (del combustible), el rendimiento medio, temperatura inicial, final y promedio del motor, etc.
- Se organiza un fichero total con los resultados totales y por zonas de cada uno de los ensayos y datos generales de cada ensayo como hora y fecha del ensayo, recorrido, conductor, tipo de calle (según se describió en el apartado 10.3), estilo de conducción utilizado, etc.

10.7 Análisis de resultados

El proceso de análisis de resultados depende fundamentalmente del objetivo de estudio, por lo que no hay una metodología estricta que se adopte para todos los casos. Sin embargo, en la mayoría de los casos se hace un estudio preliminar por recorrido completo, en donde se buscan tendencias generales, que sean independientes de la congestión de tráfico y por lo tanto independientes de la velocidad de circulación. Se hace también estudio de tendencias en base a la influencia de la velocidad de circulación y se suelen hacer también estudios por zonas, partiendo el recorrido completo en tramos que tengan una característica común y que interese conocer su influencia. Para este tipo de análisis se utilizan herramientas estadísticas que permiten encontrar relaciones entre variables y justificar la variabilidad observada en tráfico real. En los capítulos siguientes se mostrarán los principales resultados obtenidos de los diferentes estudios realizados.

Capítulo 11

INFLUENCIA DE FACTORES EXÓGENOS SOBRE EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES

Como se comentó en el apartado 10.2, los factores exógenos son todos aquellos factores ajenos al motor y vehículo que restringen o condicionan la conducción, como pueden ser el nivel de tráfico, la infraestructura vial, el comportamiento dinámico del conductor o estilo de conducción, los límites de velocidad, tipo de calle, condiciones atmosféricas, entre otros. Los factores exógenos son muy variados y el estudio pormenorizado de la influencia de cada uno de los factores exógenos sobre el consumo y las emisiones en tráfico real sobrepasa en gran medida el objetivo de la presente tesis doctoral, sin embargo, se hace el estudio de los factores más relevantes.

11.1 Metodología

11.1.1 Metodología ensayos con turismos diésel en tráfico urbano

Para la realización de este estudio se recorrieron cerca de 1550 kilómetros en tráfico real, equivalentes a aproximadamente 170 horas de medidas de emisiones, consumo y variables dinámicas con 5 vehículos turismo y 2 todoterreno diesel (motor de encendido por compresión) cuyas características se presentan en la Tabla 11.1.

PARTE III: Estudios de aplicación del equipo MIVECO-PEMS

Se probaron 5 conductores diferentes, que han conducido los diferentes vehículos, para eliminar el sesgo que podría causar este parámetro y se les instruyó previamente sobre los diferentes tipos de conducción que deberían realizar.

Tabla 11.1 Características de los vehículos diésel ensayados para el estudio de la influencia de los factores exógenos en turismos diésel.

Denominación MIVECO	Marca	Denominación Comercial	Modelo	Marca motor	Tipo motor	Cilindrada (cc)	Potencia máx (kW)	Peso (kg)	Normativa EURO
P406	PEUGEOT	406 BK STD T 2,1	1998	PEUGEOT	D-P8C	2088	80	1485	EU2
L2005	RENAULT	LAGUNA	2005	RENAULT	D/F 9Q D6	1870	88	1350	EU3
C4	CITROEN	C4 HDI92 LX	2007	CITROEN	D-9HX	1560	66,2	1332	EU4
L2008	RENAULT	LAGUNA	2008	RENAULT	D/K 9K 37	1461	81	1386	EU5
SL	SEAT	LEON	2008	VOLKSWAGEN	(D) BKD	1968	103	1315	EU4
LR 9MY	LAND ROVER	FREELANDER TD4 2,2 S	2009	LAND ROVER	Diesel (MEC)	2179	118	1835	EU4
LR 10MY	LAND ROVER	FREELANDER TD4_e 2,2 S	2010	LAND ROVER	Diesel (MEC)	2179	118	1855	EU4

Para la realización de este estudio se utilizaron dos circuitos de aproximadamente 5 km de distancia en la ciudad de Madrid, el circuito Madrid (CM0) y el circuito Tetuán (LR1), recorridos que se pueden observar en la Figura 11-1. El circuito Madrid (CM0), tiene la característica de que incluye todos los tipos de calles que se pueden encontrar en el centro de una ciudad como Madrid (locales, secundarias, principales y arteriales), y el circuito Tetuán tiene la característica de una alta ocupación diaria y altos niveles de congestión de tráfico en horas punta.

Figura 11-1: Circuitos utilizados para estudio de influencia de factores exógenos en turismos diésel. a) Circuito Madrid (CM0) y b) Circuito Tetuán (LR1).

11.1.3 Metodología ensayos en tráfico extraurbano

Para los ensayos en tráfico extraurbano, se utilizó una ruta de 48,7 km en una de las autopistas más importantes de acceso a Madrid (A6), como se muestra en la Figura 11-3. Esta autopista fue elegida por que incluye tramos con diferentes grados de pendientes que permite el estudio de este factor sobre las emisiones contaminantes y el consumo como se muestra en la Figura 11-4. Para el estudio por zonas, se dividió el recorrido cada 500 metros. En total se tiene registro de 550 km de recorrido, que equivalen a 6 horas de datos registrados cada 0,1 segundos.

Figura 11-3: Circuito Torrelodones.

Los ensayos se realizaron con el turismo diésel Euro 2 Peugeot 406, cuyas características se presentaron en la Tabla 11.1.

Figura 11-4: Perfil orográfico circuito Torrelodones.

11.2 Factores exógenos

Escogencia preliminar de variables

En base a las aportaciones de Vlieger (Vlieger, 1997; Vlieger et al, 2000), St. Denis (St. Denis et al, 1994), André (André, 1991; André et al, 1994), Pelkmans (Pelkmans & Debal, 2006), Ericsson (Ericsson, 2001; Ericsson, 2000; Ericsson et al, 2004; Brundell-Freij & Ericsson, 2005), Sunwoo (Sunwoo et al, 1999), Holmén (Holmén & Niemeier, 1998), Takada (Takada et al, 2007), se hizo un estudio inicial para determinar las variables que pueden representar los diferentes factores exógenos que se estudiarán como son el estilo de conducción, el nivel de tráfico y la infraestructura vial..

Se analizó estadísticamente cada una de las variables con base a datos experimentales obtenidos en ensayos preliminares realizados durante el año 2006. En la Tabla 11.3, se muestra el grado de correlación entre algunas de las variables dinámicas estudiadas (derivadas del perfil de velocidad) y los factores exógenos estudiados: tipo de calle, estilo de conducción y el nivel de tráfico. Se utiliza el signo mas (+) para indicar que hay correlación entre las variables estudiadas de forma directa, el signo menos (-) para indicar que existe una correlación de forma inversa y dobles o triples indicando una mayor correlación directa o inversa. El símbolo “0” indica que no se observa correlación entre las variables.

Tabla 11.3 Correlación entre variables dinámicas y factores exógenos.

	Velocidad Media	Promedio (Vel>0)	Veloc. Máxima	Desviación Veloc.	Vel. Max/Vel.Media	Aceler. Positiva	Max Acel.Post.
TIPO DE CALLE	++	++	++	0	++	++	++
- en cond.suave	++	++	++	0	++	++	++
- en cond.normal	++	++	++	0	++	++	+
- en cond.brusca	++	++	++	0	++	++	++
TIPO DE CONDUCCIÓN	0	+	0	0	0	++	++
- en calle local	0	+	0	0	+	++	++
- en calle secund	0	0	0	0	0	++	+
- en calle princip	+	++	+	0	0	+	++
TRÁFICO	++	++	++	--	--	++	++
- en calle local	++	++	++	--	--	++	++
- en calle secund	+	++	++	--	--	++	++
- en calle princip	++	++	++	--	+	++	++
CONDUCTOR	0	+	+	0	+	++	+

Con base en este preestudio, se seleccionó un conjunto de variables relevantes, clasificadas en cuatro grupos como se muestra a continuación:

- Estilo de conducción: Las variables que mejor determinan el estilo de conducción son el tiempo por encima de unas ciertas revoluciones, el porcentaje de tiempo que

se utiliza cada una de las marchas, la demanda de la aceleración a una determinada velocidad, la aceleración media positiva y aceleración media negativa.

- Variables dinámicas, que definen el patrón de conducción o perfil de velocidad, tenemos la velocidad media, el número de paradas por kilómetro y el tiempo de parada.
- Variables de infraestructura: En este bloque se encuentran variables debidas al recorrido como: el tipo de calle, la función de la calle, ocupación media diaria, número de carriles, localización y pendiente de la vía.
- Variables de tráfico: Se estudia el tiempo parado (velocidad=0) y el cociente entre velocidad media del recorrido y velocidad media sin tráfico. La velocidad media sin tráfico se determina experimentalmente realizando ensayos en días no hábiles y en horas donde el tráfico es mínimo, por ejemplo los domingos en las horas de la mañana.

11.2.1 Estilo de conducción

El estilo de conducción se refiere a aspectos concretos de la acción propia de conducir que el conductor puede elegir libremente, a pesar de estar condicionado por agentes externos como pueden ser la configuración de las calles y carreteras (pendiente, cruces por kilómetro, etc.), la congestión del tráfico y las condiciones climáticas y visuales (presencia de niebla, lluvia fuerte, oscuridad, etc.), entre otros. El comportamiento dinámico del conductor se refleja en la forma concreta como éste interacciona sobre los controles del vehículo: acelerador, embrague, freno, marcha y volante. Sin embargo, el presente trabajo de investigación no se basa en medidas directas de las actuaciones del conductor sobre estos controles, sino sobre las variables dinámicas medidas en tiempo real, que están directamente afectadas por el comportamiento dinámico del conductor, como pueden ser la aceleración del vehículo, el régimen de giro del motor y el uso de las diferentes marchas.

Se han estudiado tres estilos de conducción:

- Conducción suave, eficiente o “eco-driving”, caracterizada por arrancar el motor sin pisar el acelerador; iniciar la marcha inmediatamente después del arranque en el caso del motor a gasolina o esperar unos segundos antes de comenzar la marcha en vehículos con motor diésel, cambiar a la segunda marcha a los 2 segundos o 6 metros, hacer los cambios de marcha entre 1800 y 2500 rpm en vehículos con motor gasolina y entre 1300 y 2000 en vehículos con motor diésel y predominio del uso de marchas largas (5ª y 6ª), definido por el TNO (Vermeuleun, 2006; Van Mierlo et al., 2004).
- Conducción normal
- Conducción agresiva, definida como el estilo contrario al eco-driving y caracterizado por aceleraciones fuertes, uso prolongado de la primera y segunda marcha y

conducción a régimen de motor elevado (mayor de 2500 rpm en vehículos con motor gasolina y de 2000 rpm en vehículos con motor diésel. (Casanova et al., 2005).

Índice de comportamiento dinámico en turismos diésel

Parte de este estudio se presentó en el Transport and Air Pollution 18th International Symposium TAP 2010 realizado en Zurich en mayo de 2010, con el título de “Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car” (Fonseca et al, 2010). Se adjunta en el Anexo 0.

En base a los datos registrados en los ensayos realizados en tráfico real con los 5 turismos diésel y con los 5 conductores experimentados, en donde se establecía de antemano el tipo de conducción que se debía utilizar para cada ensayo de acuerdo a la programación, se estudió estadísticamente las variables dinámicas que son afectadas por el estilo de conducción.

De esta forma se determinó que los parámetros más influyentes en cuanto a calificar una pauta de conducción, como agresiva, normal o suave son: el porcentaje de tiempo que el conductor circula en primera ($\%t_1$) y en segunda marcha ($\%t_2$), el porcentaje de tiempo que se conduce a más de 1850 rpm para coches de encendido por compresión ($\%t_{>1850rpm}$) y la aceleración media positiva (a_{med+}) [m/s²] – que no incluye períodos de desaceleración. Se determinó una expresión empírica que permite calcular el Índice de Comportamiento Dinámico ($ID_{diésel}$), para turismos diesel en tráfico urbano, en base a las anteriores variables y que se muestra en la ecuación (11-1)

$$ID_{diésel} = 1,58e^{-3} \cdot \%t_1 + 2,05e^{-3} \cdot \%t_2 + 1,48e^{-3} \cdot \%t_{>1850rpm} + 2,10e^{-1} \cdot a_{med+} \quad (11-1)$$

Con base en este criterio, se pueden distinguir los rangos de aceleraciones típicas que se pueden dar en los tres tipos de conducción para las distintas velocidades medias que se pueden observar en una ciudad como Madrid, como se puede apreciar en la Figura 11-5.

Figura 11-5: Aceleración media en tráfico real urbano por tipo de conducción.

Este índice dinámico ($ID_{diésel}$) así definido, es un valor positivo entre 0 y 1,2 aproximadamente. En la Figura 11-6 se muestra la distribución de probabilidad del índice dinámico ($ID_{diésel}$) del conjunto de los ensayos realizados para cada uno de los estilos de conducción de acuerdo a la intención del conductor.

En los gráficos de probabilidad de la Figura 11-6, se constata que el conductor no siempre conduce con el estilo de conducción deseado. La razón principal es quizás la variabilidad intrínseca del tráfico urbano, que hace que por motivos de seguridad el conductor modifique la forma de conducir. Otra causa puede ser también la distracción del propio conductor. Por lo tanto, el índice de comportamiento dinámico, calculado durante un recorrido urbano según la ecuación (11-1), puede ser utilizado para reclasificar los ensayos de acuerdo al estilo de conducción realmente utilizado. De esta forma, se establece como conducción suave aquella cuyo $ID_{diésel}$ sea menor o igual a 0,4, conducción normal aquella con $0,4 < ID_{diésel} < 0,6$ y conducción agresiva con $ID_{diésel}$ mayor o igual a 0,6. Los valores típicos de $ID_{diésel}$ para cada tipo de conducción son: 0,33 para conducción suave, 0,49 para conducción normal y 0,74 para conducción agresiva.

Figura 11-6: Distribución de probabilidad del $ID_{diésel}$ de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.

Índice de comportamiento dinámico en turismos gasolina

En el caso de los dos vehículos turismo gasolina, se realizaron ensayos con los tres estilos de conducción. Con los datos promedio por zonas, según zonificación mostrada en la Figura 11-2, se realizó un estudio estadístico para determinar las variables dinámicas que más reflejan el estilo de conducción utilizado. En el caso de los coches ensayados se determinó que el porcentaje que el conductor utiliza una determinada marcha no es significativo, porque los dos coches ensayados, aunque con tamaño de motor igual, tienen una caja de transmisión con diferente relación de marchas, que hace que no sea igual la velocidad que desarrolla cada vehículo en cada una de las marchas. Por lo anterior para la definición del índice de comportamiento dinámico se ha utilizado únicamente las variables: aceleración media positiva (a_{med+}) [$\text{km}\cdot\text{h}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$] y promedio de régimen utilizado ($regimen_{med}$) [$\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$], según la expresión empírica de la ecuación (11-2).

$$ID_{gasolina} = -8,36e^{-2} + 2,55e^{-4} \cdot regimen_{med} + 3,74e^{-1} \cdot a_{med+} \quad (11-2)$$

Figura 11-7: Distribución de probabilidad del $ID_{gasolina}$ de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.

En el caso de las pruebas con los turismos gasolina, la conducción agresiva se diferencia de forma importante con respecto a los otros dos estilos de conducción, pero no se encontró prácticamente diferencias entre la conducción normal y suave, incluso la conducción normal resultó ser en media más suave que la realizada con la intención de ser suave, como se muestra en los histogramas presentados en la Figura 11-12. La falta de diferencia en el estilo de conducción normal y suave se debe muy probablemente a la falta de pericia del conductor que se utilizó para la realización de los ensayos. De todas formas, para el estudio de la influencia de los factores exógenos sobre las emisiones y el consumo se han reclasificado los resultados por zonas en base al índice de comportamiento dinámico de la ecuación (11-2), considerando la conducción agresiva $ID_{gasolina} > 0,6$; conducción normal con $ID_{gasolina}$ entre 0,4 y 0,6 y la conducción suave con

$ID_{gasolina} < 0,4$. De esta forma, los valores típicos de cada estilo de conducción son conducción agresiva $ID_{gasolina} = 0,69$, conducción normal $ID_{gasolina} = 0,5$ y conducción suave $ID_{gasolina} = 0,35$.

11.2.2 Infraestructura vial

Importancia de la Calle

En el caso de las vías urbanas, se definió empíricamente un factor que llamamos Importancia de la Calle ($impC$) que permite determinar el tipo de vía urbana, según la clasificación presentada en el apartado 10.3, en base al dato de Ocupación Media Diaria (OMD) y al número de carriles de cada vía (información disponible en la página web del Ayuntamiento de Madrid). La ecuación utilizada para el cálculo de la $impC$ se muestra en la ecuación (11-3). De esta forma, las calles locales son aquellas con un $impC$ menos o igual a 2000, las calles secundarias tienen un $impC$ entre 2000 y 30000, las calles principales un $impC$ entre 30000 y 65000 y las calles arteriales las que tienen un $impC$ mayor a 65000.

$$impC = OMD \cdot \sqrt{carriles} \quad (11-3)$$

Tipo de Calle

También se ha definido un índice que llamamos Tipo de calle (TC), con valores entre 0 y 1, en función sólo del límite de velocidad para vías extraurbanas y en función del factor de importancia de la calle ($impC$) para las vías urbanas, donde el límite de velocidad es de 50 km/h, como se muestra en la ecuación (11-4) y (11-5).

$$TC = \frac{\sqrt{impC}}{500} * \frac{50 \cdot [km/h]}{120 [km/h]} \quad \text{Vías urbanas} \quad (11-4)$$

$$TC = \frac{LimV}{120 [km/h]} \quad \text{Vías interurbanas} \quad (11-5)$$

De esta forma las calles locales tienen un índice de calle menor a 0,12, las calles secundarias entre 0,12 y 0,22, las calles principales un TC entre 0,22 y 0,35 y las calles arteriales entre 0,35 y 0,5. Para las vías extraurbanas, las carreteras no principales el TC tiene un valor de 0,75, en las carreteras principales $TC = 0,83$ y autopistas $TC = 1$.

Para un recorrido determinado, el Tipo de calle se calcula como el promedio de ponderado del Tipo de calle (TC_i) y la distancia de cada tramo (d_i) que conforma el circuito, como se expresa en la ecuación (11-6).

$$\overline{TC} = \frac{\sum_{i=1}^n TC_i \cdot d_i}{\sum_{i=1}^n d_i} \quad (11-6)$$

Velocidad media sin tráfico

Adicionalmente a los ensayos realizados para medir emisiones y consumo con el equipo MIVECO-PEMS, se realizaron varios ensayos para medir velocidad de circulación media sin tráfico. Estos ensayos se realizaron en domingo en las horas de la mañana, con un estilo de conducción normal para garantizar que la velocidad media registrada es debida únicamente a la limitación impuesta únicamente por la estructura vial: pendiente de la vía, cruces, semáforos, tipo de calle, límite de velocidad, etc.

Los resultados de estos ensayos se estudiaron estadísticamente y de encontró que la velocidad media sin tráfico ($v_{s_tráfico}$) para calles urbanas, se pudo calcular en función de la pendiente de la vía (*Pendiente* en %), el Tipo de calle (*TC*) calculado según la ecuación (11-6) y la cantidad de cruces o intersecciones por kilómetro (*cruceskm*), como me muestra en la ecuación (11-7). Relación empírica obtenida con un $R^2=83,4\%$ y un $P\text{-value}<0,01$ indicando que esta relación tiene un 99% de nivel de confianza.

$$v_{s_tráfico} = 34,25 - 0,9 \cdot Pendiente(\%) + 32,28 \cdot \overline{TC} - 2,15 \cdot cruceskm \quad (11-7)$$

Índice de calle

Se define el índice de calle, como una variable entre 0 y 1, que permite medir el grado de restricción que la infraestructura vial impone a cualquier conductor al realizar un recorrido determinado. El índice de calle está directamente relacionado con la velocidad media sin tráfico, que se puede medir directamente o calcular según la ecuación (11-7). De esta forma el índice de calle se calcula como se indica en la ecuación (11-8).

$$IC = 1,25 - 0,025 \cdot v_{s_tráfico} \quad (11-8)$$

11.2.3 Nivel de tráfico

Parte de este estudio se presentó en el 17th Transport and Air Pollution Symposium and 3rd Environment and Transport Symposium, realizado en Toulouse, France, con el título de “Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions”. (Casanova et al, 2009). Se adjunta en el anexo 0.

Para cuantificar el nivel de tráfico o la congestión, se define el Índice de tráfico (IT) como la variable entre 0 y 1 que permite cuantificar el grado de restricción que el nivel de tráfico impone a cualquier conductor al realizar un recorrido determinado. Para el estudio de esta variable se estudió la relación que existe entre dos variables que están muy relacionadas con el nivel de congestión vial y que son el tiempo medio que el vehículo está parado por cruce o intersección y la relación entre la velocidad media y la velocidad media sin tráfico ($v_{s_tráfico}$). En la Figura 11-8 se muestra la relación entre estas dos variables.

Figura 11-8: Distribución de probabilidad del ID , de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.

En base a los ensayos realizados se demuestra estadísticamente que la velocidad media de circulación, el tiempo parado por cruce o intersección y la relación entre la velocidad media y la velocidad media sin tráfico ($v_{s_tráfico}$) no tienen correlación con el estilo de conducción, como se muestra gráficamente en la Figura 11-14 para el caso de la velocidad media.

Figura 11-9: Relación entre estilo de conducción y velocidad media de circulación.

Adicionalmente, como se demostró en el apartado 11.2.2, la velocidad media sin tráfico ($v_{s_tráfico}$) depende únicamente de la infraestructura vial. Por lo tanto, el índice de tráfico (IT) se define únicamente en función a la relación entre la velocidad media y la velocidad media sin tráfico, como se muestra en la ecuación (11-9).

$$IT = 1 - 0,67 \frac{v_{media}}{v_{s_tráfico}} \quad (11-9)$$

Esto hace posible obtener una ecuación para predecir la velocidad media de circulación para una determinada ruta urbana en base al índice de calle (IC) y al índice de tráfico (IT), como se muestra en la ecuación (11-10) y en la Figura 11-10.

$$v_{media} = 60,3 - 46,8 \cdot IT - 30,1 \cdot IC ; R^2=95\%, P\text{-value}=0,00 \quad (11-10)$$

Predicciones basadas en calles con 0% de pendiente para la ciudad de Madrid

Figura 11-10: Velocidad media de circulación en función del Índice de tráfico y del tipo de calle.

11.3 Influencia de los factores exógenos en turismos diesel en tráfico urbano

Este estudio se presentó en el Transport and Air Pollution 18th International Symposium TAP 2010 realizado en Zurich en mayo de 2010, con el título de “Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car” (Fonseca et al, 2010). Se adjunta en el anexo 0.

Influencia sobre el consumo y factor de CO_2

Los diferentes ensayos realizados con los 5 turismos diésel, se dividieron en zonas con pendiente similar y se calculó para estas zonas el consumo y los diferentes factores de emisión. Para explicar la variabilidad observada en cuanto al consumo de combustible y al factor de emisión de CO_2 de los diferentes vehículos ensayados, se hizo un estudio de regresión múltiple. De esta forma se estudió de correlación sobre la influencia de las diferentes variables relacionadas con el estilo de conducción, la infraestructura vial y el nivel de tráfico sobre el consumo y las emisiones de CO_2 . Se observó que las variables más significativas son la velocidad media de circulación, que como se vio en la ecuación (11-10) depende de la nivel de tráfico y del tipo de calle, la pendiente de la vía (%) y del

estilo de conducción representado por el índice de comportamiento dinámico. Por lo tanto, el factor de consumo (FC) en L/100 km y el factor de emisión de CO_2 en tráfico urbano para cada uno de los vehículos ensayados, se puede expresar de forma general de acuerdo a las ecuaciones (11-11) y (11-12).

$$FC \text{ (L/100 km)} = k_0 + k_1 \cdot \frac{1}{v_{media}} + k_2 \cdot Pendiente(\%) + k_3 \cdot ID \quad (11-11)$$

$$FE_{CO_2} \text{ (g/km)} = k_0 + k_1 \cdot \frac{1}{v_{media}} + k_2 \cdot Pendiente(\%) + k_3 \cdot ID \quad (11-12)$$

Se observa que alrededor del 90% de la variabilidad observada en el consumo, y por consiguiente en el factor de emisión de CO_2 , se puede explicar por medio de tres variables: la velocidad media de circulación (v_{media}), la pendiente de la vía dada en porcentaje ($Pendiente$) y el índice de comportamiento dinámico (ID). En la Tabla 11.4 y en la Tabla 11.5 se relaciona los coeficientes k_0 , k_1 , k_2 y k_3 correspondientes al factor de consumo (FC) y al factor de emisión de CO_2 para los diferentes vehículos ensayados, así como los parámetros estadísticos correspondientes.

Tabla 11.4 Constantes para el cálculo del factor de consumo según ecuación (11-11).

Vehículo	k0	k1	k2	k3	P-Value	R-squared (%)	Nivel de confianza
Peugeot 406	-0,347	48,236	0,590	12,885	0,0000	90,1	99%
R_Laguna 2005	0,120	41,131	0,662	12,835	0,0000	84,6	99%
Citröen C4	0,408	39,007	0,639	8,802	0,0000	87,1	99%
R_Laguna 2008	-0,927	41,982	0,748	14,957	0,0000	87,3	99%
Seat León	-1,697	34,679	0,877	17,601	0,0000	90,8	99%

A manera de ejemplo, para el vehículo Peugeot 406 en la Figura 11-12 se muestra la gráfica de comparación entre los valores medidos (observados) y los valores explicados (predichos). En esta figura, se observa que las relaciones empíricas halladas explican muy bien la variabilidad observada.

Tabla 11.5 Constantes del factor de emisión de CO_2 según ecuación (11-12).

Vehículo	k0	k1	k2	k3	P-Value	R-squared (%)	Nivel de confianza
Peugeot 406	-9,195	1.276,860	15,644	341,436	0,0000	91,1273	99%
R_Laguna 2005	2,843	1.083,310	17,527	340,477	0,0000	87,2467	99%
Citröen C4	9,610	1.029,670	16,697	234,308	0,0000	87,1327	99%
R_Laguna 2008	-25,492	1.088,730	19,677	398,589	0,0000	87,2467	99%
Seat León	9,610	1.029,670	16,697	234,308	0,0000	90,8437	99%

En la Figura 11-12, se muestra de forma independiente la influencia del estilo de conducción sobre el factor de emisión de CO_2 para el vehículo Renault Laguna 2005. En esta gráfica también se incluyen las tendencias correspondientes a diferentes

velocidades medias de circulación (10, 20 y 40 km/h). Se observa también el efecto tan marcado e influyente de la agresividad sobre la emisión de CO₂ y el consumo.

Figura 11-11: Distribución de probabilidad del ID, de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.

Figura 11-12: Influencia del estilo de conducción sobre el factor de emisión de CO₂ para el vehículo Renault Laguna 2005 en tráfico real urbano. Tendencias calculadas para pendiente del 0%

Figura 11-13: Influencia de la velocidad media de circulación, la pendiente y el estilo de conducción sobre el factor de emisión de CO₂ para el vehículo Renault Laguna 2005 en tráfico real urbano.

A modo de ejemplo, en la Figura 11-13 se muestra la variabilidad del factor de consumo ($L/100\text{ km}$) en relación a la velocidad media de circulación para el vehículo Renault Laguna 2005, apreciándose la relación inversa que existe entre estas dos variables. Se muestra también la tendencia para los tres tipos de conducción considerando para cada tipo el valor típico de Índice de Comportamiento Dinámico (ID): 0,33 para conducción suave, 0,49 para conducción normal y 0,74 para conducción agresiva. En esta gráfica se muestra también el efecto de la pendiente, aumentando significativamente el consumo con una pendiente de sólo el 0,8%. En esta gráfica también se muestra el factor de consumo utilizado en la metodología Copert 4 para la realización de inventarios de emisiones correspondiente a vehículos turismo diésel Euro 3 (Ntziachristos y Samaras, 2012), donde se observa que los factores de Copert más o menos se corresponden con los factores de emisión medidos para este vehículo. Gráficas similares a esta se han obtenido para los 5 vehículos ensayados mostrando tendencias similares, aunque como se observa en la Figura 11-14, hay coches que consumen más que otros para igual pendiente, misma velocidad media de circulación e igual estilo de conducción.

La ventaja del uso del Índice de Comportamiento Dinámico (ID) del conductor, es precisamente el hecho de que éste permite comparar en condiciones de tráfico real el factor de consumo de los diferentes vehículos ensayados, a igualdad de pendiente, velocidad y estilo de conducción. De esta forma, en la Figura 11-14, se muestra que salvo el Citroën C4, que tiene un consumo significativamente inferior, los otros vehículos tienen un factor de consumo similar en especial en condiciones de conducción normal.

Figura 11-14: Distribución de probabilidad del ID, de acuerdo a la intención de utilizar un determinado estilo de conducción.

Aunque el factor de consumo depende de la potencia instantánea desarrollada por el motor y no está en relación directa con la potencia máxima que puede desarrollar el motor, es interesante observar que el coche que desarrolla menor potencia máxima, ver Tabla 11.1, es el coche que tiene un menor consumo, mientras que el coche de mayor

potencia máxima tiene también los mayores consumos en especial en conducción agresiva. Esta diferencia en el factor de consumo de los diferentes vehículos ensayados depende realmente del diseño y de la optimización del conjunto caja de cambios – motor, ya que muy probablemente el vehículo Citroën C4 está diseñado principalmente para tráfico urbano y tendrá el polo de mínimo consumo en las condiciones de funcionamiento típicas que se presentan en tráfico urbano.

Adicionalmente tomando como base los resultados totales de cada uno de los circuitos, teniendo en cuenta únicamente la intención del conductor y no el índice de comportamiento dinámico, en la Figura 11-15 y en la Figura 11-16 se muestra la influencia del estilo de conducción sobre el consumo de combustible y el factor de emisión de CO₂ de forma comparativa para los 5 vehículos ensayados y un promedio general. La velocidad media de circulación para todos los ensayos fue de 19,3 km/h.

Resultados sobre 1000 Km recorridos en circuitos urbanos en Madrid, año 2009. 5 Turismos diésel equipado con MIVECO-PEMS. Velocidad media 19,3 km/hr

Figura 11-15: Resumen global de la influencia del estilo de conducción sobre el factor de consumo de turismos diésel en tráfico real urbano.

De acuerdo a este estudio, Figura 11-15 y Figura 11-16, el consumo medio de los turismos diésel en tráfico urbano con un estilo de conducción normal, es de $7,4 \pm 0,85$ L/100 km y el factor de emisión de CO₂ medio es de $194,9 \pm 22,5$ g/km, valor que es muy cercano al presentado en un estudio realizado por el Joint Research Centre de la Comisión Europea en el año 2011, en el que midieron con equipos embarcados en tráfico real vehículos diésel y gasolina. Para los vehículos turismos diésel han encontrado que el consumo medio es de 189 ± 51 g/km (Weiss et al, 2011).

Figura 11-16: Resumen global de la influencia del estilo de conducción sobre el factor de emisión de CO₂ de turismos diésel en tráfico real urbano.

Para todos los coches ensayados, se observa claramente la ventaja de la conducción suave o eficiente en cuanto a la reducción del consumo y por lo tanto también de las emisiones de CO₂ en un 14%, y la desventaja de la conducción agresiva en cuanto puede llegar a aumentar el consumo y el CO₂ alrededor de un 40%, como se puede observar en la Figura 11-15 y Figura 11-16.

Influencia sobre las emisiones de NO_x

En la Figura 11-17, se muestra la influencia tan marcada del estilo de conducción sobre las emisiones de NO_x de los vehículos turismo diésel, demostrando en este caso para un vehículo en concreto, que el estilo de conducción explica casi el 50% de la variabilidad observada en tráfico real.

Figura 11-17: Influencia del comportamiento dinámico del conductor sobre el factor de emisión de NO_x.

Al igual que en el caso del consumo y de las emisiones de CO₂ el factor de emisión de NO_x está también relacionado de forma directa con la pendiente de la vía y de forma inversa con la velocidad de circulación. En general se demuestra que el factor de

emisión de NO_x , está muy relacionado con el factor de emisión de CO_2 , como se muestra en la Figura 11-18. Esta relación es de gran importancia porque permite comparar los factores de emisión de NO_x de los diferentes vehículos y en especial porque se puede hallar la constante de relación entre estos dos factores: gramos de NO_x por gramo de CO_2 o gramos de NO_x por litro de combustible que emite un coche y que es una característica propia del vehículo. De esta forma, esta constante permite hallar cuántos gramos de NO_x ha emitido un coche con solo saber cuánto ha sido su consumo de combustible. En la Tabla 11.6 se muestran las constantes de factor de emisión de NO_x en función del factor de emisión de CO_2 y del factor de consumo y el grado de ajuste de esta tendencia.

Figura 11-18: Influencia del comportamiento dinámico del conductor sobre el factor de emisión de NO_x .

Tabla 11.6 Factor de emisión de NO_x en función del factor de emisión de CO_2 y del factor de consumo.

Denominación MIVECO	Marca	Denominación Comercial	Año matric.	Factor de emisión de NO_x en función de:			
				FE CO_2 (g/km)	R^2 en CO_2	FE FC (L/100km)	R^2 en FC
P406	PEUGEOT	406 BK STD 2,1	1998	0,0017	84,7%	0,0440	84,7%
C4	CITROEN	C4 HDI92 LX	2007	0,0030	82,0%	0,0795	81,6%
L2008	RENAULT	LAGUNA	2008	0,0030	73,5%	0,0786	73,4%
L2005	RENAULT	LAGUNA	2005	0,0033	57,9%	0,0885	58,0%
SL	SEAT	LEON	2008	0,0027	66,0%	0,0697	66,0%

En la Figura 11-19 se grafica el factor de emisión de NO_x en función del factor de emisión de CO_2 para cada uno de los vehículos, según Tabla 11.6, donde se observa claramente la ventaja de la combustión indirecta del Peugeot 406, en comparación con la inyección directa que son los otros 4 vehículos diesel ensayados, debido a que en la inyección indirecta el dosado medio de la precámara es mayor que el dosado estequiométrico y por lo tanto no hay aire disponible para la formación de NO (Pundir, 2007), como se comentó en el apartado 3.1.2 y se mostró en la Figura 3-4.

Figura 11-19: Factor de emisión de NO_x , comparación entre los diferentes vehículos ensayados

Independientemente del índice de comportamiento dinámico y únicamente teniendo en cuenta el estilo de conducción que el conductor tenía como intención utilizar durante cada recorrido, en la Figura 11-20 se muestra la influencia del estilo de conducción sobre el factor de emisión de NO_x

En la Figura 11-20 se observa que salvo el Peugeot 406 de inyección indirecta, que es un Euro 2 con límite de emisión de NO_x de 0,7 g/km (ver Tabla 3.3), los otros 4 vehículos superan ampliamente el límite de emisión de NO_x en tráfico real. Este resultado también fue encontrado por el grupo de investigadores del Joint Research Centre que hizo un estudio sobre 6 vehículos turismo diésel entre Euro 3 y Euro 5 y donde encontró también que las emisiones de NO_x en tráfico real superan ampliamente los límites de emisión que tienen que cumplir estos vehículos para su homologación (Weiss et al, 2011).

Figura 11-20: Factor de emisión de NO_x , comparación entre los diferentes vehículos ensayados

Influencia sobre las emisiones de CO y HC

En cuanto a las emisiones de CO y HC, se estudió el efecto de las diferentes variables relacionadas con el estilo de conducción, la infraestructura vial y el nivel de tráfico, y se encontró que la correlación entre estas variables es muy baja, pudiendo llegar a explicarse sólo del orden del 20% de la variabilidad observada en tráfico real. En la Figura 11-21 se muestra que con respecto a las emisiones de monóxido de carbono, el comportamiento de los diferentes vehículos ensayados es diferente y no tiene una influencia siempre igual del estilo de conducción. Esto es debido a que la formación de CO depende de la regulación del dosado (relación combustible/aire) para cada grado de carga, que es propia del diseño de cada motor. Como se comentó en el apartado 3.1.2 y se mostró en la Figura 3-4, los motores de inyección indirecta presentan baja formación de CO para dosados menores de 0,8 que es la condición de funcionamiento normal de un vehículo como el Peugeot 406. Por el contrario, los motores de inyección directa tienen sólo un estrecho rango de dosado para el cual la formación de CO es baja y es entre 0,4 y 0,65. Por esta razón, vehículos como el Renault Laguna 2005 y el Seat León, que tienen una mayor cilindrada, tienen bajas emisiones de CO en comparación con el Renault Laguna 2008 y el Citroën C4 que tienen menor tamaño de motor y por lo tanto, para generar la misma potencia necesite trabajar en dosados mayores, ver Tabla 11.1.

En la Figura 11-21 también se observa, que salvo el Citroën C4 y el Renault Laguna 2008, los vehículos ensayados tienen factores de emisión menores que sus respectivos límites de emisión, aunque es importante caer en la cuenta que el límite de emisión incluye las emisiones del arranque en frío y los ensayos realizados no incluyen esta condición de funcionamiento que es cuando estas emisiones son mayores, como se verá en detalle en el apartado 12.1.2.

Figura 11-21: Factor de emisión de CO, comparación entre los diferentes vehículos ensayados

Las diferencias observadas entre los diferentes estilos de conducción, por el contrario se debe no a un problema de dosado, sino a un problema de temperatura en el catalizador, comentado anteriormente en la Figura 3-10. El rendimiento del catalizador de oxidación se reduce significativamente durante el tráfico urbano ya que el elevado número de paradas y su duración hacen que la temperatura del catalizador no alcance la temperatura

mínima. Por lo tanto, desde el punto de vista de las emisiones de CO, la conducción eficiente o eco-driving no es una estrategia recomendable, porque en términos generales causa un ligero aumento en las emisiones de este contaminante.

En cuanto a las emisiones de hidrocarburos inquemados, emisión que actualmente no está regulada de forma independiente por la normativa europea para motores diésel en vehículos turismo, son muy bajas y en cierto modo insignificantes para la mayoría de los coches a excepción del Peugeot 406, como se observa en la Figura 11-22, teniendo en cuenta que el límite más restrictivo para la suma de las emisiones de NO_x y HC es de 230 mg/km en el caso de los vehículos turismo diésel Euro 5 (ver Tabla 3.3). En el caso del Peugeot 406, el factor de emisión de HC es significativamente superior al de los otros vehículos, aunque sigue estando muy por debajo del límite de emisión, debido al hecho de tener un motor de inyección indirecta de precámara en donde se presentan regiones de mezcla muy pobre donde no se dan las condiciones térmicas para el encendido de la llama, como se comentó anteriormente en el apartado 3.1.2. En el trabajo de investigación realizado por el Joint Research Centre de la Comisión Europea, también han encontrado que las emisiones de HC en tráfico real de turismos turismo Euro 3 a Euro 5 son también despreciables y muy por debajo de los límites de emisión (Weiss et al, 2011).

Figura 11-22: Factor de emisión de HC, comparación entre los diferentes vehículos ensayados

11.4 Influencia de los factores exógenos en turismos gasolina en tráfico urbano

Como se comentó en el apartado 11.1.2, se realizaron ensayos con dos vehículos turismo gasolina del mismo fabricante y misma gama, uno modelo 1999 matriculado en el año 2000 con normativa Euro 2 (Y2000) y otro modelo 2010 con normativa Euro 5 (Y2010-ON). El vehículo turismo modelo 2010 está equipado con sistema Stop/Start, con el cual el motor se para automáticamente cuando el vehículo se detiene, y lo vuelve

a arrancar automáticamente al iniciar el movimiento, de esta manera se elimina el consumo de combustible a ralentí durante las detenciones, en semáforos o atascos, que llega a ser hasta del 10% (Rueger, 2008). Este último vehículo se ensayó también inhibiendo el funcionamiento del sistema Stop/Start (Y2010-OFF), con el fin de comprobar la efectividad de este sistema. Con cada uno de los dos vehículos ensayados se utilizó los tres estilos de conducción, aunque como se hizo ver en el apartado 11.2.1, entre el estilo de conducción suave y normal no hay diferencias apreciables.

Influencia sobre el consumo y factor de emisión de CO₂

Analizando en promedio el factor de consumo y el factor de emisión de CO₂ de los dos vehículos ensayados en el recorrido urbano mostrado en la Figura 11-2, se observa que desde el punto de vista de la intención del conductor en cuanto al estilo de conducción usado, no hay diferencias significativas entre la conducción suave y el estilo de conducción normal. Este hecho es debido a que el conductor en realidad utilizó un estilo de conducción similar quizás por falta de pericia, como se comentó anteriormente en el apartado 11.2.1. En la Figura 11-23 y en la Figura 11-24 se muestra el valor promedio y la desviación estándar del consumo y factor de emisión de CO₂ de los dos vehículos ensayados. Entre conducción normal y agresiva si se observan diferencias significativas: en conducción agresiva se llega a consumir 25% más en el turismo del año 2000 (Y2000), 22% más para el turismo del 2010 con el sistema Stop/Start inhibido (Y2010-OFF) y cerca a un 14% más para el turismo del 2010 con el sistema Stop/Start funcionando (Y2010-ON).

Figura 11-23: Comparación del factor de consumo, turismos gasolina

También se observa que con respecto al vehículo Y2000, el turismo del año 2010 en tráfico urbano consume menos: 5% menos cuando está deshabilitado el sistema Stop/Start (Y2010-OFF) y más de un 13% menos cuando se habilita el sistema Stop/Start en conducción normal. En conducción agresiva el turismo del año 2010 consume 7% menos con el sistema Stop/Start deshabilitado (Y2010-OFF) y hasta un 21% menos con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON). Estos resultados confirman una vez más las bondades del sistema Stop/Start en tráfico urbano (Fonseca et al, 2010 – Anexo 0).

Figura 11-24: Comparación del factor de emisión de CO₂, turismos gasolina

Para analizar la influencia de la infraestructura vial y el nivel de tráfico, se han analizado los totales de factor de consumo y factor de emisión de CO₂ por zonas, según se muestra en la Figura 11-2. Se ha encontrado que al igual que los vehículos turismo diésel ensayados las variables que más influyen sobre el consumo y las emisiones de CO₂ son la velocidad media (v_{media}), la pendiente de la vía (*Pendiente* en %) y el índice de comportamiento dinámico (*ID*). Por lo tanto, el factor de consumo y el factor de emisión de CO₂ se pueden expresar de igual forma que en el caso de los vehículos turismo diésel - ecuaciones (11-11) y (11-12). En la Tabla 11.7 y en la Tabla 11.8 se relaciona los coeficientes k_0 , k_1 , k_2 y k_3 correspondientes al factor de consumo (*FC*) y al factor de emisión de CO₂ para los vehículos de gasolina ensayados, así como los parámetros estadísticos correspondientes. En la Figura 11-25, a modo de ejemplo se muestran gráficamente las tendencias encontradas con el Yaris 2010 con el sistema Stop/Start deshabilitado.

Tabla 11.7 Constantes para el cálculo del factor de consumo según ecuación (11-11).

Vehículo	k0	k1	k2	k3	P-Value	R-squared (%)	Nivel de confianza
Y2000	-3,368	137,183	0,547	9,166	0,0000	80,41	95%
Y2010-OFF	-4,144	138,585	0,643	10,346	0,0000	80,95	95%
Y2010-ON	-5,371	109,058	0,826	14,855	0,0000	69,89	95%

Tabla 11.8 Constantes para el cálculo del factor de consumo según ecuación (11-12).

Vehículo	k0	k1	k2	k3	P-Value	R-squared (%)	Nivel de confianza
Y2000	-76,14	3.100,8	12,37	207,20	0,0000	80,41	95%
Y2010-OFF	-93,68	3.132,5	14,52	233,85	0,0000	80,95	95%
Y2010-ON	-131,40	2.465,1	18,67	335,79	0,0000	69,89	95%

En la Figura 11-26, se muestra de forma comparativa el factor de emisión de CO₂ para los dos vehículos turismos gasolina ensayados, vehículo modelo 2000 (Y2000) y vehículo modelo 2010 (2010) mostrando también la diferencia entre el turismo modelo 2010 con el sistema Stop/Start deshabilitado (OFF) y habilitado (ON). En esta figura se observa que el comportamiento del Y2000 y el Y2010 con el Sistema Stop/Start

deshabilitado es prácticamente igual, mientras que si se observa una reducción apreciable del factor de emisión de CO₂ del Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado para velocidades medias de circulación menores a 25 km/h.

Figura 11-25: Influencia de estilo de conducción, pendiente y velocidad media sobre el factor de consumo para el vehículo Yaris 2010 con sistema Stop/Start inhibido (Y2010-OFF)

Figura 11-26: Influencia de la velocidad media y estilo de conducción. Comparación entre el Y2000 y el Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON) y deshabilitado (Y2010-OFF).

Los resultados mostrados en la Figura 11-26 se contradicen aparentemente con respecto a los resultados presentados en la Figura 11-23 y en la Figura 11-24, en donde se nota una reducción de consumo y por lo tanto de emisiones de CO₂ del vehículo modelo 2010 con el sistema Stop/Start deshabilitado (Y2010-OFF) en comparación con el vehículo modelo 2000 (Y2000). Esto es debido a que estos dos vehículos tienen una transmisión diferente. El Y2010 tiene 6 marchas y el Y2000 sólo 5 marchas, y todas ellas son mucho más largas en el Y2010, por lo que este vehículo tiene menor capacidad de aceleración (reprise). Esta configuración evita las aceleraciones bruscas y que en

definitiva representan una reducción en el consumo y en las emisiones de CO₂. Sin embargo, a igualdad de régimen de giro de motor e igual aceleración, el consumo y las emisiones de CO₂ son iguales.

Otra de las ventajas de la medida con equipos embarcados es que permite determinar en condiciones de tráfico real los factores de emisión y consumo de los diferentes vehículos para su utilización en inventario de emisiones. En la Figura 11-27 y en la Figura 11-28 se muestra la comparación entre el factor utilizado según la metodología Copert 4 (Ntziachristos y Samaras, 2012) para la realización de inventario de emisiones en comparación con los datos reales (en conducción normal) medidos en tráfico real para el vehículo Euro 2 (Y2000) y para el vehículo Euro 5 (Y2010-ON). El factor usado en Copert 4 sólo es válido para velocidades medias de circulación entre 10 y 130 km/h. Se observa que para velocidad media mayor de 10 km/h, en los dos vehículos, el factor Copert sobreestima el consumo. De todas formas es importante caer en cuenta que el factor Copert es un factor medio para todos los vehículos gasolina de la misma gama y no corresponde a un modelo específico de coche.

Figura 11-27: Factor de Consumo turismo gasolina <1,4 L según Copert 4 para Euro 2 en comparación con datos reales del turismo gasolina Y 2000

Figura 11-28: Factor de Consumo turismo gasolina <1,4 L según Copert 4 para Euro 5 en comparación con datos reales del turismo gasolina Y 2010

Influencia sobre el factor de emisión NO_x

En cuanto a las emisiones de NO_x de los vehículos gasolina ensayados, analizando el promedio de los valores totales por recorrido, no se observa una influencia clara o específica del estilo de conducción, como se puede observar en la Figura 11-29. Sin embargo se observa que en promedio tanto el vehículo gasolina Euro 2 como el turismo Euro 5 en tráfico urbano tienen factores de emisión por debajo de los límites de normativa mostrados en la Tabla 3.3. Estos resultados son similares a los encontrados por el grupo de investigación del Joint Research Centre en el año 2011 (Weiss et al, 2011).

Haciendo un análisis por zonas, no se encuentra una correlación clara entre las emisiones de NO_x y las variables relacionadas con el nivel de tráfico, infraestructura o estilo de conducción como pueden ser la velocidad media, pendiente y el índice de comportamiento dinámico. Esto es debido muy probablemente a que las emisiones de NO_x están condicionadas por el funcionamiento del catalizador de tres vías cuyo rendimiento depende de condiciones transitorias del catalizador y del motor.

Figura 11-29: Factor de emisión de NO_x en vehículos gasolina. Comparación entre el Y2000 y el Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON) y deshabilitado (Y2010-OFF).

Figura 11-30: Factor de emisión de NO_x en turismos gasolina EURO 2. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2000.

Figura 11-31: Factor de emisión de NO_x en turismos gasolina EURO 5. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2010-ON.

En la Figura 11-30 y en la Figura 11-31 se muestra de forma comparativa los factores de emisión medidos por zonas y el factor de emisión que se usa en la metodología Copert 4 para la realización de los inventarios de emisiones correspondientes a los vehículos turismo gasolina que se han ensayado (Ntziachristos y Samaras, 2012). En la Figura 11-30 se observa que el vehículo turismo gasolina Euro 2 que se ha ensayado (Y2000), en condiciones de conducción suave, las emisiones de NO_x son del orden que las usadas en Copert, pero en conducción normal y agresiva hay situaciones o condiciones de funcionamiento del motor en los que las emisiones de NO_x sobrepasan en gran medida el factor presentado por Copert. En el apartado 12.2.2 se estudian los transitorios de operación del motor que explican las altas emisiones de NO_x .

Influencia sobre el factor de emisión de CO y HC

En cuanto a las emisiones de monóxido de carbono, si se observa una influencia del estilo de conducción, observándose claramente un aumento muy significativo del factor de emisión de CO en conducción agresiva, como se observa en la Figura 11-32. En conducción agresiva se observa hasta un aumento de más del 400% en el vehículo Euro 5 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON). Esto se debe muy probablemente a que en conducción agresiva, se incurre en fuertes aceleraciones que causan un aumento en la riqueza de mezcla y que ocasionan una reducción en el rendimiento del catalizador como se mostró en la Figura 3-9.

Se observa, sin embargo, que el factor de emisión promedio de CO de los dos vehículos ensayados está por debajo de los límites de emisión presentados en la Tabla 3.3, aunque en conducción agresiva, en el vehículo Euro 2 lo llega a superar ligeramente. Por el contrario, el vehículo Euro 5 está muy lejos de superar el límite de emisión. Aunque hay que hacer la salvedad que el límite de emisión incluye las emisiones en arranque en frío que son mucho mayores a las emisiones en caliente, y los ensayos en tráfico real no incluyen estas condiciones de funcionamiento. Por lo tanto, es previsible que incluyendo el arranque en frío, el factor de emisión de CO del Y2000 supere fácilmente el límite de emisión.

Figura 11-32: Factor de emisión de CO en vehículos gasolina. Comparación entre el Y2000 y el Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON) y deshabilitado (Y2010-OFF).

Analizando los factores de emisión de CO medidos por zonas en comparación con los factores de emisión usados por la metodología Copert 4 para la realización de inventarios de emisiones (Ntziachristos y Samaras, 2012), se observa en la Figura 11-33 que el factor de emisión usado en Copert para el vehículo Euro 2 se corresponde en media con el factor medido en tráfico real. Sin embargo, para el vehículo Euro 5, en la Figura 11-34 se observa que en general el factor Copert sobrestima las emisiones de CO salvo para el caso de situaciones concretas en conducción agresiva.

Figura 11-33: Factor de emisión de CO en turismos gasolina EURO 2. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2000.

Figura 11-34: Factor de emisión de CO en turismos gasolina EURO 5. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2010-ON.

En cuanto a los factores de emisión de HC, en la Figura 11-35, se observa que hay correlación con el estilo de conducción en el vehículo Euro 2 (Y2000) y en el Euro 5 con el sistema Stop/Start deshabilitado (Y2010-OFF), mostrando aumentos de más del 600% en el vehículo Euro 5. Debido muy probablemente a que en conducción agresiva la mezcla aire/combustible se hace muy rica y el rendimiento del catalizador de tres vías se reduce como se mostró en la Figura 3-9 de igual forma que en el caso del factor de emisión de monóxido de carbono mostrado anteriormente.

En la Figura 11-35 se observa, sin embargo, que las emisiones promedio de HC están muy por debajo de los límites de emisión, observación que se corresponde con los resultados del estudio realizado por el Joint Research Centre (Weiss et al, 2011), aunque hay que hacer la salvedad de que las emisiones medidas en tráfico real no incluyen las condiciones de funcionamiento en arranque en frío que si se incluye en el límite de emisión y que son significativamente superiores como se verá en el apartado 12.1.3.

Figura 11-35: Factor de emisión de HC en vehículos gasolina. Comparación entre el Y2000 y el Y2010 con el sistema Stop/Start habilitado (Y2010-ON) y deshabilitado (Y2010-OFF).

Analizando los factores de emisión de HC medidos por zonas en comparación con los factores de emisión usados por la metodología Copert 4 para la realización de inventarios de emisiones (Ntziachristos y Samaras, 2012), se observa en la Figura 11-36 y en la Figura 11-37 que los factores de emisión usados en Copert para el vehículo Euro 2 y Euro 5 se adecuan a los factores medidos en tráfico real, aunque hay situaciones concretas donde las emisiones de HC sobrepasan de forma importante estos valores. En el apartado 12.2.2 se estudiará más a fondo las situaciones transitorias que ocasionan este efecto.

En general, es importante observar que realizando el análisis por zonas, no se observa una gran correlación entre los factores de emisión de CO y HC y las variables dinámicas relacionadas con el tráfico o la infraestructura vial. Esto es debido a que la emisión de CO y HC está condicionada principalmente por el funcionamiento del catalizador de tres vías y por transitorios de operación del motor donde el dosado es rico y no hay suficiente aire para que el CO y HC se oxiden completamente.

Figura 11-36: Factor de emisión de HC en turismos gasolina EURO 2. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2000.

Figura 11-37: Factor de emisión de HC en turismos gasolina EURO 5. Comparación entre el factor usado Copert 4 y el Y2010-ON.

11.5 Influencia de los factores exógenos en turismos diesel en tráfico extraurbano

Para la realización del estudio en tráfico extraurbano se recorrieron cerca de 550 km con el vehículo turismo diésel Euro 2 Peugeot 406, en el recorrido presentado en la Figura 11-3. Los factores exógenos más importantes que afectan el tráfico extraurbano son:

- Infraestructura vial: la variable más importante que influye sobre el consumo y las emisiones en tráfico extraurbano es la pendiente de la vía. El tipo de carretera sea autopista, autovía, carretera nacional o comarcal determina el límite de velocidad y por lo tanto influye directamente sobre la velocidad media de circulación (v_{med}).

- Nivel de tráfico: en tráfico extraurbano en autopista la velocidad media de circulación está condicionada principalmente por el límite de velocidad y por el nivel de tráfico que restringe la velocidad. Por lo tanto el análisis de la influencia del nivel de tráfico está implícito en el análisis de la influencia de la velocidad media de circulación (v_{med}).
- Estilo de conducción: en conducción extraurbana, está representado principalmente en las variables de aceleración media positiva (a_{med+}) y el régimen de motor medio (R_{RPM}). En el caso de límites de velocidad por encima de 110 km/h, el estilo de conducción también puede influir sobre la velocidad media (v_{med}), porque a diferencia del tráfico urbano la agresividad en la conducción representa de forma directa un aumento en la velocidad media de circulación.

En base a las mediciones realizadas con el equipo MIVECO-PEMS usando los totales por zonas (cada 500 m) de todos los recorridos realizados y utilizando herramientas estadísticas se ha encontrado una relación empírica que explica cerca del 80% de la variabilidad observada en cuanto al consumo de combustible ($R^2 = 79,22\%$ y $P\text{-value}=0,0000$), ecuación (11-13), y que gráficamente se muestra en la Figura 11-38.

$$FC (L/100 km) = 1,45 + 8,77e^{-1} \cdot (a_{med+})^2 + 1,82e^{-3} \cdot R_{RPM}^2 + 4,04e^{-2} \cdot Pendiente^2 + 6,43e^{-1} \cdot Pendiente + 2,73e^{-4} \cdot v_{med}^2 + 13,7 \cdot v_{med}^{-1} + 4,24e^{-3} \cdot Pendiente \cdot v_{med} - 3,64e^{-2} \cdot v_{med} + 7,32e^2 \cdot v_{med}^{-2} \quad (11-13)$$

En la Figura 11-38, se muestra toda la variabilidad del consumo en tráfico extraurbano con límite de velocidad 120 km/h y se grafica la relación empírica, ecuación (11-13), para valores de pendiente entre -6% hasta 6% y el factor de consumo utilizado por la metodología Copert 4 (Ntziachristos y Samaras, 2012). Se observa que el factor de consumo (correspondiente al factor de emisión de CO_2) utilizado en la metodología de Copert 4 se corresponde adecuadamente con el factor de consumo en carretera plana, pero no incluye la influencia de la pendiente que como se observa es muy importante en especial a alta velocidad.

Figura 11-38: Factor de consumo en tráfico extraurbano. Turismo diésel Euro 2 IDI.

En la Figura 11-39 se muestra gráficamente el grado de ajuste de la expresión empírica - ecuación (11-13), observándose que el ajuste de esta expresión es bueno, con un error absoluto medio de $\pm 0,95$ L/100 km.

Figura 11-39: Grado de ajuste del factor de consumo en tráfico extraurbano - ecuación (11-13). Turismo diésel Euro 2 IDI.

El consumo de combustible medido en tráfico extraurbano, permite además determinar el rendimiento medio del motor de la forma como se definió en la ecuación (8-22), usando el valor de energía de tracción positiva (E_t) que es la integral de la curva de potencia de tracción (N_t), definida en la ecuación (8-11), cuando esta toma valores positivos y por lo tanto está demandando potencia del motor. De esta forma, en la Figura 11-40, se muestra gráficamente que el rendimiento global del conjunto motor-vehículo es de alrededor del 30% en tráfico extraurbano.

Figura 11-40: Rendimiento global del vehículo diésel Euro 2 en tráfico urbano.

Influencia sobre el factor de emisión de NO_x

En cuanto al factor de emisión de NO_x en la Figura 11-43 se muestran los valores medidos en tráfico extraurbano en comparación con el factor de emisión utilizado en la metodología Copert 4 para la elaboración de inventario de emisiones. Se observa que en media el factor usado en Copert 4 si se corresponde con los datos reales medidos, sin embargo se observa una gran variabilidad en los datos observados, debida a la influencia

de la pendiente y del estilo de conducción (aceleración y promedio de régimen de giro de motor) y de las condiciones específicas de operación del motor que no se contempla en la metodología Copert 4.

Figura 11-41: Factor de emisión de NO_x en turismo diésel EURO 2. Comparación entre el factor usado Copert 4 y datos reales medidos.

Para las condiciones de tráfico extraurbano (velocidad de circulación mayor de 50 km/h), existe una relación lineal entre el factor de emisión de NO_x y el factor de emisión de CO_2 para el vehículo turismo diésel ensayado, de igual forma al encontrado para tráfico urbano y que se analizó anteriormente en el apartado 11.3, que permite fácilmente cuantificar los gramos de NO_x emitidos por gramos de CO_2 . En la Figura 11-42 se muestra el grado de ajuste de la relación lineal que existe entre el factor de emisión de NO_x y el factor de emisión de CO_2 tanto para tráfico extraurbano como para tráfico urbano presentado en el apartado 11.3.

Figura 11-42: Relación entre el factor de emisión de NO_x y el factor de emisión de CO_2 en un turismo diésel EURO 2 en tráfico extraurbano.

Influencia sobre el factor de emisión de CO y HC

En relación a los factores de emisión de monóxido de carbono y de hidrocarburos inquemados, en la Figura 11-41 y en la Figura 11-44, se observa que para velocidades de circulación extraurbana (mayores de 50 km/h), estas emisiones en general son muy bajas. Sin embargo, como se verá en el apartado 12.2.3, hay condiciones de operación que generan un aumento importante en el factor de emisión de CO y de HC como por ejemplo cuando el motor está reteniendo por un largo periodo de tiempo y se sigue de una fuerte aceleración. En esta condición, el catalizador se enfría durante la fase de retención por efecto de la convección y por la falta de combustión, causando una reducción en el rendimiento del catalizador y por lo tanto en el momento de la aceleración, se genera un pico de emisión de CO y de HC que el catalizador no es capaz de oxidar.

Figura 11-43: Factor de emisión de CO en un turismo diésel en tráfico extraurbano Euro 2 IDI. Comparación con el factor usado en metodología Copert 4.

Figura 11-44: Factor de emisión de HC en un turismo diésel en tráfico extraurbano Euro 2 IDI. Comparación con el factor usado en metodología Copert 4.

En la Figura 11-41 y en la Figura 11-44 se observa también el factor de emisión de CO y HC respectivamente en función de la velocidad media de circulación usado en la metodología Copert 4 para la realización de inventario de emisiones. Se observa cierta similitud en el factor de CO y en el factor de HC usados en Copert con los datos medidos, aunque la tendencia de los datos medidos no es tan clara.

Influencia sobre el factor de emisión de partículas

En cuanto a las emisiones de partículas, en la Figura 11-45, se observa que el factor de emisión de partículas real es mucho mayor que el usado en la metodología Copert 4 para la realización de los inventario de emisiones y se observa que tiene gran similitud al factor de consumo. De hecho en la Figura 11-46, se muestra que existe una relación lineal entre el factor de emisión de partículas y el factor de consumo.

Figura 11-45: Factor de emisión de partículas en un turismo diésel en tráfico extraurbano Euro 2 IDI. Comparación con el factor usado en metodología Copert 4.

Figura 11-46: Relación entre el factor de emisión de partículas y el factor de consumo en un turismo diésel en tráfico extraurbano Euro 2 IDI.

11.6 Otros estudios de influencia de factores exógenos

Se han realizado algunos otros estudios de carácter más específico sobre influencia de factores exógenos sobre el consumo y las emisiones que han sido presentados en congresos o que han sido ya publicados en revistas científicas y que por lo tanto no se incluyen dentro del cuerpo de la presente tesis doctoral, pero se relacionan a continuación:

11.6.1 Influence of the stop/start system on CO₂ emissions of a diesel vehicle in urban traffic. (Fonseca et al, 2011a)

Publicado en la revista Transportation Research Part D. Se adjunta en el anexo 0.

Resumen

Este artículo presenta las medidas de emisiones de CO₂ y eficiencia de la tecnología Stop/Start en vehículos diésel en tráfico urbano. Dos vehículos todoterreno 4x4 fueron instrumentados con el equipo MIVECO-PEMS y probados en dos circuitos urbanos representativos del tráfico en el centro de la ciudad de Madrid. Los vehículos ensayados estaban equipados con motores diésel turbo con intercooler similares y cumplían la misma normativa de emisiones Euro 4, pero uno de los vehículos estaba equipado con el sistema Stop/Start. Se han obtenido reducciones de más del 20% para el vehículo equipado con el sistema Stop/Start en tráfico real urbano. A pesar de que las medidas en tráfico real tiene un variabilidad muy alta debido a la influencia del estilo de conducción, la pendiente, el tipo de calle, la congestión de tráfico y las condiciones de temperatura del motor, se ha demostrado que el vehículo equipado con el sistema Stop/Start tiene intrínsecamente un menor factor de emisión de CO₂.

11.6.2 Influencia del contenido de Biodiésel en gasóleo en el rendimiento térmico de un motor diésel ligero ensayado en tráfico real. (Fonseca et al, 2011b)

Presentado en el VII congreso Nacional de Ingeniería Termodinámica realizado en Bilbao en junio de 2011. Se adjunta en el anexo 0.

Resumen

La utilización de biocombustibles derivados de aceites vegetales es una opción válida para contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ y extender la vida de los combustibles convencionales. El biodiesel (mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos) mezclado con gasóleo en motores diesel es una opción ya conocida, pero el análisis del

comportamiento del motor en un vehículo ligero en tráfico real es aun un tema poco investigado.

El objeto de esta ponencia es presentar la metodología de ensayo y los resultados obtenidos en un trabajo de investigación sobre el efecto que la variación del porcentaje de biodiesel en gasóleo tiene en las prestaciones del motor y su rendimiento térmico en tráfico urbano real. Las medidas se han realizado con equipos embarcados en un vehículo y utilizando el biodiesel producido en la Universidad de la Frontera en Temuco (Chile) mezclado en proporciones diferentes con gasóleo suministrado por Repsolypf, S.A., caracterizado en laboratorio.

Los ensayos se han realizado en la ciudad de Madrid con un SEAT León TDI 2.0 con un solo conductor y aplicado dos estilos de conducción diferentes: agresiva y eficiente, caracterizadas según trabajos anteriores.

Los resultados obtenidos en consumo de combustible no son los que cabía esperar en base al poder calorífico y la densidad de la mezcla, y no siguen los obtenidos en otras investigaciones realizadas en banco de pruebas. Para explicar esta discrepancia se aportan los resultados de un estudio de la energía aportada por el motor en cada instante seguido de una análisis estadístico de todo el volumen de datos obtenidos para presentar los resultados en una nueva forma que muestra cómo la potencia demandada en el vehículo es menor y el rendimiento térmico del motor diesel mejora al aumentar el porcentaje de biodiesel.

11.6.3 Environmental assessment of low speed policies for motor vehicle mobility in city centres. (Casanova y Fonseca, 2012)

Publicado en Global NEST Journal, Vol 14, No 2, pp 192-201. Se adjunta en el anexo 0.

Resumen

Con el fin de conocer la influencia de la reducción del límite de velocidad de 50 km/h a 30 km/h en calles locales de un solo carril en zonas residenciales de ciudades grandes, se realizaron varios ensayos en tráfico real en el centro de Madrid para medir el consumo de combustible y las emisiones contaminantes. La concentración de emisiones, el caudal de gases de escape y las variables de actividad del vehículo fueron medidas de forma simultánea utilizando el equipo MIVECO-PEMS. Los ensayos fueron realizados en diferentes momentos a lo largo del día y en diferentes días con un vehículo turismo turbo-diésel equipado con catalizador de oxidación y se usaron diferentes estilos de conducción con un conductor entrenado previamente.

Los resultados muestran que al reducir el límite de velocidad de 50 a 30 km/h, usando un estilo de conducción normal, el tiempo invertido para realizar el recorrido no se incrementa, pero el consumo de combustible y las emisiones de NO_x, CO y partículas claramente se reducen. Por lo tanto, la principal conclusión de este trabajo es que

reducir el límite de velocidad en calles estrechas en zonas residenciales y comerciales no sólo incrementa la seguridad para los peatones, sino que además contribuye a reducir el impacto ambiental de los vehículos turismo por la reducción en las emisiones contaminantes y por la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2).

11.7 Conclusiones

Se ha demostrado que el uso de equipos portátiles de medida de emisiones PEMS es una herramienta adecuada para la determinación de los factores de emisión de los vehículos en tráfico real.

Se ha demostrado que el estilo de conducción es uno de los factores exógenos que influye fuertemente en el consumo y en las emisiones contaminantes de los vehículos turismo en tráfico real y por lo tanto genera una alta variabilidad en las medidas. Por esta razón se hace necesario tener control del efecto de este factor y para ello se hace necesario hacer ensayos con los tres estilos de conducción con conductores expertos.

En base a las medidas en tráfico urbano real, usando de forma controlada los tres tipos de conducción, es posible determinar estadísticamente una función que permita cuantificar el estilo de conducción. Las variables dinámicas que más están relacionadas con el estilo de conducción son la aceleración media positiva (el promedio de la aceleración de vehículo cuando está aumentando su velocidad), el porcentaje de tiempo que el conductor está a más de 1850 rpm en motores diésel o el promedio de régimen de motor en motores gasolina y el porcentaje de tiempo que el conductor usa la primera y la segunda marcha. La combinación lineal de estas variables permite diferenciar claramente entre una conducción suave, normal y agresiva. Por su parte, en tráfico extraurbano el estilo de conducción está más relacionado con el promedio de régimen de giro del motor y las aceleraciones medias positivas.

La conducción agresiva, puede significar aumentos muy significativos en el consumo de combustible, por ejemplo para una misma velocidad media y pendiente puede implicar un aumento entre el 40% y el 50% en vehículos diésel y alrededor del 25% en turismos gasolina.

Por su parte, se ha demostrado que en tráfico urbano, respetando el límite de velocidad, la velocidad media de circulación no depende del estilo de conducción, pues esta variable depende de la infraestructura vial y del nivel de tráfico que haya.

Se demuestra que entre los parámetros de la infraestructura vial que más afecta el consumo de combustible en tráfico urbano y extraurbano tanto en vehículos turismo gasolina como diésel es la pendiente de la vía. Por lo tanto para el correcto análisis de las medidas de emisiones y consumo en tráfico real es importante medir esta variable y tenerla controlada. En tráfico urbano, por las bajas velocidades de circulación la relación entre la pendiente y el consumo de combustible es aproximadamente lineal y por lo tanto la división del recorrido completo en zonas de estudio no necesariamente debe hacerse con el criterio de pendiente homogénea. Lo que sí es importante es incluir en el

análisis el valor de pendiente media. Por el contrario, en el análisis del tráfico extraurbano la relación entre la pendiente y el consumo de combustible no es lineal, sino cuadrático, por lo tanto en la discretización del recorrido en zonas, debe hacerse con el criterio de pendiente homogénea. Esto no es un problema en el caso de autopistas o autovías porque el trazado de estas vías es muy suave, pero si puede ser un problema en el caso de carreteras comarcales o carretes convencionales de doble sentido en una sola calzada.

La velocidad media de circulación en condiciones de muy bajo nivel de tráfico, depende exclusivamente del límite de velocidad y de la infraestructura vial, debido a que el número de carriles, pendiente de la vía, número de intersecciones por kilómetro y tipo de intersecciones genera restricciones a la circulación que limitan la velocidad media de circulación. Por lo tanto, es importante medir esta velocidad, pues establece el límite superior de velocidad de circulación de la vía.

En tráfico urbano, para vehículos turismo diésel y gasolina, el consumo y las emisiones de CO₂ están relacionados con la velocidad media de circulación de forma inversa y por lo tanto reducir la velocidad media de 40 a 10 km/h puede implicar aumentos de casi el 100% en el consumo y emisiones de CO₂.

La definición del Índice Dinámico (ID) también ha permitido comparar entre si los diferentes coches ensayados, ya que los ensayos en tráfico real al no ser repetitivos, aunque se realicen a la misma hora y en el mismo recorrido por la variabilidad y aleatoriedad del tráfico, no se pueden comparar directamente y por lo tanto es necesario llevarlos a una base común, que en este caso es la valoración del estilo de conducción por medio de este índice. De esta forma, podemos ver de forma comparativa el factor de emisión de CO₂ para los distintos coches ensayados en relación con la velocidad media del recorrido.

De esta forma, se demuestra que la metodología de estudio de emisiones en tráfico real, separando el efecto del estilo de conducción, de la pendiente y de la velocidad media, es una herramienta eficaz para comparar en tráfico real los diferentes vehículos.

Debido a esta relación inversa entre la velocidad media y el consumo y las emisiones de CO₂, para el diseño de la infraestructura vial es importante tener en cuenta el estudio de la velocidad media sin tráfico.

El aumento en el nivel de tráfico, en tráfico urbano, reduce la velocidad media de circulación y por lo tanto implica un aumento en el consumo y en las emisiones contaminantes, en especial del NO_x en vehículos diésel. Por lo tanto una estrategia para reducir el nivel de NO_x atmosférico y mejorar la calidad de aire en ciudades muy pobladas como el caso de Madrid, es desestimar el uso del coche particular, no sólo porque se reduce el número de coches que emiten contaminantes a la atmósfera, sino porque los que circulan con menor nivel de tráfico emiten también menos.

En los vehículos diésel, tanto para tráfico urbano como extraurbano, gracias a los ensayos en tráfico real, es posible encontrar una constante que permite estimar las emisiones netas de NO_x en función del consumo de combustible. Esta relación lineal entre los factores de emisión de NO_x y CO₂ es muy útil para comparar diferentes

vehículos y determinar para unas mismas condiciones de funcionamiento cuál coche emite más que otro. Es importante observar que esta relación lineal sólo se encontró en los motores diésel, debido a que los vehículos con motor gasolina están equipados con catalizador de tres vías que elimina en gran medida las emisiones de NO_x .

Debido a la relación lineal que existe entre las emisiones de CO_2 y NO_x en los motores diésel se comprueba que la conducción agresiva implica además del aumento en el consumo y en las emisiones de CO_2 , un aumento en las emisiones de NO_x . Esto no ocurre en los vehículos a gasolina equipados con catalizador de tres vías.

Es importante notar que en tráfico real los vehículos diésel tienen emisiones de NO_x que sobrepasan ampliamente los límites de emisión establecidos en las normativas europeas, en especial los turismos diésel de inyección directa. También es importante observar que a pesar de que los límites de emisión de NO_x de los vehículos gasolina son más bajos que para los vehículos diésel, se comprueba que los vehículos gasolina no sobrepasan los límites de emisión.

En cuanto a las emisiones de CO y HC, los vehículos gasolina tienen factores reales de emisión por debajo de los límites impuestos para la homologación de los vehículos, esto es debido a que los ensayos de homologación se realizan con arranque en frío, que es la condición de funcionamiento del motor que mayores emisiones de CO y HC tienen.

Con respecto a los factores de emisión utilizados por la metodología Copert 4, se observa que en algunos casos son muy acertados (en especial en cuanto al consumo o emisiones de CO_2 , pero en otros no tanto. Por lo tanto la metodología de medida en tráfico real puede ser una gran herramienta para la determinación más precisa de los factores reales de emisión y permitiría además incluir el efecto de la pendiente que actualmente se desprecia totalmente en la metodología Copert.

Se comprueba la efectividad de los sistemas Stop/Start tanto en vehículos con motor diésel como de gasolina para la reducción de las emisiones de CO_2 y reducción en el consumo en tráfico real urbano a velocidades de circulación menores a 25 km/h. También se demuestra que se reducen o al menos se mantienen en el mismo orden de magnitud las emisiones contaminantes NO_x , CO y HC. Por lo anterior se recomienda estimular el uso de vehículos equipados con sistema Stop/Start en tráfico urbano.

Se comprobó que en tráfico urbano, el uso de altos porcentajes de biodiesel en vehículos diésel diseñados para funcionar con gasóleo convencional, no implica el aumento en el consumo de combustible equivalente a la reducción en el poder calorífico del combustible, debido a que las características físicas del biodiesel influyen en la respuesta dinámica del vehículo y por lo tanto hay cierta reducción en el consumo ligada a esta pérdida de prestaciones del motor (pique).

Por último, reducir el límite de velocidad de 50 a 30 km/h en calles estrechas en zonas residenciales y comerciales no sólo incrementa la seguridad para los peatones, sino que además contribuye a reducir el impacto ambiental de los vehículos turismo por la reducción en las emisiones contaminantes y por la reducción en las emisiones de gases de efecto invernadero (CO_2).

Capítulo 12

INFLUENCIA DE LOS FACTORES ENDÓGENOS SOBRE EL CONSUMO DE COMBUSTIBLE Y EMISIONES

Los factores endógenos se refieren fundamentalmente a las condiciones de funcionamiento del motor, conjunto de tracción y sistema de escape que afectan el consumo de combustible y las emisiones, como pueden ser el régimen del motor, la marcha, la riqueza de mezcla, la temperatura del motor y la del sistema de escape, la potencia generada por el motor, etc.

Para el estudio de la influencia de estos factores se analizarán el consumo y emisiones instantáneas en relación a las condiciones de funcionamiento del motor, primero en los ensayos realizados en banco de rodillos y posteriormente en los ensayos en tráfico real.

12.1 Estudio en banco de rodillos

Como se comentó en el apartado 5.1, se realizaron una serie de ensayos en banco de rodillos con el objeto de validar la respuesta instantánea de los diferentes analizadores. Pero adicionalmente, se realizaron otros ensayos con el objetivo de ser usados para extraer conclusiones en cuanto a factores de emisión tanto en ciclos normalizados de homologación como en diferentes condiciones de operación del coche. Se realizaron ensayos a diferentes velocidades, ensayos de aceleración suave y brusca y se realizaron ciclos de conducción NEDC.

Para estos ensayos se utilizó un turismo diésel Peugeot 406 y el turismo gasolina Toyota Yaris modelo 1999 (matriculado en el año 2000 – que denominamos Yaris 2000) cuyas características técnicas se presentaron en la Tabla 11.1 y en la Tabla 11.2 respectivamente. El banco de rodillos utilizado para estas pruebas de validación pertenece al Instituto Universitario de Investigación del Automóvil – INSIA. La potencia máxima del banco de rodillos es de 60kW y la velocidad máxima es de 160 km/h. En la Figura 12-1 se muestra el banco de rodillos durante las pruebas de validación.

Figura 12-1: Ensayos de validación en banco de rodillos INSIA.

En los ensayos de medida de emisiones realizados para evaluar la influencia de los factores endógenos sobre las emisiones reales del motor y el consumo de combustible, se observa lo siguiente:

12.1.1 Influencia de la marcha

Los resultados de esta serie de ensayos han permitido extraer conclusiones sobre el efecto de la velocidad y marcha sobre el consumo y las emisiones. Para esto se realizaron varios ensayos con el fin de comparar las emisiones y el consumo a distintas velocidades y marchas, manteniendo cada condición de operación (velocidad & marcha) de forma cuasi- estacionaria durante 2 minutos aproximadamente, como se puede observar en la Figura 12-2, en la que se muestra el caudal de gases de escape medido durante uno de estos ensayos.

Figura 12-2: Caudal de gases de escape medido con MIVECO-PEMS durante los ensayos en banco de rodillos.

A partir de estos ensayos se realizó un estudio comparativo tanto de emisiones instantáneas como de emisiones totales en los diferentes tramos estacionarios. Un ejemplo de las diferencias en emisiones y consumo entre conducir a una misma velocidad con marchas cortas o largas, se muestra en la Figura 12-3. En esta figura, se confirma el principio de la conducción eficiente, en el que se recomienda conducir a marchas largas, especialmente para reducir el consumo y las emisiones de CO_2 .

Figura 12-3: Consumo y emisiones instantáneas. Comparación a velocidad constante con diferente marcha. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.

Adicionalmente, de la comparación de las emisiones instantáneas, se obtuvieron valores integrados de factor de emisión y de consumo total en cada tramo para así evaluar cuantitativamente los efectos ya citados. A continuación, en la Figura 12-4 se presenta el gráfico comparativo de consumo medio a 40, 60 y 80 km/h comparando entre marcha corta y marcha larga. Así mismo se muestra los factores de emisión de monóxido de carbono, dióxido de carbono, hidrocarburos inquemados en g/km.

En estas gráficas se corrobora las ventajas de la conducción eficiente en cuanto al uso de marchas largas para el consumo y emisiones de CO_2 , HC y CO, en especial en tráfico urbano (velocidades menores de 60 km/h). En cuanto a las emisiones de NO_x , se

observa que por encima de 60 km/h la tendencia cambia, siendo mayor las emisiones de NO_x cuando se utiliza la conducción eficiente en tráfico extraurbano.

Figura 12-4: Consumo y factores de emisión medios turismo diésel P406 2L IDI. Comparación en diferentes condiciones de velocidad constante con diferentes marchas.

12.1.2 Ciclo de conducción NEDC en turismos diésel

En la Figura 12-5 se muestran las emisiones instantáneas y el consumo de combustible en el ciclo Europa para el vehículo turismo diésel P406 2L IDI. Estos gráficos de consumo y de emisión se presentan en relación a la velocidad instantánea en cada punto del ciclo.

En las gráficas de la Figura 12-5, se observa que el CO, para el Peugeot 406, sólo se emite en las aceleraciones de arranque siendo a su vez mayor durante el arranque en frío, observándose, así mismo, muy baja emisión de CO a alta velocidad. En cuanto a las emisiones de HC, también se observa que son sólo importantes en el arranque en frío y a medida que el vehículo llega a la temperatura normal de funcionamiento, se reducen, manteniéndose del mismo orden de magnitud en tráfico urbano y extraurbano. Las emisiones de NO_x , por el contrario, son mayores durante las aceleraciones a alta velocidad. En cuanto al caudal, se observa perfectamente los tramos a ralentí y su aumento con el grado de carga y el consumo se observan los picos de consumo que se presentan cuando el motor se sobre revoluciona antes de los cambios de marcha.

Figura 12-5: Emisiones y consumo instantáneo medido con equipo MIVECO-PEMS. Ciclo NEDC. Turismo diésel Peugeot 406 2l.

12.1.3 Ciclo de conducción NEDC en turismos gasolina

Figura 12-6: Emisiones y consumo instantáneo medido con equipo MIVECO-PEMS. Ciclo NEDC, Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.

En cuanto a las emisiones y al consumo instantáneo de los vehículos turismo gasolina, en la Figura 12-6, se observa claramente que las condiciones de funcionamiento que son más perjudiciales son el arranque en frío y los altos grados de carga donde es necesario trabajar en mezcla rica ($\lambda < 1$) para generar la potencia instantánea que demanda el vehículo.

En cuanto a las emisiones de CO y HC, en la Figura 12-6, claramente se observa las dos condiciones de operación que son perjudiciales: Durante el arranque en frío, debido a la baja temperatura del motor, se observa que en las aceleraciones el dosado se hace por instantes rico (dosado relativo > 1 , que es equivalente a $\lambda < 1$). Por lo tanto, se unen los dos efectos: se reduce el rendimiento del catalizador de tres vías en cuanto a la transformación del CO y HC por la baja temperatura del motor, Figura 3-10, y por el aumento del dosado, Figura 3-9. Adicionalmente, como se comentó en el apartado 3.1.1, en dosado rico, debido a la falta de aire para oxidar completamente del combustible, la generación de CO, HC es mayor. En el caso del alto grado de carga, la emisión elevada de CO y HC es debida al aumento en la formación de CO y HC por el defecto de aire y por la reducción en el rendimiento del catalizador.

En cuanto a las emisiones de NO_x , se observa también un poco en la parte de arranque en frío, debido a la reducción del rendimiento del catalizador por la baja temperatura. Sin embargo, los picos más altos de emisión másica de NO_x se dan en condiciones de elevados grados de carga, que aunque la formación de NO_x se reduce por efecto del defecto de aire, como se mostró Figura 3-2, aumenta muchísimo por efecto del aumento en la temperatura de combustión y por la congelación de las reacciones de destrucción del NO al entrar en contacto los gases de escape con el sistema de escape a menor temperatura. Otros de los motivos de la elevada emisión de NO_x puede ser el envejecimiento del catalizador.

12.2 En tráfico real

Analizando los registros instantáneos de los diferentes ensayos en tráfico real realizados, en esta sección se muestran las condiciones de funcionamiento de los diferentes vehículos que conlleva elevados consumos y altas emisiones contaminantes y que complementa las tendencias presentadas en los apartados 11.3, 11.4 y 11.5.

12.2.1 Vehículos diésel en tráfico urbano

Respecto al consumo y emisiones de CO_2

En la Figura 11-15, se mostró que en tráfico urbano la influencia del estilo de conducción es muy importante y puede significar aumentos de consumo del 40%. En la Figura 12-7 se muestra de forma comparativa el consumo instantáneo de dos ensayos realizados en el mismo circuito urbano, uno usando conducción suave y el otro en conducción agresiva. En esta figura se aprecia que la diferencia en el consumo total se

debe principalmente al aumento del consumo durante las etapas de aceleración del vehículo entre cambios de marcha. Como el régimen de giro al que se realiza los cambios de marcha son mayores, así como también el grado de carga (posición del acelerador) que impone el conductor para subir más rápidamente la velocidad del vehículo entre los sucesivos cambios de marcha, se genera un aumento considerable del consumo instantáneo formando picos de consumo mayores a los que se observan en conducción normal. Pero como el vehículo tiene masa y como la velocidad media en tráfico urbano está impuesta por el nivel de tráfico y la infraestructura vial, se observa que el combustible consumido de más en conducción agresiva no se aprovecha en aumentar la velocidad media. Por lo tanto, se recomienda la conducción suave, evitando en todo momento aceleraciones intensas y manteniendo el régimen de giro lo más bajo posible, que implica el uso de marchas largas.

Figura 12-7: Consumo instantáneo medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.

Respecto a las emisiones de NO_x

De igual forma que en la Figura 11-17 en donde se mostró que las emisiones de NO_x están también muy relacionadas con el estilo de conducción, en la Figura 12-8 se muestra que la conducción agresiva lleva consigo aumento en las emisiones máscas instantáneas, tanto porque aumentan los picos de emisión en los momentos de aceleración como por el aumento en el régimen de giro que eleva la temperatura de combustión que favorece la formación de NO_x.

Figura 12-8: Emisión másica instantánea de NO_x medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.

Respecto a las emisiones de CO

Las emisiones de monóxido de carbono, como se mostró en la Figura 11-21, en la mayoría de los casos es mayor en condiciones de conducción suave. Esto es debido a que estas emisiones están ligadas al dosado relativo que instantáneamente usa el motor. En la Figura 12-9 se muestra que las emisiones másicas de CO están formadas principalmente por picos de emisión que se dan cuando el dosado relativo se hace mayor que 0,7 y por lo tanto, aunque sigue siendo mezcla pobre, en estas condiciones, como se mostró en la Figura 3-4, aumentan rápidamente las emisiones de CO. Estos dosados cercanos al estequiométrico se presentan principalmente en conducción suave, porque el motor trabaja en condiciones de bajo régimen, donde es necesario aumentar la inyección de combustible para generar la potencia demandada por el vehículo, entrando en la zona más eficiente del motor, pero que tiene el inconveniente de generar mayores emisiones de CO.

Figura 12-9: Emisión másica instantánea de CO y dosado relativo medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.

Respecto a las emisiones de HC

Figura 12-10: Emisión másica instantánea de HC y dosado relativo medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.

Las emisiones de hidrocarburos inquemados están también ligadas al dosado relativo instantáneo, como se muestra en la Figura 12-10. Se observa gran similitud entre las curvas de emisión másica instantáneo de HC y dosado relativo, mostrando picos de emisión coincidentes con los del dosado. Emisiones que se dan en las zonas alejadas del

chorro de combustible donde se forma una mezcla excesivamente pobre que no logra entrar en combustión, como se explicó en el apartado 3.1.2.

12.2.2 Turismos gasolina en tráfico real

Respecto al consumo y emisiones de CO₂

Al igual que en los vehículos turismo diésel tratados en el apartado anterior el consumo de combustible y por lo tanto las emisiones de CO₂ en los turismos gasolina está muy influenciado por el estilo de conducción, llegando a ser del orden del 25% más en conducción agresiva, como se mostró en el apartado 2.4. En la Figura 12-11 se muestra de forma comparativa el consumo instantáneo en dos ensayos realizados en el mismo recorrido, pero uno de ellos en conducción agresiva y el otro en conducción suave. Al igual que en la Figura 12-7, se muestra que los picos de consumo en conducción agresiva son mayores y los consumos instantáneos en general también lo son.

Figura 12-11: Consumo instantáneo medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.

Figura 12-12: Consumo acumulado medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.

Por su parte, en la Figura 12-12, se muestra el consumo acumulado a lo largo del recorrido de los ensayos cuyo consumo instantáneo se mostró parcialmente en la Figura 12-11. Aquí se observa, que las conductas agresivas en la conducción van generando un aumento real en el consumo, que se va acumulando a lo largo de todo el recorrido y

como se ve, en este caso se llega a consumir 53% más de combustible, que a la final es combustible desperdiciado porque el trabajo realizado en recorrer el circuito ha sido el mismo.

Respecto a las emisiones de NO_x

En la Figura 12-13, se observa que en el caso del Yaris 2010, que está equipado con un motor de inyección directa, los picos de emisión de NO_x se presentan en situaciones transitorias de dos tipos: la primera situación (en la Figura 12-13 indicada con la letra a) es aquella en la que se presenta una desaceleración momentánea, que reduce el dosado, seguida de una aceleración. Situación que se da principalmente en condiciones de cambio de marcha donde el conductor no retira completamente el pie del acelerador (corte de inyección rápido y parcial). En esta situación la sonda lambda no alcanza a mantener el dosado en el rango de operación normal.

Figura 12-13: Emisión másica instantánea y dosado medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2010.

Por otro lado, en la situación b (Figura 12-13), es similar a la anterior, pero durante la aceleración posterior al corte de inyección el dosado no sube de forma inmediata o se mantiene por debajo del punto de operación normal.

Figura 12-14: Emisión másica instantánea de NO_x y dosado medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.

En la Figura 12-14, se muestra las emisiones instantáneas de NO_x y el dosado relativo del Toyota Yaris 2000, normativa Euro 2. En la Figura 11-29 se vio que las emisiones de NO_x del Y2000 son entre 13 y 15 veces mayores que las del Toyota Euro 5 (Yaris 2010), resultado que se confirma a simple vista comparando la Figura 12-14 con la Figura 12-13. Se observa que en el Yaris Euro 2, las emisiones de NO_x también se producen principalmente en situaciones de cortes momentáneos de inyección y en situaciones transitorias en las que el control de la inyección no es muy preciso.

Respecto a las emisiones de CO

En la Figura 11-32 se mostró de forma comparativa las emisiones de CO de los vehículos turismo gasolina Euro 2 y Euro 5. En esta gráfica se veía que el factor de emisión de CO del Yaris modelo 2010 es escasamente el 2% del factor de emisión de CO del Yaris Euro2. En la Figura 12-15, se observa que en el vehículo Euro 2, las emisiones de CO se deben principalmente al hecho de que el dosado por momentos se hace mayor que 1 (por claridad la curva de dosado instantáneo muestra sólo valores mayores a 1, para ver la similitud con la curva de emisión másica de CO).

Figura 12-15: Emisión másica instantánea de CO y dosado medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2000.

Figura 12-16: Emisión másica instantánea de CO y dosado medidos con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Turismo gasolina Toyota Yaris 2010.

En la Figura 12-16, se muestra la curva de emisión másica instantáneo de CO del turismo gasolina Euro 5. En esta curva se observa que las emisiones de CO son prácticamente despreciables salvo en las condiciones de arranque, donde el catalizador está más frío. En este vehículo no se observaron condiciones de operación en mezcla rica y por lo tanto la formación de CO se mantiene baja.

Respecto a las emisiones de HC

Con respecto a las emisiones de HC, en la Figura 11-35 se mostró la diferencia tan grande que existe entre el factor de emisión de HC de los vehículos turismo gasolina Euro2 y Euro5. De igual forma, en la Figura 12-17, se muestra las emisiones másicas instantáneas de HC de los dos vehículos turismos ensayados mostrando los tramos correspondientes a la Figura 12-15 y a la Figura 12-16. Se observa la influencia de la temperatura del catalizador en el Yaris 2000, pues las emisiones se hacen mayores justo al comienzo del ensayo y después son mínimas, salvo en momento puntuales donde el dosado se hace muy rico.

Figura 12-17: Emisión másica instantánea de HC medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico urbano. Comparación Toyota Yaris 2000 y Yaris 2010.

12.2.3 Turismos diésel en tráfico extraurbano

En la Figura 12-18 se muestra parte del trozo inicial del recorrido extraurbano mostrado en la Figura 11-3, en la incorporación a la autopista A6. En esta figura se observa el régimen de giro del motor, la velocidad de circulación, el consumo y el dosado relativo del vehículo turismo Peugeot 406 2L cuyas características técnicas se mostraron en la Tabla 11.1. Se observa la gran similitud entre la señal del consumo y el dosado relativo, notándose que en este vehículo turismo para régimen de giro mayor a 2000 rpm entra en funcionamiento el turbo-compresor (zonas sombreadas de la Figura 12-18), porque para un mismo dosado relativo, el consumo de combustible en estas condiciones de alto régimen es mayor y por lo tanto la cantidad de aire que ha entrado al motor también ha tenido que ser mayor. Se observa que estas condiciones de alto régimen corresponden a las aceleraciones para el cambio de marcha y condiciones de velocidad mayor de 90 km/h. También se observa que en este vehículo en particular el mínimo consumo se da para régimen de giro menor a 2000 rpm, y a una velocidad de 90 km/h, que corresponde al mínimo encontrado por el análisis de los factores exógenos y que se mostró en la Figura 11-38 (en condiciones de conducción normal y pendiente 0%). Por

lo tanto si se quiere consumir lo mínimo en un determinado recorrido, sería necesario mantener el motor por debajo de este régimen de giro (en principio el régimen de giro en el cual empieza a trabajar el turbo depende del diseño particular de cada turbo-compresor).

Figura 12-18: Registro instantáneo de velocidad, régimen de giro, consumo y dosado relativo de un tramo de acceso a autopista A6 usando equipo MIVECO-PEMS. Turismo diésel Peugeot 406 2L IDI.

Figura 12-19: Consumo y emisión másica instantánea de NO_x medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico extraurbano. Turismo diésel Peugeot 406 2L.

En cuanto a las emisiones de NO_x , en la Figura 12-19 (correspondiente a la zona graficada en la Figura 12-18) se confirma que las emisiones de NO_x están muy relacionadas con el consumo de combustible y explican las tendencias encontradas en la Figura 11-42, en donde se encontraba un factor diferente de gramos de NO_x por gramo de CO_2 diferente para tráfico urbano y para tráfico extraurbano. Y esto se debe principalmente a que en tráfico extraurbano, el régimen de giro medio es mayor de 2000

rpm, por lo tanto, el factor de emisión de NO_x extraurbano es el correspondiente al motor cuando el aporte del turbo es significativo y el otro, que se ha hallado en condiciones de tráfico urbano donde sólo puntualmente se superan los 2000 rpm, el factor de gramos de NO_x por gramo de CO_2 corresponde al motor cuando el efecto del turbo es mínimo y por lo tanto es como si fuera un motor atmosférico. Esto se explica porque como se comentó en el apartado 3.1.2, la formación de NO_x está ligada a la temperatura de combustión, que para un mismo dosado, es mayor a medida que aumenta la masa de aire/combustible dentro de la cámara de combustión y por esta razón, cuando el régimen es elevado, el turbo aporta mayor presión al aire de admisión, y por lo tanto aumentan las emisiones de NO_x en relación al consumo de combustible. Es también por esta misma razón por la que se emite mayor cantidad de NO_x en conducción urbana agresiva, dado que en este tipo de conducción el régimen de giro es mayor.

Figura 12-20: Emisión másica instantánea de CO y HC medido con equipo MIVECO-PEMS. Tráfico extraurbano. Turismo diésel Peugeot 406.

En cuanto a las emisiones de CO y HC, como se comentó en el apartado 11.5, no están relacionadas directamente con factores exógenos, porque dependen de condiciones específicas de funcionamiento del motor. En la Figura 12-20, se muestran, para un recorrido completo del circuito mostrado en la Figura 11-3, las emisiones de CO, HC, la temperatura de los gases de escape, la velocidad del vehículo y el dosado relativo sólo graficado para valores mayores de 0,8 para facilitar la visualización. De igual forma que en tráfico urbano (Figura 12-9 y Figura 12-10), se demuestra que las emisiones de CO y HC están ligadas a situaciones puntuales donde el dosado relativo sobrepasa un determinado valor. En tráfico extraurbano a diferencia del urbano, las emisiones de CO y HC disminuyen notoriamente debido a que la temperatura de los gases de escape y por lo tanto del catalizador de oxidación aumenta, mejorando su rendimiento, y por lo tanto llega a saturar a mayor dosado que en tráfico urbano, mostrando picos de emisión

cuando se alcanzan dosados mayores de 0,8 que corresponden a situaciones transitorias donde hay aceleraciones fuertes, normalmente después de una fase de desaceleración.

En cuanto a las emisiones de HC en concreto, se observa que práctica se eliminan en tráfico extraurbano, mostrando sólo los picos donde el dosado es mayor de 0,8 y la temperatura de los gases es menor de 100 °C.

12.3 Conclusiones

Los factores más influyentes en las emisiones y el consumo de combustible son el dosado relativo, la temperatura del catalizador y la marcha.

Claramente se comprueba que la estrategia de conducir en la marcha más larga posible reduce el consumo y las emisiones de NO_x . Sin embargo, esta estrategia tiene un efecto sobre las emisiones de CO y HC que dependen de la tecnología propia del vehículo.

Vehículos turismo diésel

En los vehículos turismo diésel, el aumento de consumo durante la conducción agresiva se debe principalmente a que durante las aceleraciones fuertes el pico de consumo es mayor y trabajar el motor a más de 2000 rpm hace que entre el turbo-compresor, dando una mayor potencia, pero con menor rendimiento. De esta forma, el menor consumo se presenta cuando el vehículo turbo-diésel trabaja en la zona en donde aún no entra en funcionamiento el turbo, que en el caso del vehículo Peugeot 406 utilizado es a 2000 rpm.

Las emisiones de CO y HC son importantes en tráfico urbano, en especial durante el arranque en frío. En tráfico extraurbano, estas emisiones son despreciables. La emisión de CO se da como picos en los instantes donde el dosado relativo se hace mayor de 0,7 en tráfico urbano y 0,8 en extraurbano debido al aumento en la formación de CO por la reducción en la cantidad de aire y por la saturación del catalizador de oxidación. Las emisiones instantáneas de HC son más continuas y en condiciones donde no ha entrado en funcionamiento el turbo-compresor están relacionadas con el dosado relativo. En tráfico extraurbano estas emisiones son prácticamente nulas, debido a que al entrar en funcionamiento el turbo-compresor, la temperatura de combustión aumenta y por lo tanto la fracción de inquemados se reduce drásticamente.

Las emisiones de NO_x están asociadas al consumo de combustible, por lo tanto todo lo que implique un mayor consumo también implica unas mayores emisiones de NO_x . La conducción agresiva aumenta las emisiones de NO_x , debido a que entra en funcionamiento el turbo-compresor por encima de 2000 rpm (Peugeot 406) y aumenta la temperatura de combustión por el aumento de la masa de aire que entra en el motor. Por este motivo, el factor de gramos de NO_x por gramos de CO_2 de vehículo turbo-diésel en tráfico extraurbano es mayor que en tráfico urbano en conducción normal.

Vehículos turismo gasolina

También se comprueba en turismos gasolina que la conducción agresiva aumenta de forma importante el consumo y las emisiones de CO₂, debido al aumento de los picos de consumo durante las aceleraciones y por el hecho de operar el vehículo a un régimen de giro mayor.

Entre los dos vehículos gasolina de inyección ensayados, con el mismo tamaño de motor, mismo fabricante, mismo modelo comercial pero diferente normativa de emisiones, se comprueba la reducción efectiva de las emisiones contaminantes del vehículo turismo gasolina en tráfico real para cumplir la normativa de emisiones contaminantes más estricta (Euro 5). Para lograr este cumplimiento, se comprueba un cambio en la estrategia de control del motor.

El vehículo Euro 2 sobrepasa en momentos puntuales de aceleraciones fuertes el dosado relativo igual a 1, mientras que el vehículo Euro 5 nunca llega ni siquiera a tener dosado estequiométrico. Este control más estricto, el conductor lo siente como que el vehículo Euro 5 tiene menor “pique”, pero esto es controlado electrónicamente para minimizar las emisiones de CO, HC y reducir el consumo.

Las emisiones de CO y HC son importantes durante el arranque en frío, pero fuera de estas condiciones son muy bajas siempre y cuando el dosado relativo no sobrepase la unidad.

Las emisiones de NO_x en los motores gasolinas no son continuas como en el caso de los vehículos diésel, sino que por el contrario, se presenta sólo en forma de picos de emisión en situaciones transitorias donde se presenta un corte instantáneo de inyección seguido de una aceleración, porque la cámara de combustión permanece a alta temperatura y la disminución del dosado aumenta la formación de NO_x, por la mayor presencia de aire. También en el caso de que se den condiciones de mezcla rica y un elevado grado de carga también se presentan picos significativos de emisión por saturación del catalizador de tres vías.

Se comprueba la reducción en las emisiones en tráfico real de NO_x del vehículo Euro 5 con respecto al vehículo Euro 2. Esto es debido principalmente al mejoramiento en la tecnología del catalizador de tres vías, aumentando la capacidad de reducción catalítica del NO_x y por el mejoramiento del control de la inyección dado por la sonda lambda.

Parte IV.

Conclusiones y trabajos futuros

Capítulo 13

CONCLUSIONES GENERALES

Debido a que las conclusiones parciales de cada uno de los aspectos tratados en la presente tesis doctoral se han incluido al final de cada uno de los capítulos, en este, se presentan únicamente las conclusiones generales que responden a los objetivos principales que se plantearon en el apartado 1.4 y a sus correspondientes hipótesis.

13.1 Conclusiones sobre el estudio de los problemas asociados a la medición embarcada de emisiones gaseosas y desarrollo de un equipo experimental

13.1.1 Objetivo 1

Desarrollar y validar un equipo portátil de medida de emisiones (PEMS) capaz de medir las emisiones máscas instantáneas de CO₂, CO, HC, NO_x, partículas así como consumo de combustible instantáneo en motores de combustión interna de vehículos durante su funcionamiento en tráfico real.

Este objetivo se cumplió en su totalidad. Se desarrolló y validó el equipo portátil de medida de emisiones que hemos denominado MIVCO-PEMS, que permite la medida instantánea del consumo de combustible y de las emisiones máscas de CO₂, CO, HC, NO_x de vehículos en condiciones de tráfico real.

Hipótesis 1.1

Los analizadores e instrumentos utilizados en el PEMS deben cumplir los requisitos establecidos por las normativas desarrolladas para estos equipos, en cuanto a la respuesta dinámica, exactitud, repetibilidad, precisión y ruido.

El grado de exactitud en la medida de las emisiones másicas instantáneas en un PEMS depende, entre otras cosas, de la calidad de cada uno de los analizadores que lo integran. Las características técnicas más importantes que determinan la calidad de un analizador, que pretenda ser integrado en un PEMS, son el tiempo de respuesta (o el t_{10-90}) y la exactitud.

Debido a que actualmente no existe ninguna normativa publicada para la medida de emisiones en vehículos turismos en tráfico real y aún no se ha publicado la normativa europea que establece los requerimientos técnicos que deben cumplir los equipos portátiles de medida de emisiones (PEMS), se ha considerado como normativa de referencia la normativa americana 40CFR 1065-J diseñada para medir emisiones en vehículos pesados (Heavy Duty Vehicles) en uso real. El cumplimiento de esta normativa es un buen indicador, sin embargo, es necesario medir para cada analizador los parámetros contemplados (exactitud, t_{10-90} , repetibilidad y ruido) incluyendo todos los accesorios de montaje que se usen en la medida on-board. Por lo tanto, se ha propuesto una metodología complementaria que permite la validación de la medida instantánea de este tipo de analizadores teniendo en cuenta los accesorios de montaje.

La frecuencia de muestreo que establece la normativa americana de 1 segundo (ver Tabla 4.2), es insuficiente para la medida de emisiones instantáneas en vehículos turismo en tráfico real.

En términos generales, teniendo en cuenta los accesorios de montaje, los analizadores utilizados en el equipo MIVECO-PEMS cumplen los requisitos establecidos en la normativa americana 40CFR 1065-J, aunque en algunos casos el tiempo de respuesta de los analizadores utilizados es mayor lo que implica un mayor error en la determinación de los factores de emisión por integración.

Hipótesis 1.2

El caudalímetro que hace parte del PEMS debe cumplir los criterios de exactitud, repetibilidad, precisión y ruido, así como respuesta dinámica, establecidos por las normativas desarrolladas para estos equipos.

El caudalímetro es el instrumento más importante que integra el PEMS, debido a que fallos en su medida invalida la determinación de todos los factores de emisión y consumo.

Al igual que en el caso de los analizadores, como referencia se ha utilizado la normativa americana 40CFR 1065-J. El cumplimiento de esta normativa es, en términos generales, un buen indicador; pero no es suficiente para garantizar la correcta medida del caudal de gases de escape.

Para la medida de caudal de gases de escape de motores de combustión interna alternativos de vehículos se pueden utilizar únicamente caudalímetros que hayan sido diseñados específicamente para esta aplicación, debido a la presencia de caudal pulsante, a las grandes y repentinas variaciones en el caudal medio, al elevado contenido de

humedad y partículas y a los cambios continuos en la composición y temperatura de estos gases.

No es suficiente el tiempo de respuesta (t_{10-90}) de 1 segundo que establece la normativa (ver Tabla 4.2), puesto que el caudalímetro debe ser capaz de medir el caudal instantáneo que es pulsantes en condiciones de ralenti con frecuencias de cerca a 30 Hz, o estar diseñado y calibrado para medir el caudal medio en estas condiciones. Se sugiere un tiempo de respuesta (T_{90}) de máximo 0,02 s. La normativa americana 40 CFR parte 1045, en este aspecto, no es tan exigente debido a que está pensada para PEMS en uso en motores pesados (Heavy Duty Vehicles) utilizando el protocolo de ensayo conocido como “Not To Exceed” (apartado 3.3.2) que no incluye las condiciones de ralenti ni baja carga, que si se tienen en cuenta en la determinación de los factores de emisión en banco de rodillos y en tráfico real.

Tampoco es suficiente la frecuencia de muestreo que establece la normativa de 1 s (ver Tabla 4.2) para el caudal medio en aplicaciones de medida de emisiones en vehículos turismo en tráfico real urbano. Se sugiere una frecuencia mínima de muestreo/registro para el caudal medio de 10 Hz. En caso de que el caudal medio se calcule en base al caudal pulsante instantáneo, la frecuencia de muestreo del caudal instantáneo debe ser de mínimo 1000 Hz.

Como parte de la tesis doctoral, se desarrolló un caudalímetro propio que integra el equipo MIVECO-PEMS y tanto su funcionalidad como la medida instantánea ha sido validada satisfactoriamente, usando de referencia equipos PEMS comerciales.

Hipótesis 1.3

En el caso de que la respuesta dinámica o alguna de las prestaciones de los analizadores o del caudalímetro no cumplan con las especificaciones mínimas establecidas por las normativas desarrolladas para estos equipos, puede ser parcialmente corregida por medio de métodos analíticos o de tratamiento de señales.

El incumplimiento por parte de los analizadores o del caudalímetro de las especificaciones mínimas establecidas por las normativas para equipos de medida de emisiones en vehículos pueden obedecer a diferentes causas que se deben determinar, puesto que la metodología aplicable para la corrección de las deficiencias difiere en cada caso.

Hay causas físicas ajenas a la tecnología de medida que afectan negativamente a la medida de los analizadores y que no pueden ser corregidas con métodos analíticos o de tratamientos de señales. Por ejemplo una baja temperatura en cualquier punto de la línea de muestreo del analizador de HC en motores de encendido por compresión ocasiona la condensación de las fracciones más pesadas de los hidrocarburos inquemados volátiles, haciendo que se mida una menor concentración de HC o el caso de problemas de absorción/desorción incontrolada de la sustancia a medir en algún elemento de la línea de muestreo. Esta medida errónea no se puede corregir, puesto que no es posible determinar qué fracción de HC se ha condensado, absorbido o desorbido. En estos casos, la única solución es corregir el problema en su propia fuente, para lo cual es

necesario hacer un seguimiento continuo de la señal a través de toda la línea de medida y corregir el defecto físico encontrado.

Debido a que no es necesaria la medida en tiempo real con equipos PEMS, hay errores que se pueden corregir, al menos parcialmente, de forma analítica o por tratamiento de señales en fase de posprocesamiento, como el caso de la distorsión ocasionada por el volumen interior de los filtros presentes en las líneas de muestreo. Para este tipo de corrección es necesario realizar ensayos de caracterización con medidas simultáneas del analizador en estudio y un analizador de referencia.

A pesar de que en algunos casos es posible hacer la corrección de la señal por medios analíticos o de tratamiento de señales, como expuso Manchur & Checkel de la Universidad de Alberta, queda la incertidumbre de la concentración real en los picos de concentración, con lo cual se introduce una incertidumbre en los resultados definitivos (Manchur & Checkel, 2005).

Hipótesis 1.4

Es posible validar la medida instantánea del PEMS desarrollado con respecto a la medida instantánea de equipos PEMS comerciales certificados a nivel internacional.

A pesar de que los equipos PEMS comerciales certificados a nivel internacional pueden presentar fallos en su funcionamiento, es posible utilizarlos para validar la medida instantánea de un equipo PEMS desarrollado, y mejor aún, esta validación es necesaria, pues permite identificar problemas y ver la respuesta real de los analizadores y del caudalímetro en condiciones transitorias y en uso con gases reales de escape de motor.

La validación de los analizadores que integran los equipos PEMS propuesta por la normativa americana 40CFR parte 1065 se realiza con botellas de calibración, donde se mide el tiempo de respuesta, la exactitud, repetibilidad y el ruido. Este procedimiento resulta ser opaco e incluso insuficiente para garantizar la medida instantánea de los PEMS debido a que el procedimiento de la normativa se basa sólo en puntos estacionarios y en los equipos PEMS es muy importante la medida en transitorios. Por lo tanto, de cara a validar adecuadamente la medida instantánea de un PEMS recomendando la medida comparada del PEMS con equipos de laboratorio de medida instantánea o equipos PEMS comerciales certificados a nivel internacional en ciclos de operación que incluyan tanto transitorios como estados estacionarios.

De igual manera, para la validación de la medida instantánea es importante el uso de gases reales de escape de motor, con el fin de comprobar el buen funcionamiento de los equipos que eliminan la humedad de los gases, en caso de que se usen y verificar y/o corregir los problemas de interferencia de los diferentes componentes del gas de escape en la medida de cada uno de los analizadores que integran el PEMS.

Para el caso del caudalímetro, es muy importante la validación de la medida instantánea de caudal másico de gases de escape usando en serie otro caudalímetro de medida instantánea certificado, debido a que no todos los caudalímetros pueden medir este tipo de caudal y esta es la variable más difícil y más importante de medir en un PEMS.

13.1.2 Objetivo 2

Determinar los factores que influyen sobre la calidad de la medida de emisiones con PEMS.

Este objetivo se ha cumplido gracias a que abordar el desarrollo del equipo portátil de medida de emisiones MIVECO-PEMS ha permitido estudiar por separado los problemas en la medida de cada uno de los analizadores, el caudalímetro y demás instrumentos que lo integra, así como los problemas en la integración entre las diferentes señales. Adicionalmente se ha realizado un estudio de propagación de errores en la determinación de los factores de emisión y consumo en tráfico real que permite conocer cuantitativamente los factores que influyen sobre la calidad de la medida de emisiones con este tipo de equipos.

Hipótesis 2.1

Las características dinámicas de los analizadores y del caudalímetro (exactitud y tiempo de respuesta), así como la adecuada sincronización y tiempo de muestreo de las diferentes señales determinan la capacidad del equipo portátil de medida de emisiones de medir los transitorios de operación de un motor.

Efectivamente tanto las características dinámicas de los analizadores utilizados y del caudalímetro que integran un equipo portátil de medida de emisiones PEMS, así como la adecuada sincronización y tiempo de muestreo determinan la capacidad del equipo para medir adecuadamente las emisiones másicas instantáneas que se presentan durante los transitorios de funcionamiento de un motor de un vehículo en tráfico real.

En especial, es de gran importancia el tiempo de respuesta de los analizadores y del caudalímetro, debido a que elevados tiempos de respuesta suavizan la señal e impiden la medida correcta durante los picos de emisión. Aunque este defecto se podría corregir con herramientas de tratamientos de señales como parte del proceso de posprocesamiento, el valor exacto de las concentraciones de contaminantes y del caudalímetro durante estos picos seguirá siendo impreciso.

También es de suma importancia la correcta sincronización de las señales, debido a que por cada 0,1 segundos de falta de sincronización de las señales puede llegar a representar un error de más del 1% en la determinación de los factores de emisión másicos totales.

Hipótesis 2.2

La respuesta dinámica de cada uno de los analizadores y del caudalímetro se ve afectada por el tipo de montaje y los accesorios de montaje utilizados.

Efectivamente el montaje y los accesorios de montaje utilizados en un equipo portátil de medida de emisiones PEMS influyen negativamente en la respuesta dinámica de los analizadores y del caudalímetro y por lo tanto se hace necesaria la verificación de la respuesta dinámica de cada componente cada vez que se instale el equipo en un vehículo. En caso de líneas de muestreo en depresión la estanqueidad de las conexiones puede causar la dilución de la muestra; el aumento en la longitud de las líneas de

muestreo causa un aumento en el tiempo de retardo de la señal. El uso de filtros en las líneas de muestreo distorsiona la señal por el fenómeno de difusión que se da en el interior de los filtros, defecto que se incrementa con el aumento del volumen interno de los filtros.

En cuanto a la medida de caudal, los accesorios utilizados para la conducción de los gases hacia el caudalímetro, en especial la longitud del tubo de extensión afecta la amplitud de la onda de caudal, que puede distorsionar la medida de caudal durante los periodos de ralenti.

13.1.3 Objetivo 3

Validar el PEMS desarrollado en cuanto a los factores de emisión y factores de consumo.

Este objetivo se cumplió, gracias a que se realizaron pruebas en el banco de rodillos de un laboratorio oficial para homologación de emisiones en vehículos turismos. Los resultados de la validación de los diferentes factores de emisión y consumo se corresponden con el estudio de propagación de errores en los equipos PEMS.

Hipótesis 3.1

Una vez validada la medida instantánea con los equipos PEMS comerciales, es posible validar la medida global de factores de emisión y consumo con respecto a los equipos convencionales de certificación de medida de emisiones en banco de rodillos.

Debido a que los factores de emisión y consumo en un equipo portátil de medida de emisiones PEMS se calculan integrando la señal de emisión másica instantánea y consumo instantáneo, los errores individuales en la medida instantánea se acumulan y por lo tanto la exactitud en la medida de los factores de emisión y consumo se reduce. Razón por la cual una adecuada validación de la medida instantánea de emisiones, debe ser realizada previamente a la validación de los factores globales de emisión y consumo para reducir al máximo el error en la medida instantánea.

Debido a que la validación de los factores globales de emisión y consumo se realiza con equipos de laboratorio que miden la concentración media de la muestra acumulada en una bolsa, esta validación permite determinar el error global en la determinación de estos factores pero no permite conocer la razón de las discrepancias encontradas.

13.2 Conclusiones sobre los factores que influyen en las emisiones y el consumo de combustible en tráfico real

13.2.1 Objetivo 4

Desarrollar una metodología para el estudio de las emisiones y consumo de vehículos en tráfico real.

Se desarrolló una metodología para el estudio de emisiones y consumo de vehículos en tráfico real que ha sido probada ampliamente. Se realizaron ensayos en 7 vehículos ligeros diferentes (5 turismos con motor diésel y 2 con motor de gasolina), 2 vehículos todoterreno y se han obtenido factores de emisión y consumo para más de 2500 km (2000 km en tráfico urbano y 550 km en extraurbano). Con los datos obtenidos se han realizado varios estudios sobre influencia de factores exógenos sobre las emisiones y consumo en tráfico real, algunos de estos trabajos ya están publicados en revistas científicas.

Hipótesis 4.1

Es posible integrar en el equipo portátil de medida de emisiones, la medida de las variables que representen los diferentes factores exógenos y endógenos que se van a estudiar.

En base a un estudio bibliográfico y experimental se determinaron las variables que eran necesarias de medir o determinar para adelantar los diferentes estudios sobre la influencia de los factores exógenos y endógenos en el consumo de combustible y las emisiones de los vehículos turismo en tráfico real (ver apartado 11.2). De esta forma, se integró en el equipo de medida de emisiones MIVECO-PEMS la medida del régimen de giro del motor, la velocidad del vehículo y su posición geográfica, la temperatura de motor y las variables meteorológicas (presión, temperatura atmosférica y velocidad de viento) y se desarrolló la aplicación informática que permite determinar el marcha usada en cada tramo del recorrido, la pendiente de la vía en base a la medida directa de la presión atmosférica y la potencia instantánea.

De esta forma, como medida directa o como cálculo a partir de variables medidas, se han podido integrar en el equipo portátil de medida de emisiones PEMS las variables necesarias para llevar a cabo los diferentes estudios sobre la influencia de los factores endógenos y exógenos.

Hipótesis 4.2

Es posible hacer un análisis de la influencia de los factores exógenos y endógenos del vehículo sobre el consumo de combustible y las emisiones en base a medidas en tráfico real.

A pesar de la variabilidad intrínseca de los ensayos en tráfico real, en el presente trabajo de investigación se demuestra que si es posible utilizar este tipo de ensayos para analizar

la influencia de los factores endógenos y exógenos sobre el consumo y las emisiones contaminantes de los vehículos turismo en tráfico real. Se ha podido comprobar la influencia del estilo de conducción, del nivel de tráfico, de la infraestructura vial (representados en función de la velocidad media de circulación y de la pendiente de la vía), del tipo de vehículo y del combustible empleado.

13.2.2 Objetivo 5

Determinar la influencia de factores exógenos como la congestión del tráfico, el estilo de conducción, infraestructura vial, límites de velocidad, tipo de vehículo y combustible sobre las emisiones contaminantes y el consumo de combustible.

Este objetivo se ha cumplido ampliamente. Entre las principales conclusiones obtenidas de los diferentes estudios adelantados (ver apartado 11.7), podemos citar:

- Influencia del nivel de tráfico en conducción urbana: en ciudad un mayor nivel de tráfico implica la reducción de la velocidad media de circulación, con el aumento de la frecuencia y duración de las paradas. Este fenómeno conlleva al aumento significativo en el consumo de combustible. Por ejemplo en un vehículo turismo diésel de 1800 cm³, la reducción de 20 a 10 km/h en la velocidad media de circulación ocasiona un aumento en el consumo de combustible de 8 a 11 L/100 km, que representa un aumento de casi el 40% y en vehículos turismo gasolina, la misma reducción de velocidad, representa un aumento de 8 a casi 14 L/100 km que equivale a un aumento del 75%. De igual forma, las emisiones de NO_x en los vehículos turismo diésel también aumentan de forma significativa, debido a que son proporcionales al consumo de combustible. Por lo que evitar los elevados niveles de tráfico en las ciudades permite reducir el consumo de combustible, reduce las emisiones de CO₂ y las de NO_x.
- Estilo de conducción: El estilo de conducción afecta de forma importante las emisiones contaminantes y el consumo de combustible. Conducir con un estilo “agresivo” con predominio del uso de marchas cortas, elevados regímenes de motor, aceleraciones fuertes, etc., genera un aumento de más del 40% en el consumo de combustible (L/100 km) de emisiones de CO₂ y NO_x en turismos diésel, mientras que en vehículos turismo gasolina el aumento en el consumo de combustible no es tan acusado: 25% en vehículos turismo sin sistema Stop/Start y tan sólo el 13% en vehículos equipados con sistema Stop/Start. Por lo tanto una adecuada formación de los conductores en cuanto a las técnicas de conducción suave, es una medida adecuada para la reducción en el consumo, emisiones de CO₂ y de NO_x.
- Infraestructura vial: La infraestructura vial, dada por el número y tipo de cruces por kilómetro, número de carriles por sentido, pendiente, etc., determina la velocidad media máxima de circulación. La reducción del número de cruces por kilómetro, el uso de glorietas, el aumento del número de carriles por sentido y las demás medidas conducentes al aumento de la velocidad media de circulación son medidas adecuadas para la reducción en el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ y NO_x.

- Límites de velocidad: de forma contraria a lo que se podría inicialmente pensar, la reducción en el límite de velocidad en algunas zonas específicas puede ser una medida adecuada para la reducción en el consumo y en las emisiones contaminantes. Por ejemplo, se demostró que la reducción en el límite de velocidad en calles locales de un solo carril no afecta a la velocidad media de circulación, pero si hace que se reduzcan las ratas de aceleración, por lo que el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ y NO_x por kilómetro en un turismo diésel convencional se reducen. Así mismo una reducción en el límite de velocidad de 120 km/h a 110 km/h en vías extraurbanas permite reducir ligeramente el consumo de combustible, en este caso debido a que a velocidades de circulación por encima de 90 km/h el aumento en la velocidad genera un aumento en el consumo de combustible.
- Tipo de vehículo: los vehículos ligeros con motor de gasolina tienen una influencia mucho más acusada de la velocidad media de circulación que los vehículos con motor diésel. En tráfico urbano, los vehículos de gasolina a medida que aumenta la velocidad media de circulación el consumo se reduce, mientras que en los vehículos diésel en tráfico urbano con velocidad de circulación por encima de 20 km/h, el consumo de combustible por kilómetro prácticamente es constante. Los vehículos diésel o gasolina equipados con sistema Stop/Start permiten reducir el consumo de combustible y de igual forma las emisiones de CO₂ en tráfico urbano. Por lo que promover el uso de vehículos turismo equipados con esta tecnología es una medida adecuada para reducir el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ en las grandes ciudades.

Hipótesis 5.1

El consumo de combustible está determinado por la congestión del tráfico, el estilo de conducción, la infraestructura vial, los límites de velocidad impuestos, etc. y es posible determinar relaciones empíricas que relacionen el consumo de combustible con las variables que representan estos factores exógenos.

Gracias a la multitud de ensayos realizados en tráfico urbano con vehículos ligeros con motor diésel y de gasolina, se ha demostrado que efectivamente el consumo de combustible por kilómetro depende del nivel de tráfico (en la medida en que el aumento este conlleva una reducción en la velocidad media de circulación), del estilo de conducción, de la infraestructura vial (por la influencia en la máxima velocidad media de circulación, y principalmente por la pendiente de la vía) y de los límites de velocidad impuestos.

Ha sido posible determinar relaciones empíricas para vehículos turismo gasolina y diésel, que explican alrededor del 80% de la variabilidad observada en base a variables directamente relacionadas con los factores exógenos estudiados.

Hipótesis 5.2

Los factores de emisión de HC, CO, NO_x y partículas están determinados por factores exógenos relativos a la congestión del tráfico, el estilo de conducción, la infraestructura vial, etc. y es posible

determinar relaciones empíricas que relacionen los diferentes factores de emisión con las variables que representan estos factores exógenos.

En cuanto a los factores de emisión de HC, CO y NO_x en general no se ha podido demostrar una relación directa con los factores exógenos estudiados, muy posiblemente debido a la presencia de los catalizadores de oxidación en los vehículos con motor diésel y catalizadores de tres vías en los vehículos con motor de gasolina. Salvo en el caso del factor de emisión de NO_x en vehículos turismo diésel, en donde se ha demostrado que es proporcional al consumo de combustible y por lo tanto guarda relación con los factores exógenos.

13.2.3 Objetivo 6

Determinar la influencia de los factores endógenos como pueden ser las condiciones de funcionamiento del motor (régimen de motor, la riqueza de mezcla, marcha, temperatura del motor, etc) sobre las emisiones y consumo instantáneo.

De los 2500 km (2000 km en tráfico urbano y 550 km en extraurbano) recorridos en tráfico real más los ensayos realizados en banco de rodillos y de los cuales se guardó registro de las emisiones, caudal y variables dinámicas y medioambientales, se ha estudiado las curvas instantáneas con el fin de determinar la influencia de las variables endógenas sobre el consumo y las emisiones. Las principales conclusiones se relacionan en los siguientes apartados.

Hipótesis 6.1

El consumo instantáneo de combustible está determinado por factores endógenos como el régimen de motor, la riqueza de mezcla, marcha, temperatura del motor, etc., y es posible entender las diferencias en el consumo en base a estos factores endógenos.

En cuanto al consumo de combustible y emisiones de CO₂, se ha observado que para una misma velocidad el consumo de combustible es mayor cuando se conduce en marchas cortas, porque el consumo instantáneo está muy relacionado con el régimen de giro del motor, por lo que mantener el motor a un mayor régimen de giro o tener aceleraciones fuertes llevando el motor a un elevado régimen de giro se traduce en mayores consumos medios y en picos de consumo mayores.

Hipótesis 6.2

Las emisiones máscas instantáneas de HC, CO, NO_x y partículas están determinadas por factores endógenos como régimen de motor, riqueza de mezcla, marcha, temperatura del motor, etc., y es posible determinar las condiciones de funcionamiento del motor en las que se emiten los diferentes contaminantes.

Efectivamente las emisiones máscas instantáneas están determinadas por los factores endógenos, entre las principales conclusiones tenemos:

- Las emisiones de HC son importantes sólo en arranque en frío tanto en vehículos con motor diésel como en vehículos con motor gasolina. Por lo tanto la variable endógena más relevante es la temperatura del motor y en especial del catalizador.
- Las emisiones CO son elevadas principalmente en arranque en frío y en el caso de los motores de gasolina adicionalmente son importantes en las situaciones donde el dosado se hace rico, o en motores diésel cuando el dosado se acerca al estequiométrico. Salvo estas situaciones, las emisiones de CO tanto en motores diésel como de gasolina son despreciables.
- Las emisiones de NO_x en vehículos con motor diésel están muy relacionadas con el consumo instantáneo y con el funcionamiento del turbo, pues a medida que el turbo incrementa el caudal de aire se elevan las temperaturas dentro de la cámara de combustión. En los motores gasolina, estas emisiones están más relacionadas con temperaturas elevadas en el sistema de escape y con situaciones transitorias como cortes momentáneos de inyección después de aceleraciones fuertes en donde el dosado se hace ligeramente pobre.

Capítulo 14

TRABAJOS FUTUROS

Una vez concluidos los trabajos de la presente tesis doctoral, se abren varias líneas de trabajo de gran interés a nivel nacional, europeo e internacional. Las líneas de investigación que propongo son:

Desarrollo de PEMS

En cuanto al desarrollo del equipo MIVECO-PEMS, sería interesante estudiar la forma de reducir al mínimo la sensorización utilizada para la realización de estos estudios, de forma que el tamaño, el peso y el consumo eléctrico del equipo PEMS se reduzca considerablemente. Además sería interesante estudiar la viabilidad de reemplazar parte de los sensores utilizados por datos de medida interna del vehículo y extraídos a través del sistema OBD. En cuanto a la medida de masa de partículas, que a nivel mundial aún no está del todo desarrollado y validado para la medida on-board, sería necesario continuar trabajando con el fin de validar su medida en base a ensayos con equipos estacionarios de laboratorio.

Estudios experimentales en tráfico real

Es interesante continuar los ensayos en tráfico real para ir formando una base de datos cada vez más amplia con diferentes tipos de vehículos en tráfico real urbano y extraurbano. Para esto es necesario determinar un conjunto de modelos y marcas de vehículos sobre los cuales resulta útil y de interés medir en tráfico real, sea por la cantidad de unidades en circulación o por elevados niveles de consumo o emisiones. De esta forma se podría llegar a clasificar los vehículos por emisiones y consumos en tráfico real. Además permitiría hacer un estudio más amplio de comparación entre consumo y emisiones de homologación y el consumo y las emisiones en tráfico real de vehículos.

Adicionalmente, se pueden continuar haciendo estudios particulares que permitan ir ampliando el conocimiento de los factores de emisión y consumo en tráfico real. Como por ejemplo, sería interesante medir en coches híbridos serie y paralelo y compararlos con vehículos convencionales diésel y gasolina, con el fin de hacer un estudio en tráfico real de la reducción de impacto ambiental de vehículos turismo que integra estas tecnologías. También es interesante continuar con estudios sobre la influencia sobre el consumo y las emisiones de biocombustibles en vehículos turismo diésel o gasolina en tráfico real.

Desarrollo de modelos en base a medidas de consumo y emisiones en tráfico real

Una de las líneas de investigación más interesantes que se derivan del presente trabajo de tesis doctoral es el uso de las medidas en tráfico real para la elaboración de modelos de emisiones y consumo de vehículos en tráfico real que permitan predecir el consumo y las emisiones en un determinado recorrido y con un determinado estilo de conducción. Y estudiar la posibilidad de integrar estos modelos en la elaboración de los inventarios de emisiones nacionales.

También sería un trabajo de gran interés generar una metodología estándar de ensayos en tráfico real que permita medir el comportamiento del vehículo en un amplio espectro de puntos de operación y que permitan obtener las curvas características de los motores en utilización real tanto en puntos estacionarios como en transitorios.

.

Referencias Bibliográficas

Referencias citadas explícitamente

- (Ajtay y Weilenmann, 2004) Ajtay D. y Weilenmann M., 2004. Static and dynamic instantaneous emission modelling. Int. J. of Environment and Pollution Vol. 22, No.3 pp. 226 - 239.
- (Akard, 2005) Akard M., Nakamura H., Shintaro A., Kihara N. y Adachi M., 2005. Performance Results and Design Considerations for a New In-Use Testing Instrument. SAE Technical paper 2005-01-3606.
- (Annand y Roe, 1974) Annand W. y Roe G., 1974. Gas Flow in the Internal Combustion Engine. Power, Performance, Emission control and silencing. Editorial G. T. Foulis. ISBN: 0854291601.
- (Aríztegui, 2005) Aríztegui J., 2005. Modelo Fluidodinámico para el análisis modal de los gases de escape de un motor diésel de automoción. Tesis doctoral ETSII UPM.
- (Asano et al, 2004) Asano I., Miyai M., Nakamura H. y Adachi M., 2004. Improvement of Modal Mass Analysis With Analyzer Hardware Optimizations and Mathematically Enhanced Response Time. SAE Technical paper 2004-01-0970.
- (Beck y Hinterhofer, 1998) Beck M. y Hinterhofer K., 1998. Direct High Dynamic Flow Measurement in the Exhaust of Combustion Engines. SAE Technical paper 980880.
- (Bonnel et al, 2006) Bonnel P., Brunella A., Carriero M., Fumagalli I., Kubelt J., Manfredi U., Montigny F., Hummel R., Krasenbrink A., De Santi G., 2006. European Project on Portable Emissions Measurement Systems: "EU-PEMS" Project. Status and Activity Report 2004-2005. European Commission, Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability EUR 22143 EN.
- (Bonuccelli, 2006) Bonuccelli C. L. H., 2006. A Theoretical and Experimental Investigation of Multi-Phase Interactions in Pure and Multicomponent Droplet

- Evaporation. thesis Master of Science in Chemical Engineering. Washington State University. Department of Chemical Engineering.
- (Bougher et al, 2010) Bougher T., Khalek I. A., Trevitz S. y Akard M. , 2010. Verification of a Gaseous Portable Emissions Measurement System with a Laboratory System Using the Code of Federal Regulations Part 1065. SAE Technical paper 2010-01-1069.
- (Boulter et al, 2006) Boulter P.G., Barlow T., McCrae I.S. y Latham S., 2006. OSCAR: On-board emission measurements in Central London. TRL Report: UPR/IE/034/06. United Kingdom. January 2006.
- (Boulter y McCrae, 2006) Boulter P.G. y McCrae I.S. , 2006. OSCAR: Final summary report. TRL Reports ISBN 1-84608-906-9 ISSN 0968-4093.
- (Boyes, 2008) Boyes W., 2008. Instrumentation Reference Book. ISBN: 9780750683081 Fourth Edition. Butterworth-Heinemann.
- (Breton, 2000) Breton, L. A. G. , 2000. Real-time on-road vehicle exhaust gas modular flowmeter and emissions reporting system. US Patent Publication (Source: USPTO) Publication No. US 6148656 published on 21-Nov-2000. Application No. US 9/226920 filed on 05-Jan-1999.
- (Brundell-Freij y Ericsson, 2005) Brundell-Freij K. y Ericsson E., 2005. Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns. Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 10, Issue 3, May 2005, Pages 213-229.
- (Casanova and Fonseca, 2012) Casanova J. y Fonseca N., 2012. Environmental assessment of low speed policies for motor vehicle mobility in city centres. Global NEST Journal, Vol 14, No 2, pp 192-201
- (Casanova et al, 2005) Casanova, J., Margenat, S., Ariztegui, J., 2005. Impact of driving style on Pollutant Emissions and Fuel Consumption for Urban Cars. Proceedings of the 1st International Congress of Energy and Environment Engineering and Management. Potoalegre, Portugal. P.175.
- (Casanova et al, 2009) Casanova J., Fonseca N. y Espinosa F., 2009. Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions. Proceedings 17th Transport and air pollution symposium and 3rd Environment and Transport Symposium. Toulouse, France. Actes INRETS n°122.
- (Checkel y Hawirko, 2003) Checkel, M.D., Hawirko, J.D., 2003. Quantifying Vehicle Emission Factors for Various Ambient Conditions Using An On-Road, Real-Time Emissions System. SAE Technical paper 2003-01-0301.
- (CiceroFernandez et al, 1997) CiceroFernandez P., Long J.R., Winer A.M., 1997. Effects of grades and other loads on on-road emissions of hydrocarbons and carbon

- monoxide. Journal of the Air & Waste Management Association Volume: 47 Issue: 8 Pages: 898-904 Published: 1997.
- (Coelho et al, 2009) Coelho M., Frey Ch., Rouphail N., Zhai H. y Pelkmans L., 2009. Assessing methods for comparing emissions from gasoline and diesel light-duty vehicles based on microscale measurements. Transportation Research Part D Volume14 (2009) 91–99.
- (CRFEC, 2005) Committee on Radiative Forcing Effects on Climate, Climate Research Committee, National Research Council, 2005. Radiative Forcing of Climate Change: Expanding the Concept and Addressing Uncertainties. The National Academies Press. Washington, D.C. ISBN 9780309095068.
- (Crilly, 1991) Crilly P.B., 1991. A Quantitative Evaluation of Various Iterative Deconvolution Algorithms. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement VOL. 40, NO. 3. JUNE 1991.
- (Daham et al, 2005) Daham B., Andrews G., Li H., Ballesteros R., Bell M., Tate J. y Ropkins K., 2005. Application of a Portable FTIR for Measuring On-Road Emissions. SAE Technical paper 2005-01-0676.
- (De la Rosa et al, 2006) De la Rosa Vargas J.I., Miramontes de León G., García Domínguez E., Esquivel M.A. y Villa Hernández J., 2006. Comparación de Cuatro Algoritmos que dan Solución Numérica a la Deconvolución en Sistemas Monodimensionales. Computación y Sistemas Vol. 10 No. 2, 2006, pp 135-158.
- (Dearth et al, 2005) Dearth M.A., Butler J.W., Colvin A., Gierczak C.A., Kaberline S., Korniski T. - Ford Motor Co. , 2005. SemtechD: The Chassis Roll Evaluation of a Commercial Portable Emission Measurement System (PEMS). SAE Technical paper 2005-01-0673.
- (Dodge, et al, 2003) Dodge L.G., Callahan T.J. y Ryan T.W., 2003. Humidity and Temperature Correction Factors for NO_x Emissions from Diesel Engines. http://www.utexas.edu/research/ceer/texaqsII/PDF/TexAQS%20II%20EI%20version%201.0/Appendices/NOx_humidity_corr_diesel_ENVIRON.pdf Final Report SwRI Project No. 03.30.10.06599. Prepared for: ENVIRON International Corporation.
- (Douglas et al, 1979) Douglas J., Gasiorek J. y Swaffield J., 1979. Fluid Mechanics. Pitman Publishing Limited ISBN: 027300462X.
- (Durbin y Pisano, 2010) Collins J., Durbin T.D. y Pisano J., 2010. Final Report: "Light Duty Gasoline PM: Characterization of High Emitters and Valuation of Repairs for Emission Reduction - Phase 3 -". California Air Resources Board Contract No. 05-323.
- (Durst et al, 2007) Durst F., Ünsal B., Ray S. y Trimis D., 2007. Method for defined mass flow variations in time and its application to test a mass flow rate meter for pulsating flows. Meas. Sci. Technol. 18 (2007) 790–802.

- (Ensfield et al, 2006) Ensfield C., Bachman J., Erb A., Bynum Ch., 2006. Evaluating Real-World Fuel Economy on Heavy Duty Vehicles using a Portable Emissions Measurement System. SAE Technical paper 2006-01-3543.
- (EPA, 2005) Environmental Protection Agency, U.S.A., 2005. In-Use Testing Program for Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles - Technical Support Document. EPA420-R-05-006 .
- (EPA, EMTIC TM-010) Environmental Protection Agency, U.S.A. Method 10 - Determination of Carbon Monoxide Emissions from Stationary Sources. Emission Measurement Technical information Center NSPS Test Method <http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-10.pdf>.
- (Ericsson et al 2004) Ericsson E., Mocsári T., Rapone M., Brundell-Freij K., 2004. Variability in driving patterns over street environments in three European cities. Artemis WP1040 research project Deliverable No. 11.
- (Ericsson, 2000) Ericsson E., 2000. Variability in urban driving patterns. Transportation Research Part D: Transport and Environment Vol 5 (2000) pag 337-354.
- (Ericsson, 2001) Ericsson E., 2001. Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use exhaust emission factors.. Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 6, Issue 5, September 2001, Pages 325-345.
- (Etemad, 2003) Etemad S.Gh., Thibault J., Hashemabadi S.H. , 2003. Calculation of the Pitot tube correction factor for Newtonian and non-Newtonian fluids. ISA Transactions, Volume 42, Issue 4, October 2003, Pages 505-512, ISSN 0019-0578, 10.1016/S0019-0578(07)60001-9.
- (Fiest et al, 2008) Fiest M.D., Sharp C.A., Mason R.L. y Buckingham J.P., 2008. Determination of PEMS Measurement Allowances for Gaseous Emissions Regulated Under the Heavy-Duty Diesel Engine In-Use Testing Program. Final Report prepared by Southwest Research Institute Report EPA Contract No. EP-C-05-018 EPA420-R-08-005.
- (Fonseca et al, 2010a) Fonseca N., Casanova J. y Espinosa F., 2010. Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car. Transport and Air Pollution 18th International Symposium TAP 2010, Zurich may 2010 ISBN 978-3-905594-57-7.
- (Fonseca et al, 2011a) Fonseca N., Casanova J. y Valdés M., 2011. Influence of the stop/start system on CO₂ emissions of a diesel vehicle in urban traffic. Transportation Research Part D Volume16 (2011) 194–200.
- (Fonseca, et al 2011b) Fonseca N., Casanova J. y Betancourt R., 2011. Influencia del contenido de Biodiesel en gasóleo en el rendimiento térmico de un motor diesel ligero ensayado en tráfico real.. Actas VII congreso nacional de ingeniería

- termodinámica. Bilbao junio de 2011. Actas VII congreso nacional de ingeniería termodinámica. Bilbao junio de 2011. ISBN 84-95416-79-4
- (FR, 2000) Environmental Protection Agency, U.S.A., 2000. 40 CFR Parts 85 and 86. Emissions Control, Air Pollution From 2004 and Later Model Year Heavy-Duty Highway Engines and Vehicles; Light-Duty On-Board Diagnostics Requirements, Revision; Final Rule. 40 CFR part 86.1370–2007 Not-To-Exceed test procedures, 65 FR 59961 Environmental Protection Agency.
- (FR, 2002) Environmental Protection Agency, U.S.A., 2002. 40 CFR Parts 89, 90, 91, 94, 1048, 1051, 1065, and 1068: Control of Emissions From Nonroad Large Spark-Ignition Engines, and Recreational Engines (Marine and Land-Based). Federal Register Federal Register / Vol. 67, No. 217 / Friday, November 8, 2002 / Rules and Regulations.
- (FR, 2005a) Environmental Protection Agency, U.S.A., 2005. 40 CFR Parts 9 and 86. Control of Emissions of Air Pollution From New Motor Vehicles: In-Use Testing for Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles. 40 CFR part 86.1375–2007 Equipment specifications for field testing, 70 FR 34619 Environmental Protection Agency.
- (FR, 2005b) Environmental Protection Agency, U.S.A., 2005. 40 CFR Parts 85, 86, 89, 90, 91, 92, 94, 1039, 1048, 1051, 1065, and 1068. Test Procedures for Testing Highway and Nonroad Engines and Omnibus Technical Amendments. 40 CFR part 1065 Subpart J- Field Testing and portable Emission Measurement Systems 70 FR 40517 Environmental Protection Agency.
- (FR, 2008) Environmental Protection Agency, U.S.A., 2008. In-Use Testing for Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles; Emission Measurement Accuracy Margins for Portable Emission Measurement Systems and Program Revisions. 73 FR 13441 Environmental Protection Agency.
- (Frey et al, 2001) Frey C. H., Roupail N. M., Unal A. y Colyar J. D. , 2001. Measurement of on-road tailpipe CO, NO and hydrocarbon emissions using a portable instrument. Proceedings of the Annual Meeting of the Air & Waste Management Association 2001 .
- (Frey et al, 2002) Frey H. Ch., Unal A. y Chen J., 2002. Recommended Strategy for On-Board Emission Data Analysis and Collection for the New Generation Model.. Prepared for: Office of Transportation and Air Quality U.S. Environmental Protection Agency Ann Arbor, MI Prepared by: Computational Laboratory for Energy, Air, and Risk. Department of Civil Engineering. North Carolina State University. Raleigh, NC..
- (Fritz, 1999) Fritz, S., 1999. Heavy-duty Diesel Engine NO_x and PM Correction Factors. SwRI Final Report 08-2597.
- (Gautam et al, 2004) Gautam M., Carder D. K., Thompson G. J., Clark N.N., Nayak G., Krishnamurthy M., 2004. Development of a Test Method to Measure Stationary

- and Portable Engine Emissions. Final Project Report. Project Reference Number: CARB 00-06.
- (Gierczak et al, 2006) Gierczak C., Korniski T., Butler J.W., Wallington T.J.- Ford Motor Co. , 2006. Laboratory Evaluation of the SEMTECH-G Portable Emissions Measurement System (PEMS) for Gasoline Fueled Vehicles. SAE Technical paper 2006-01-1081.
- (Gierczak et al, 2007) Gierczak C., Korniski T., Wallington T. y Ensfield C., 2007. Simultaneous Real-Time Measurements of NO and NO₂ in Medium Duty Diesel Truck Exhaust. SAE Technical paper 2007-01-1329.
- (Gillespie, 1992) Gillespie T.D. , 1992. Fundamentals of Vehicle Dynamics. SAE International ISBN: 978-1-56091-199-9.
- (Gingrich et al, 2003) Gingrich J.W., Callahan T.J. y Dodge L.G., 2003. Humidity and Temperature Correction Factors for NO_x Emissions from Spark Ignited Engines.
http://www.utexas.edu/research/ccer/texaqsII/PDF/TexAQS%20II%20EI%20version%201.0/Appendices/NOx_humidity_Corr_Spark_ENVIRON.pdf
Final Report SwRI Project No. 03.10038. Prepared for: ENVIRON International Corporation.
- (Hare y Bradow, 1977) Hare C. T. y Bradow R. L., 1977. Light Duty Diesel Emissions Correction Factors for Ambient Conditions. SAE Technical paper 770717.
- (Heywood, 1988) Heywood J.B., 1988. Internal Combustion Engine Fundamentals. ISBN 0-07-028637-X McGraw-Hill, Inc..
- (Holmén y Niemeier, 1998) Holmén B. y Niemeier D., 1998. Characterizing the effects of driver variability on real-world vehicle emissions. Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 3, Issue 2, 1 March 1998, Pages 117-128.
- (Holmén, 2005) Holmén B.A. , 2005. Motor Vehicles & Vehicles & Air Quality Air Quality. Environmental Engineering (2005). Presentación a ENGR Alumni..
- (Ident_1) MathWorks Co. Matlab. System identification toolbox.
<http://www.mathworks.com/access/helpdesk/help/toolbox/ident/index.html>.
- (Ident_2) MathWorks Co. Matlab. System identification toolbox.
http://radio.feld.cvut.cz/matlab/pdf_doc/ident/ident.pdf.
- (Johnson et al, 2009) Johnson K.C., Durbin T.D., Cocker D.R., Miller W.J., Bishnu D.K., Maldonado H., Moynahan N., Ensfield C. y Laroo C.A., 2009. On-road comparison of a portable emission measurement system with a mobile reference laboratory for a heavy-duty diesel vehicle . Atmospheric Environment Volume 43, Issue 18, June 2009, Pages 2877-2883.

- (Joumard et al, 2006) Joumard R., André M., Laurikko J., Le Anh T., Geivanidis S., Samaras Z., Oláh Z., Devaux Ph., André J.M., Cornelis E., Rouveïrolles P., Lacour S., Prati M.V., Vermeulen R. y Zallinger M., 2006. Accuracy of exhaust emissions measurements on vehicle bench. INRETS Report n° LTE 0522.
- (Kihara, 2004) Kihara N., 2004. The OBS-1000 Series On-board Engine Emission Measurement System. Horiba Technical Reports Readout English Edition No. 9.
- (Klopfenstein, 1998) Klopfenstein R. Jr., 1998. Air velocity and flow measurement using a Pitot tube. ISA Transactions, Volume 37, Issue 4, September 1998, Pages 257-263, ISSN 0019-0578, 10.1016/S0019-0578(98)00036-6.
- (Krause et al, 1973) Krause S. R., Merrion D. F. y Green G. L. , 1973. Effect of inlet air humidity and temperature on Diesel Exhaust Emissions. SAE Technical paper SAE Paper 730213.
- (Krishnamurthy y Gautam, 2005) Krishnamurthy M. y Gautam M., 2005. Quality Assurance of Exhaust Emissions Test Data Measured Using the Mobile Emissions Measurement System. SAE Technical paper 2005-01-3799.
- (Kupnik et al, 2004) Kupnik M., Schroder A., O'Leary P., Benes E. y Groschl M., 2004. An ultrasonic transit-time gas flowmeter for automotive applications. Sensors, 2004. Proceedings of IEEE , vol., no., pp. 451- 454 vol.1, 24-27 Oct. 2004
- (Kupnik et al, 2006) Kupnik M., Schroder A., O'Leary P., Benes E., Groschl M., 2006. Adaptive Pulse Repetition Frequency Technique for an Ultrasonic Transit-Time Gas Flowmeter for Hot Pulsating Gases . IEEE Sensors Journal, Vol. 6, No. 4.
- (Laguna y Pekár, 2007) Laguna J. P. y Pekár F., 2007. Heavy-Duty In-use legislation in Europe: Euro V and elements of Euro VI. PEMS Pilot Programme. International Conference on Transport and Emissions. Milan, 19 March 2007.
- (Laurantzon et al, 2010) Laurantzon F., Örlü R., Segalini A. y Alfredsson P.H., 2010. Time-resolved measurements with a vortex flowmeter in a pulsating turbulent flow using wavelet analysis. Measurement Science and Technology Volume 21 (2010) 123001 (5pp).
- (Laurantzon, 2010) Laurantzon F., 2010. Flow Measuring Techniques in Steady and Pulsating Compressible Flows. Technical Reports from Royal Institute of Technology KTH Mechanics SE-100 44 Stockholm, Sweden .
- (Lenaers et al, 2003) G. Lenaers, L. Pelkmans, P. Debal , 2003. The realisation of an on-board emission measuring system serving as a R&D tool for ultra low emitting vehicles. Int. J. of Vehicle Design Vol. 31, No.3 pp. 253 - 268.
- (Lenaers, 1996) Lenaers G., 1996. On-board real life emission measurements on a 3 way catalyst gasoline car in motor way-, rural- and city traffic and on two Euro-1

- diesel city buses. the Science of The Total Environment Volumes 189-190, 28 October 1996, Pages 139-147.
- (Lewis, 1989) Lewis G., 1989. Calibration method for exhaust mass flow measuring system.. US Patent number: 4823591
- (Liang et al, 2009) Liang S.M, Tsai S.J. y Wang S.F., 2009. An Effective Approach for Calculation of Exhaust Pipe Flows. Journal of Mechanics, Vol. 25, No. 2, June 2009.
- (Ligterink et al, 2009) Ligterink N., Lange R., Vermeulen R. y Dekker H., 2009. On-road NOx emissions of Euro-V trucks. TNO report TNO report MON-RPT-033-DTS-2009-03840.
- (Ljung y Glad, 1994) Ljung L. y Glad T., 1994. Modeling of dynamic Systems. Prentice-Hall, Inc. ISBN:0-13-597097-0, USA.
- (Ljung, 1999) Ljung L., 1999. System Identification: Theory for the User, 2nd ed. Prentice –Hall. ISBN-13: 9780136566953.
- (Madireddy y Clark, 2006) Madireddy, M. R. y Clark, N. N., 2006. Sequential inversion technique and differential coefficient approach for accurate instantaneous emissions measurement.. International Journal of Engine Research Nov2006, Vol. 7 Issue 6, p437-446.
- (Manos et al, 1972) Manos M.J., Bozek J.W. y Huls T.A., 1972. Effect of Laboratory Ambient Conditions on Exhaust Emissions. SAE Technical paper 720124.
- (Margenat, 2010) Margenat S., 2010. Estudio de las emisiones contaminantes de Motores de Automoción mediante su análisis con equipos de medida embarcados.. UPM Tesis doctoral.
- (Mata, 2010) Mata M.C., 2010. Estudio de las emisiones contaminantes y de la durabilidad de un sistema de inyección utilizando mezclas Etanol-Diésel en vehículos. Tesis doctoral Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Universidad de Castilla- La Mancha.
- (McCrae et al, 2006) McCrae I.S., Barlow T.J. y Latham S.L., 2006. Instantaneous vehicle emission monitoring. TRL Reports ISBN 1-84608-917-4 ISSN 0968-4093.
- (Miller et al, 2006) Miller J.W., Durbin T., Johnson K., Cocker D., 2006. Final Report: "Evaluation of Portable Emissions Measurement Systems (PEMS) for Inventory Purposes and the Not-To-Exceed Heavy-Duty Diesel Engine Regulation". California Air Resources Board Contract No. 03-345.
- (Miller et al, 2008) Miller J. W., Johnson K., Durbin T. y Cocker D., 2008. Measurement Allowance Project – On-Road Validation. California Air Resources Board Contract No. 03-345.

- (Miranda, 1996) Miranda A.L., 1996. La psicrometría. Editorial CEAC, España ISBN: 84-329-6552-9.
- (Mottram, 1992) Mottram R. C., 1992. Introduction: An overview of pulsating flow measurement. Flow Measurement and Instrumentation Volume 3, Issue 3, 1992, Pages 114-117 .
- (Muñoz y Payri, 1989) Muñoz M., y Payri F., 1989. Motores de combustión interna alternativos. Sección de publicaciones de la ETS Ing. Industriales UPM.
- (Nakamura et al, 2002) Nakamura H., Kihara N., Adachi M., Ishida K. - Horiba Ltd., 2002. Development of a Wet-Based Ndir and Its Application to On-Board Emission Measurement System. SAE Technical paper 2002-01-0612.
- (Nakamura et al, 2005) Nakamura H., Asano I., Adachi M., y Senda J., 2005. Analysis of pulsating flow measurement of engine exhaust by a Pitot tube flowmeter. International Journal of Engine Research Feb2005, Vol. 6 Issue 1, p85-93.
- (Nakamura et al, 2006) Nakamura H., Adachi M., Asano I., Senda J. y Aoki S., 2006. Method and apparatus for measuring exhaust gas flow rate and It's application system for analyzing the exhaust gases from an engine. US Patent 7,110,878 B2.
- (Nakamura et al, 2007) Nakamura H., Akard M., Porter S., Kihara N., Adachi M. y Khalek I. A., 2007. Performance Results of a New On-Board Emission Measurement System Conformed with CFR Part 1065. SAE Technical paper 2007-01-1326.
- (Nevot, 2000) Nevot J., 2000. Diseño de un controlador avanzado basado en redes neuronales para la gestión de la emzcla aire-gasolina en un motor alternativo. Tesis Ingeniería y tecnología mecánica - Universidad Politénica de Cataluña.
- (NINE et al, 2004) Nine R.D., Clark N.N., Gautam M., Wayne W.S., Thompson G. y Lyons D.W., 2004. Emissions Trends for Heavy-Heavy Duty Trucks. 14th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop, San Diego, CA, 2004.
- (Noland et al, 2004) Noland R., Ochieng W., Quddus M., North R. y Polak J., 2004. The vehicle emissions and performance monitoring system: analysis of tailpipe emissions and vehicle performance. Transportation Planning and Technology Volume 27, Number 6, December 2004 , pp. 431-447(17).
- (North et al, 2004) North R., Quddus M., Ochieng W., Noland R y Polak J., 2004. Validation and Characterization of the Vehicle Performance and Emissions Monitoring System (VPEMS). (Indianapolis), USA, 2004, Accepted for publication and presentation at the A&WMA's 97th Annual Conference & Exhibition, June 22-25.
- (Ntziachristos y Samaras, 2012) Ntziachristos I. y Samaras Z., 2012. EMEP/EEA emission inventory guidebook 2009, updated May 2012.

- (Ochieng et al, 2002) Ochieng W., Polak J., Noland R. y Zhao L., 2002. The development and Demonstration of a Real time Vehicle performance and emissions Monitoring System. 82nd Annual Meeting of the Transportation Research Board.
- (Ogata, 1995) Ogata K., 1995. Discrete-Time Control Systems. Prentice Hall; 2 edition ISBN-10: 0130342815.
- (Ogata, 2003) Ogata K., 2003. System Dynamics. 4th Edition. Pearson Education, Inc. ISBN13: 9780131247147.
- (Pakko, 2009) Pakko J. D., 2009. Reconstruction of Time-Resolved Vehicle Emissions Measurements by Deconvolution. SAE Technical paper 2009-01-1513.
- (Payri et al, 2011) Payri F. y Desantes J.M., 2011. Motores de combustión interna alternativos. Editorial Universidad Politécnica de Valencia y Reverté. ISBN:978-84-8363-705-0.
- (Pelkmans y Debal, 2006) Pelkmans L. y Debal P., 2006. Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles. Transportation Research Part D: Transport and Environment Volume 11, Issue 4, July 2006, Pages 233-241.
- (Pucher y Cachon, 2009) Pucher E. y Cachon L., 2009. Real-world Emission Measurements of a High Efficient Monofuel CNG Light Duty Vehicle. SAE Technical paper 2009-01-1864.
- (Pundir, 2007) Pundir B.P., 2007. Engine Emissions. Pollutant formation and Control Technology. ISBN 978-1-84265-401-9 Alpha Science international Ltd. Oxford, U.K.
- (Qiao et al, 2005) Qiao F., Yu L., Vojtisek-Lom M., 2005. On-Road Vehicle Emission and Activity Data Collection and Evaluation in Houston, Texas . Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board Volume 1941.
- (Rubino et al, 2007) Rubino L., Bonnel P., Krasenbrink A., Carriero M., Kubelt J., Fumagalli I., Montigny F. y De Santi G., 2007. Development of an Official Test Method for On-Board PM Measurements From Heavy-Duty Diesel Engines in the European Union. SAE Technical paper 2007-01-1946.
- (Rubio et al, 2009) Rubio R., Dominguez A. y Barrios C.C., 2009. Design and implementation of an on-board real time particle measurement system.. European Aerosol Conference - EAC. Karlsruhe, Germany Proceedings of the EAC 2009.
- (Rueger, 2008) Rueger J., May 13, 2008. Clean Diesel – Real Life Fuel Economy and Environmental Performance. SAE Government / Industry Meeting Presentation.

- (Sato et al, 2007) Sato S., Yamamoto T., Ogawa Y. y Lizuka Y. , 2007. Research on Measurement Method of Exhaust Gas Flow Rate for On-board Measurement System. SAE Technical paper 2007-01-4080.
- (Shade, 2000) Shade B. C., 2000. A Performance Evaluation of the MEMS – An On-Road Emissions Measurement System Study. Thesis submitted to the College of Engineering and Mineral Resources at West Virginia University in partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Mechanical Engineering.
- (Silvis et al, 2003) Silvis W., Williamson J., Kreft N. y Alajbegovic A., 2003. DVE - Direct Vehicle Exhaust Flow Measurement using Head-type Flowmeters. SAE Technical paper 2003-01-0782.
- (Skwarek et al, 2001) Skwarek V., Windorfer H. y Hans V., 2001. Measuring pulsating flow with ultrasound. Measurement Volume 29, Issue 3, April 2001, Pages 225-236.
- (St. Denis et al, 1994) St. Denis M., Cicero-Fernandez P., Winer A., Butler J. y Jesion G., 1994. Effects of in-use driving conditions and vehicle/engine operating parameters on 'off-cycle' events. Comparison with Federal Test Procedure conditions. Journal of the Air & Waste Management Association Vol. 44, no. 1, pp. 31-38.
- (Stainback y Nagabushana, 1993) Stainback P.C. y Nagabushana K.A. , 1993. Review of hot-wire anemometry techniques and the range of their applicability for various flows.. ASME Electron. J. Fluids Eng., 167 (1993), p. 93.
- (Sunwoo et al, 1999) Sunwoo M., Lee W., Choi S., 1999. Design and Development of a Computer-Aided, In-Vehicle Data Acquisition System for Driving Pattern Analysis. SAE Technical paper 1999-01-0954.
- (Takada et al, 2007) Takada Y., Ueki S., Saito A., Sawazu N. y Nagatomi Y., 2007. Improvement of Fuel Economy by Eco-Driving with Devices for Freight Vehicles in Real Traffic Conditions. SAE Technical paper 2007-01-1323.
- (Tolentino et al, 2001) Tolentino G., Abugaber J., Tufiño M. y Tolentino R., 2001. Calibración de Tubos de Pitot Tipo S en el Labinthap. Centro Nacional de Metrología, México Memorias del Simposio de Metrología 2001..
- (Turns, 2000) Turns, S., 2000. An Introduction to Combustion – Concepts and applications. Editorial McGRAW-HILL International Editions.
- (Unal et al, 2004) Unal, A., Frey, H.C., Roupail, N.M., 2004. Quantification of highway vehicle emissions hot spots based upon on-board measurements. J Air Waste Manag Assoc. Vol 54(2): pp.130-40.
- (Van Mierlo et al, 2004) Van Mierlo J., Maggetto G., Van de Burgwal E. y Gense R., 2004. Driving style and traffic measures—influence on vehicle emissions and

- fuel consumption. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering Volume 218, Number 1 / 2004.
- (Vermeulen, 2006) Vermeulen R.J., December 22, 2006. The effects of a range of measures to reduce the tail pipe emissions and/or the fuel consumption of modern passenger cars on petrol and diesel.. TNO report IS-RPT-033-DTS-2006-01695.
- (Vlieger et al, 2000) De Vlieger I., De Keukeleere D. y Kretzschmar J., 2000. Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. Atmospheric Environment Volume 34, Issue 27, 2000, Pages 4649-4655.
- (Vlieger, 1997) I. De Vlieger, 1997. On board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars. Atmospheric Environment Volume 31, Issue 22, November 1997, Pages 3753-3761.
- (Waver et al, 2004) Weaver Ch.S., Chan L. y Makartchouk A., 2004. Reproducibility and Accuracy of On-Board Emission Measurements Using the RavemSt System. SAE Technical paper 2004-01-0965.
- (Weilenmann et al, 2003) Weilenmann M., Soltic P., Ajtay D., 2003. "Describing and compensating gas transport dynamics for accurate instantaneous emission measurement".. Atmospheric Environment Volume 37, Issue 37, December 2003, Pages 5137-5145.
- (Weiss et al, 2011) Weiss M., Bonnel P., Hummel R., Manfredi U., Colombo R., Lanappe G., Le Lijour Ph. y Sculati M., 2011. Analyzing on-road emissions of light-duty vehicles with Portable Emission Measurement Systems (PEMS). JCR Scientific and technical reports EUR 24697 EN - 2011. ISBN 978-92-79-19072-8; ISSN 1018-5593.
- (Zucrow y Hoffman, 1976) Zucrow M. y Hoffman J., 1976. Gas Dynamics. Volumen I. John Wiley & Sons. ISBN: 0-471-98440-X.

Otras referencias consultadas

Ahn K., 1998. Microscopic Fuel Consumption and Emission Modeling.. Thesis submitted to the Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University In partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science in Civil and Environmental Engineering.

Ajtay D., Weilenmann M., 2004. Compensation of the exhaust gas transport dynamics for accurate instantaneous emission measurements. Environmental Science & Technology Volume: 38 Issue: 19 Pages: 5141-5148 Published: 2004.

- André M., Hickman A.J., Hassel D., Joumard R., 1995. Driving Cycles for Emission Measurements Under European Conditions. SAE Technical paper 950926.
- André M., Joumard R., Vidon R., Tassel P., Perret P., 2006. Real-world European driving cycles, for measuring pollutant emissions from high- and low-powered cars . Atmospheric Environment Volume 40, Issue 31, October 2006, Pages 5944-5953.
- Andre M., Pronello C., 1997. Relative influence of acceleration and speed on emissions under actual driving conditions . Int. J. Veh. Des. Vol. 18, no. 3-4, pp. 340-353.
- Ariztegui J., Casanova J., Valdes M., 2004. A structured methodology to calculate traffic emissions inventories for city centres. The Science of the Total Environment Volume 334-335. (2004) pag 101-109.
- Bandzuch P., Morhác M., Kristiak J., 1997. Study of the Van Cittert and Gold iterative methods of deconvolution and their application in the deconvolution of experimental spectra of positron annihilation. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment Volume 384, Issues 2-3, Pages 506-515.
- Bannister C. D., Wallace F., Hawley J. G., Brace C. J., 2007. Predicting instantaneous exhaust flowrates in a constant volume sampling system . Proceeding of The Institution of Mechanical Engineers Part D – Journal of Automobile Engineering Volume: 221 Issue: D12 Pages: 1585-1598 Published: 2007.
- Bannister C., Hawley J.G., Brace Ch. J., Cox A., Ketcher D.A., Stark R., 2004. Further Investigations on Time-Alignment. SAE Technical paper 2004-01-1441.
- Bonnel P., Hummel R., Mahieu V., Manfredi U., 2005. European Project on Portable Emissions Measurement Systems: “PEMS” PROJECT. PROJECT PLAN 2005.
- Boriboonsomsin K., Barth M., 2009. Impacts of Road Grade on Fuel Consumption and Carbon Dioxide Emissions Evidenced by Use of Advanced Navigation Systems. Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board Volume 2139 / 2009, pp 21-30.
- Bosteels D., May J., Karlsson H., de Serves C., 2006. Regulated' and 'Non-regulated' Emissions from Modern European Passenger Cars. SAE Technical paper 2006-01-1516.
- Brace C.J., Burke R., Moffa J., 2009. Increasing accuracy and repeatability of fuel consumption measurement in chassis dynamometer testing . Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering Volume 223, Number 9 / 2009 .
- Bridge Analyzers. Inc., Lambda Calculation – The Brettschneider Equation, general principles and methods.
- CARS 21: Working group 4 (Internal market, Emissions and CO₂ policies), 2011. Real Driving Emissions of Vehicles. Meeting 15 april 2011. Discussion Paper.

Casanova J., Ariztegui J., Valdes M., 2004. Comparative study of two different on-board emission measurement systems.. International Fisita Congress. Barcelona 2004 F2004V053.

Casanova J., Fonseca N., 2010. Dispositivo Universal, no intrusivo, de medida en tiempo real de emisiones contaminantes de motores, embarcable en vehículos.. Solicitud de patente Española, #P201000740 .

Casanova J., Valdes M., Ariztegui J., 2001. The influence of car fleet composition on urban pollutant emissions. Application to the City of Madrid.. Proceedings of 10th International Symposium "Transport and Air Pollution". September 17-19, 2001 -- Boulder, Colorado USA.

Cicero-Fernandez P., Zhang M., Gutierrez A., Collins J. F. Huo D., Vo T., Huai T., Ayala A., Durbin T., Pisano J. T., Saito D., Olson M., Gentala R., 2009. Comparisons of real-time PM Instruments and Gravimetric Measurement on light duty Gasoline Vehicles. March, 2009, San Diego, CA. 19th CRC On-Road Vehicle Emissions Workshop.

Code of Federal Regulation, 2010. 40 CFR part 1065 Subpart J- Field Testing and portable Emission Measurement Systems. .

Daham B., Andrews G.E., Li H., Partridge M., Bell M.C., Tate J., 2005. Quantifying the Effects of Traffic Calming on Emissions Using On-road Measurements. SAE Technical paper 2005-01-1620.

Deshpande G.K., 1984. Development of Driving Schedules for Advanced Vehicle Assessment. SAE Technical paper 840360.

Environmental Protection Agency, 2003. 40 CFR Parts 69, 80, 89, 1039, 1065, and 1068 Control of Emissions of Air Pollution From Nonroad Diesel Engines and Fuel. 40 CFR part 1065.910 Measurement accuracy and precision 68 FR 28599.

Ericsson E., Larsson H., Brundell-Freij K., 2006. Optimizing route choice for lowest fuel consumption - Potential effects of a new driver support tool. Transportation Research Part C Volume 14 (2006) 369–383.

Ericsson E., Larsson H., Brundell-Freij K., 2006. Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool. Transportation Research Part C Volume 14 (2006) p 369–383.

Fonseca N. y Casanova J., 2010. Development of a methodology for emission testing in real traffic. Application to the study of driving style. 1ª Jornadas Técnicas. Ensayos de Emisiones con Equipos Embarcados. ETSII-UPM. Madrid, Nov 2010.

Fonseca N., Casanova J. , 2009. Problemas asociados a la medida de emisiones máxicas instantáneas en motores de vehículos. Memorias del VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica JNIT2009. ISBN 078-84-692-2642-1 Córdoba, España.

- Fonseca, N., Casanova, J., Espinosa, F., 2010. Estudio de la influencia de los sistemas Stop/Start sobre el consumo de combustible y las emisiones de CO₂ de un vehículo diesel en tráfico urbano.. ISBN: 978-84-96398-41-2 Proceedings IX congreso de Ingeniería del Transporte. CIT 2010. Madrid, España.
- Fontaras G., Karavalakis G., Kousoulidou M., Ntziachristos L., Bakeas E., Stournas S., Samaras Z., 2010. Effects of low concentration biodiesel blends application on modern passenger cars. Part 2: Impact on carbonyl compound emissions. *Environmental Pollution*.
- Fontaras G., Karavalakis G., Kousoulidou M., Tzamkiozis T., Ntziachristos L., Bakeas E., Stournas S., Samaras Z., 2009. Effects of biodiesel on passenger car fuel consumption, regulated and non-regulated pollutant emissions over legislated and real-world driving cycles. *Fuel* 2009, vol 88, número 9, pp.1608-1617..
- Fontaras G., Kousoulidou M., Karavalakis G., Tzamkiozis T., Pistikopoulos P., Ntziachristos L., Bakeas E., Stournas S., Samaras Z., 2010. Effects of low concentration biodiesel blend application on modern passenger cars. Part 1: Feedstock impact on regulated pollutants, fuel consumption and particle emissions. *Environmental Pollution* Volume158 (2010) 1451–1460.
- Frey H., Unal A., Roupail N., Colyar J., 2003. On-road measurement of vehicle tailpipe emissions using a portable instrument. *Journal of the Air & Waste Management Association* ISSN 1096-2247 CODEN JAWAFC vol. 53, no8, pp. 992-1002 .
- Frey H., Zhang K., Roupail N., 2008. Fuel Use and Emissions Comparisons for Alternative Routes, Time of Day, Road Grade, and Vehicles Based on In-Use Measurements. *Environ. Sci. Technol.*, Volume 42 (7), pp 2483–2489.
- Gao, Y., Checkel, M.D., 2007. Emission Factors Analysis For Multiple Vehicles Using an On-Board, In-Use Measurement System. SAE Technical paper 2007-01-1327.
- Gao, Y., Checkel, M.D., 2007. Experimental Measurement of On-Road CO₂ Emission & Fuel Consumption Functions. SAE Technical paper 2007-01-1610.
- Hardy P. K., Harrison G., James H. C., Li H., Lynch T. O., Pickard S. C., Tate J., Tomlin J., Weekes S. M., 2010. The Influence of Traffic Conditions on Primary NO₂ Tailpipe Emissions and Road-Side Pollutant Concentrations. *Transport and Air Pollution 18th International Symposium TAP 2010*, Zurich may 2010 ISBN 978-3-905594-57-7.
- Hausberger S., 2010. Fuel Consumption and Emissions of Modern Passenger Cars. Institute for Internal Combustion Engines and Thermodynamics TU GRAZ Report Nr. I-25/10 Haus-Em 07/10/676 from 29.11.2010.
- Hawirko J.D., Checkel M.D., 2002. Real-Time, On-Road Measurement of Driving Behavior, Engine Parameters and Exhaust Emissions. SAE Technical paper 2002-01-1714.

Hawley G., Cox A., Brace C., Ketcher D., Stark R., 2003. Influence of Time-Alignment on the Calculation of Mass Emissions on a Chassis Rolls Dynamometer. SAE Technical paper 2003-01-0395.

Hawley J.G., Bannister C.D., Brace C.J., Cox A., Ketcher D., Stark R., 2004. Vehicle modal emissions measurement—techniques and issues. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering Volume 218, Number 8 / 2004 Pages 859-873.

Hyde J.D., Gibbs R.E., Whitby R.A., Byer S.M., 1982. Analysis of Particulate and Gaseous Emissions Data From In-Use Diesel Passenger Cars. SAE Technical paper 820772.

Int Panis L., Broekx S., Liu R., 2006. Modelling instantaneous traffic emission and the influence of traffic speed limits. the Science of The Total Environment Volume 371, Issues 1-3, 1 December 2006, Pages 270-285.

Jetter J.J., Maeshiro S., Hatcho S., Klebba R.E., 2000. Development of An On-Board Analyzer for Use on Advanced Low-Emission Vehicles. SAE Technical paper 2000-01-1140.

Johansson H., Gustafsson P., Henke M., Resengren M., 2003. Impact of Ecodriving on emissions. 12th International Symposium "Transport and Air Pollution" Avignon, 16-18 june 2003 Proceedings actes, No. 92, vol 1. Inrets ed., Arcueil. France, 2003. P113-120.

Jones A.M., Harrison R.M., 2006. Estimation of the emission factors of particle number and mass fractions from traffic at a site where mean vehicle speeds vary over short distances. Atmospheric Environment Volume 40, Issue 37, December 2006, Pages 7125-7137.

Jost P., Joumard R., Hickman J., 1995. Influence of Instantaneous Speed and Acceleration on Hot Passenger Car Emissions and Fuel Consumption. SAE Technical paper 950928.

Joumard R., André M., Vidon R., Tassel P., 2003. Characterizing real unit emissions for light duty goods vehicles. Atmospheric Environment Volume 37, Issue 37, December 2003, Pages 5217-5225.

Joumard R., André M., Vidon R., Tassel P., Pruvost C., 2000. Influence of driving cycles on unit emissions from passenger cars. Atmospheric Environment 2000 - 34 - 27 - 4621.

Kageson P., 1998. Cycle Beating and the US Test Cycle for Cars. European Federation for Transport and Environment T&E 98/3.

Kishan S., DeFries T.H., Weyn Ch.G., 1993. A Study of Light-Duty Vehicle Driving Behavior: Application to Real-World Emission Inventories. SAE Technical paper 932659.

- Konstandopoulos A., 2008. A Mobile Laboratory for On-board and Ambient Level Emissions Measurement. SAE Technical paper 2008-01-0756.
- Lapuerta M., Armas O., Rodríguez-Fernández J., 2008. Effect of biodiesel fuels on diesel engine emissions. *Progress in Energy and Combustion Science* 34 (2008) 198–223.
- Le Anh T., Hausberger S., Ajtaj D., Weilenmann M., 2005. Response time in instantaneous emission measurement. . Empa & TUG Empa & TUG report, Dübendorf, Switzerland, Graz, Austria, 44 p..
- Li H., Andrews G., Daham B., Bell M., Ropkins K. 2006. Study of the Emissions Generated at Intersections for a SI Car under Real World Urban Driving Conditions. SAE Technical paper 2006-01-1080.
- Li H., Andrews G., Daham B., Bell M., Tate J., Ropkins K. 2007. The Impact of Traffic Conditions and Road Geometry on Real World Urban Emissions using a SI Car. SAE Technical paper 2007-01-0308.
- Li H., Andrews G., Savvidis D., Daham B., Ropkins K., Bell M., Tate J. 2008. Study of Thermal Characteristics and Emissions during Cold Start using an on-board Measuring Method for Modern SI Car Real World Urban Driving. SAE Technical paper 2008-01-1307.
- Li H., Andrews G., Tate J., Ropkins K., Bell M., 2010. Driver Variability Influences on Real World Emissions at a Road Junction using a PEMS. SAE Technical paper 2010-01-1072.
- Li H., Andrews G.E., Khan A.A., Savvidis D., Daham B., Bell M., Tate J., Ropkins K., 2007. Analysis of Driving Parameters and Emissions for Real-World Urban Driving Cycles Using an On-Board Measurement Method for a EURO 2 SI Car. SAE Technical paper 2007-01-2066.
- Luján J.M., Bermúdez V., Tormos B., Pla B., 2009. Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle: Performance and emissions (II). *Biomass and Bioenergy* 2009 Vol. 33, pp. 948-956.
- Mastuura M., Korematsu K., Tanaka J., 2004. Fuel Consumption Improvement of Vehicles By Idling Stop. SAE Technical paper 2004-01-1896.
- Messer J.T; Clark N.N., Lyons D.W., 1995. Measurement Delays and Modal Analysis for a Heavy Duty Transportable Emissions Testing Laboratory. SAE Technical paper 950218.
- Mueller M., 2010. General Air Fuel Ratio and EGR Definitions and their Calculation from Emissions. SAE Technical paper 2010-01-1285.
- Nam E., Mitcham A., Ensfield C., 2005. Dynamometer and On-board Emissions Testing of the Honda Insight and Toyota Prius. SAE Technical paper 2005-01-0681.

Ntziachristos L., Samaras Z., 2000. Copert III. Computer programme to calculate emissions from road transport. European Environment Agency 2000 53-54:61-5.

Oestergaard K., Porter S., Nevius T., 2003. Investigation Into the Performance of An On-Board Emissions Measurement System Using a Vehicle Exhaust Emissions Simulator. SAE Technical paper 2003-01-3746.

Ortenzi F., Costagliola M., 2010. A New Method to Calculate Instantaneous Vehicle Emissions using OBD Data. SAE Technical paper 2010-01-1289.

Ortenzi F., Ragona R., Casaccia R.E., Campbell F.V., Zuccari F., 2007. Experimental Measurement of the Environmental Impact of a Euro IV Vehicle in its Urban Use. SAE Technical paper 2007-01-0966.

Pielecha J., Merkisz J., Gis W., 2009. Gaseous and Particle Emissions Results from Light Duty Vehicle with Diesel Particle Filter. SAE Technical paper 2009-01-2630.

Pielecha J., Merkisz J., Markowski J., Gis W., 2010. On-Board Emissions Measurement from Gasoline, Diesel and CNG fuelled Vehicles. SAE Technical paper 2010-01-1568.

Rapone M., Della Ragione L., Prati M. V., Violetti N., 2000. Driving Behavior and Emission Results for a Small Size Gasoline Car in Urban Operation. SAE Technical paper 2000-01-2960.

Ropkins K., Beebe J., Li H., Daham B., Tate J., Bell M., Andrews G., 2009. Real-World Vehicle Exhaust Emissions Monitoring: Review and Critical Discussion. Critical Reviews in Environmental Science and Technology Volume 39, Number 2, February 2009 , pp. 79-152(74).

Ropkins K., Tate J., Li H., Andrews G., Hawley J., Bell M., Tyne U., 2008. Chassis Dynamometer Evaluation of On-board Exhaust Emission Measurement System Performance in SI Car under Transient Operating Conditions. SAE Technical paper 2008-01-1826.

Rose K.D., Jansen L., Hall D., Clark R., Zemroch P.J., Cardenas M.D., Higham C., Elliott N., Fontaras G., Kalogirou M., Samaras Z., 2010. Impact of Biodiesel Blends on Fuel Consumption and Emissions in Euro 4 Compliant Vehicles. SAE Technical paper 2010-01-1484.

Rubino L., 2009. Portable Emission Measurement System (PEMS) For Heavy Duty Diesel Vehicle PM Measurement: The European PM PEMS Program. SAE Technical paper 2009-24-0149.

Rubino L., 2010. Portable emission measurement systems (PEMS) for PM measurements: Comparison of different techniques.. Transport and Air Pollution 18th International Symposium TAP 2010, Zurich may 2010 ISBN 978-3-905594-57-7.

- Saboochi Y., Farzaneh H., 2009. Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption. *Applied Energy* Volume 86 p.1925–1932.
- Sato S., Yamamoto T., Ogawa Y., Fukuro N. , 2009. Research on Measurement Method of Road Gradient and Altitude by On-Road Driving. SAE Technical paper 2009-01-1116.
- Schürmann D., Staab J., 1990. On-the-road measurements of automotive emissions. *The Science of The Total Environment* Volume 93, April 1990, Pages 147-157.
- Senda J., Fujimoto H., 2004. On-Board Measurement of Engine Performance and Emissions in Diesel Vehicle Operated With Bio-Diesel Fuel. SAE Technical paper 2004-01-0083.
- Shah A., 2007. Portable Emission Monitoring Systems - PEMS. Challenges and Opportunities.. Joint Research Centre. International Conference on Transport and Environment: A global Challenge Technological and Policy Solutions. Presentation on session C: Real World Emissions Measurements..
- Smith F.B., Meyer W. A. P., Ayres R. U., 1969. Statistical Approach to Describing Vehicular Driving Cycles. SAE Technical paper 690212.
- Soltic P., Weilenmann M., Novak P., 2004. Real-world and type-approval emission evolution of passenger cars. *Int. J. of Environment and Pollution* Vol. 22, No.3 pp. 259 - 274.
- Solticand P., Weilenmann M., 2003. NO₂/NO emissions of gasoline passenger cars and light-duty trucks with Euro-2 emission standard. *Atmospheric Environment* Volume 37, Issue 37, December 2003, Pages 5207-5216 .
- Sturm P.J., Hausberger S., Keller M., de Haan P., 2000. Estimating real world emissions from passenger cars - use and limitations of instantaneous emission data. *Int. J. of Vehicle Design* Vol. 24, No.1 pp. 19-33.
- Sturm P.J., Kirchweger G., Hausberger S., Almbauer R.A., 1998. Instantaneous emission data and their use in estimating road traffic emissions. *Int. J. of Vehicle Design* Vol. 20, No.1/2/3/4 pp. 181-191.
- Szczotka A., Bielaczyc P., 2007. Analysis of Uncertainty of the Emission Measurement of Gaseous Pollutants on Chassis Dynamometer. SAE Technical paper 2007-01-1324.
- Thouvenel N., Tauzia X., Chesse P., Hetet J.F., 2002. Experimental Method for the Determination of Instantaneous Diesel Engine Pollutant Emissions During Transients. ASME ICES2002-466 2002 Spring Technical Conference of the ASME Internal Combustion Engine Division.

Tong H.Y., Hung W.T., Cheung C.S., 2000. On-road motor vehicle emissions and fuel consumption in urban driving conditions. *J Air Waste Manag Assoc.* Vol 50(4), pp 543-54.

Tzirakis E.G., Karavalakis G., Zannikos F.E., Stournas S., 2007. Impact of Diesel/Biodiesel Blends on Emissions from a Diesel Vehicle Operated in Real Driving Conditions. SAE Technical paper 2007-01-0076.

United States Environmental Protection Agency, California Air Resources Board, and Engine Manufacturers Association, 2005. Test Plan to Determine PEMS Measurement Allowances for the Gaseous Emissions Regulated under the Manufacturer-Run Heavy-Duty Diesel Engine In-Use Testing Program. US EPA Docket #OAR-2004-0072-0069.

Weaver Ch. S., Balam-Almanza M., 2001. Development of the "Ravem" Ride-Along Vehicle Emission Measurement System for Gaseous and Particulate Emissions. SAE Technical paper 2001-01-3644.

Weaver Ch., 2006. Ravem System Technical Summary. <http://www.efee.com/download/RAVEM%20Technical%20Summary.pdf> RAVEM Version 3.1 – February, 200.

Weilenmann M., Bach Ch., Rudy C., 2001. Aspects of instantaneous emission measurement. *Int. J. of Vehicle Design* Vol. 27, No.1/2/3/4 pp. 94-104.

Weilenmann M., Soltic P., Saxer Ch., Forss A., Heeb N., 2005. Regulated and nonregulated diesel and gasoline cold start emissions at different temperatures. *Atmospheric Environment* Volume 39, Issue 13, April 2005, Pages 2433-2441 .

Yamakage M., Muta K., Deguchi Y., Fukada S., Iwase T., Yoshida T., 2008. Development of Direct and Fast Response Gas Measurement. SAE Technical paper 2008-01-0758.

Yu S., Dong G., Li L., 2008. Transient Characteristics of Emissions during Engine Start/Stop operation employing a conventional gasoline engine for HEV application. *International Journal of Automotive Technology* Vol. 9, No. 5, pp. 543–549.

ANEXOS

Anexo A

DIFUSIÓN DE RESULTADOS

**A.1 Influence of Driving Style on Fuel
Consumption and Emissions in Diesel-Powered
Passenger Car” (Fonseca et al, 2010)**

Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car

N. Fonseca^{1}, J. Casanova¹ and F. Espinosa²*

¹ Department of Energy and Fluid Mechanics Engineering. Universidad Politécnica de Madrid. C/José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. Tel: 34913363155. Email: jesus.casanova@upm.es

² Department of Electronics. Universidad de Alcalá. Campus Universitario. Ctra. Madrid-Barcelona, km. 33,600 | Alcalá de Henares (Madrid) Tel: 34918856545. Email: felipe.espinosa@uah.es

Abstract

This paper presents the main results of a study on the influence of driving style on fuel consumption and pollutant emissions of diesel passenger car in urban traffic. Driving styles (eco, normal or aggressive) patterns were based on the “eco-driving” criteria. The methodology is based on on-board emission measurements in real urban traffic in the city of Madrid. Five diesel passenger cars, have been tested. Through a statistical analysis, a Dynamic Performance Index was defined for diesel passenger cars. Likewise, the CO, NO_x and HC emissions were compared for each driving style for the tested vehicles.

Eco-driving reduces by 14% fuel consumption and CO₂ emissions, but aggressive driving increase consumption by 40%. Aggressive driving increases NO_x emission by more than 40%. CO and HC, show different trends, but being increased in eco-driving style.

Introduction

The Driving style of the driver refers to aspects of the actual driving action, where the driver can exercise their free will, although he is conditioned by external agents such as the configuration of the streets and roads (slope, crossroads per kilometre, etc.) and traffic congestion. Thus, the dynamic behaviour of the driver is reflected in how he acts on the vehicle controls such as: throttle, clutch, brake, gear shift and steering wheel. In order to asses the benefits of one driving style versus another, some real data were needed. Nevertheless, this study is not based on actual measurements of driver direct actuation on the vehicle controls, but on dynamic variables, recorded in real time, that are directly affected by the way the vehicle engine is operated, such as vehicle acceleration, engine speed and current gear shift.

Three different driving styles have been studied: eco-driving –in which shifting is made as soon as possible at a maximum of 2000 rpm for diesel engine to as high a gear as possible as defined by TNO (Vermeulen, 2006; Van Mierlo et al., 2004), normal driving and aggressive driving. Aggressive driving is defined as the driving style contrary to eco-driving, characterized by hard accelerations, increased use of first and second gear and driving at high engine speed (Casanova et al., 2005).

In order to have real figures of some relationships between real driving style and fuel consumption and emissions, data collected in real traffic conditions and using different diesel powered vehicles of different technology level were needed. Then, five different diesel passenger cars have been tested in real traffic use along two circuits in the city of Madrid. The testing methodology and the main results are presented.

Methodology

This study is based on about 1000 km driven in real traffic, equivalent to approximately 100 hours of emission measures, consumption and dynamic variables with five light duty diesel vehicles whose characteristics are presented in the table 1. Also, five different drivers have driven the cars, to somehow reduce the bias that could cause their own way of driving. Three different circuits have been used in the city of Madrid, the Madrid-UPM circuit (Casanova et al., 2009), Tetuan circuit and extraurban circuit, whose characterizations are shown in Figure 1 and Table 2 and 3. These circuits were chosen because they include the different types of streets normally found in a city like Madrid (local streets, secondary, main, arterial and highway),

allowing to analyse the influence of road infrastructure. All trials were made with the engine at normal operating temperature to avoid the inherent variability of the cold start.

Table 1: Overview of the tested passenger cars

Make and model	Year of manufacture	Engine: make / model	Engine displacement (cm ³)	Max. power (kW)	Weight (kg)	Emission legislation EURO
PEUGEOT 406 BK STDT 2,1	1998	PEUGEOT / D-P8C	2088	80	1485	Euro 2
RENAULT LAGUNA	2005	RENAULT / D/F 9Q D6	1870	88	1350	Euro 3
CITROEN C4 HDI92 LX	2007	CITROEN / D-9HX	1560	66,2	1332	Euro 4
RENAULT LAGUNA	2008	RENAULT / D/K 9K 37	1461	81	1386	Euro 5
SEAT LEON	2008	VOLKSWAG EN /(D) BKD	1968	103	1315	Euro 4

Figure 1: Madrid-UPM and “Tetuan” LR1 circuits.

Table 2. “Tetuan” – LR1 circuit. Table of characteristics per sector.

Sector	Distance (m)	Crossroads per km	Average Slope (%)	Average speed without traffic km/hr)	Lanes
1	610	8.2	0.86	31.6	3
2	680	7.6	-2.84	35.5	2
3	340	2.9	-0.63	42.5	2
4	1080	8.3	2.33	30.9	1
5	1400	6.4	-1.69	17.2	4
6	890	4.5	1.76	28.0	4
TOTAL	5000	6.6	0.02	25.6	---

Table 3. Madrid-UPM circuit. Table of characteristics per sector.

Sector	Distance (m)	Crossroads per km	Average Slope (%)	Average speed without traffic km/hr	Lanes
1	517	5.80	-1.58	35.36	1
2	271	7.38	-2.81	30.63	3
3	1881	5.32	2.40	34.57	8
4	230	4.35	1.75	38.66	2
5	303	13.20	-2.78	18.06	3
6	385	10.39	2.53	22.95	3
7	796	12.56	-2.53	23.24	3
8	761	6.57	-2.06	41.10	4
9	289	3.46	-3.05	44.28	3
10	257	3.89	1.02	25.14	1
TOTAL	5690	7.21	0.00	32.31	----

The five cars tested, were instrumented with a self-developed non-intrusive universal on-board emission measurement system (MIVECO-PEMS) and a portable global activity measurement system (PGAMS), described by Casanova et al. (2009). So, The most important variables that were recorded in real time at 10 Hz have been: exhaust gas flow, exhaust gas temperature, and exhaust gas pressure; concentration of CO (ppm), CO₂ (%), HC (ppm), NO_x (ppm) and air/fuel ratio (lambda); engine speed (rev/min), vehicle speed (km/h), oil and cooling water temperatures and weather conditions such as atmospheric pressure, humidity, temperature and headwind speed. As part of signal post-processing work (synchronization of real time recorded signal and thermodynamic and fluid mechanics calculations), the instantaneous mass emissions, total emissions and emission factors were calculated, both for each trial and for each of the sectors studied into each circuit.

Results and discussion

In a preliminary study presented in ETTAP09 (Casanova et al, 2009) a dynamic performance index "DPI" for a light duty gasoline vehicle was experimentally determined to evaluate the specific driving style used in a specific trial. In this work, a new dynamic performance index has been defined for light duty diesel vehicles. It is based on emission and dynamic measurements done in real traffic conditions for 5 light duty diesel vehicles (see Table 1). Various dynamic variables have been analysed over each entire circuit and over each sector in which it was divided. These are: average speed, positive average acceleration, percentage of time above a certain engine speed, percentage of time in each gears (first, second, third, etc.) and power demand (speed x acceleration) as defined by Ericsson (2001). The percentage of time does not include the time when car is stopped. So the Dynamic Performance Diesel index "*DPDi*" can be expressed as:

$$DPDi = 1.58e-3 * \%_time_1gear + 2.05e-3 * \%_time_2gear + 1.48e-3 * \%_time_>1850rpm + 5.82e-2 * Average_acceleration$$

Where it appears that the most influential parameters to quantify the driving style are the percentage of time that the driver runs in the first gear (*%_time_1gear*), in second gear (*%_time_2gear*), the percentage of time that leads to more than 1850 rpm (*%_time_>1850rpm*) and the positive mean acceleration (*Average_acceleration*) - that does not include periods of deceleration. The *DPDi* thus defined let to distinguish typical ranges of average accelerations that can occur in the three driving styles for the range of average speeds that can be had downtown in a city like Madrid, as shown in Figure 2.

The *DPDi* takes values in a range between 0 and 1.2 approximately, as shown in Figure 3, where in addition, the probability distribution of the *DPDi* according to the intention of the driver for eco and aggressive driving is shown.

Figure 2: Average acceleration in real urban traffic for different driving styles.

Figure 3: Probability distribution of the DPDi according to the intention of the driver for eco and aggressive driving.

The driver cannot always drive with his desired style due to the randomness characteristic of real traffic, as can be shown in figure 3. Thus the DPDi allows to reclassify each driving pattern according to driving style as follow: eco-driving $DPDi \leq 0.4$, normal driving $0.4 < DPDi < 0.6$ and aggressive driving $DPDi \geq 0.6$. As an example, figure 4 shows the effect of the driving style on fuel consumption for one of the tested cars.

Figure 4: Influence of the dynamic behavior of the driver on fuel consumption in real traffic. Measurements made on Renault Laguna 2005 in Madrid City, 30 trials and 200 km of travel. Trends calculated for 0% slope.

One of the features of the DPDi is that it let us to compare the different vehicles in real traffic, because guarantees the equality of the driving style used in each route. Moreover, as discussed in the previous paper (Casanova et al., 2009), driving in real traffic is determined by three factors: driving style, road and traffic congestion. The congestion is reflected in the relationship between real traffic average speed and average speed without traffic, where real traffic average speed is independent of the driving style and average speed without traffic depends on the type of street. Based on these ideas, there was made a statistical study for each of the cars, of which the follow empirical equation was obtained:

$$\text{Consumption (L/100 km)} = k_0 + k_1 * (1/\text{average_speed}) + k_2 * \% \text{slope} + k_3 * \text{DPDi}$$

Where k_0 , k_1 , k_2 and k_3 are the constants calculated by multiple regression analysis. The constants for each of the vehicles tested are shown in Table 4.

Table 4. Fuel consumption of cars tested. Coefficients of empirical equation of multiple regression.

Test vehicle	k_0	k_1	k_2	k_3	Model P-Value	R-squared (%)	Confidence level
Peugeot 406	-0.3474	48.2355	0.5899	12.8849	0.0000	90.1	99%
R_Laguna 2005	0.1196	41.1305	0.6620	12.8349	0.0000	84.6	99%
Citröen C4	0.4077	39.0072	0.6390	8.8021	0.0000	87.1	99%
R_Laguna 2008	-0.9273	41.9819	0.7481	14.9574	0.0000	87.3	99%
Seat León	-1.6971	34.6786	0.8766	17.6009	0.0000	90.8	99%

The figure 5 shows graphically the previous fuel consumption tendencies, for streets with slope of 0% and for the three driving styles: eco-driving (DPDi = 0.33), normal driving (DPDi = 0.49) and aggressive driving (DCI = 0.74).

Figure 5: Fuel consumption tendencies for tested vehicles, based on urban and extra-urban routes in Madrid City.

It confirms that the driving style has a very high influence on fuel consumption and hence over carbon dioxide emissions. This graph shows that in normal driving conditions, fuel consumption are very similar for all tested vehicles, except for the Citroën C4 that is a car with energy classification A (lowest consumption in its range).

Figure 6: Influence of driving style on NO_x and CO emission factors for urban traffic.

Additionally, based on the total results of each of the circuits, comparative studies were made between vehicles tested, as seen in Figure 6, for CO and NO_x emissions, with average speed of 19.3 km/h. The effect of driving style is not the same in all cars for those emissions, which

agrees with the TNO results (Vermeulen, 2006). The reason could be the different calibration of each engine electronic control. In eco-driving pattern when low engine speed and medium to high gas pedal positions are used, CO and NO_x emissions can increase, probably because of mixture enrichment, due to low oxidation catalyst efficiency at high combustion temperature at high fuel/air equivalence ratio.

Conclusion

Figure 7 shows a summary of the influence of driving style on emissions, which shows that for all the cars tested, the advantage of eco-driving is clear in terms of reducing consumption and CO₂ emissions by 14%, and the disadvantage of aggressive driving that increases consumption and CO₂ by about 40% (Figure 7), which agrees with De Vlieger (2000) and Van Mierlo et al. (2004). But CO, HC and NO_x emissions depend on the engine design and calibration. Anyway, on average for NO_x emissions, eco-driving do not have advantages, but aggressive driving increases this emission by more than 40%. Another important aspect observed is that NO_x emissions in real traffic generally exceed the statutory emission limits.

Figure 7: Summary of influence of driving style on emission factors for urban traffic.

Dynamic Performance Diesel index “*DPDI*” determined experimentally, is a tool that could be used to develop an eco-driving assist system, similar to that developed by Mukai et al. (2009).

Acknowledgments

This project was supported by the Spanish Ministry of Environment. The authors wish to acknowledge the contributions of Victor Pozo, Victor Criado, Emilio Cano, Pedro Rodrigo and Cesar Chacón for carrying out of tests and driving the cars.

References

- Casanova J., N. Fonseca and F. Espinosa (2009), Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions, *Proceedings 17th Transport and air pollution symposium and 3rd Environment and Transport Symposium*, Actes INRETS n°122.
- Casanova J., S. Margenat and J. Ariztegui (2005), Impact of driving style on Pollutant Emissions and Fuel Consumption for Urban Cars. *Proceedings of the 1st International Congress of Energy and Environment Engineering and Management*. Portalegre, Portugal. 2005. p175
- De Vlieger I., D. De Keukeleere & J. G. Kretzschmar (2000), Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. *Atmospheric Environment*. Volume 34, Issue 27, 2000.
- Ericsson E. (2001), Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use exhaust emission factors. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. Volume 6, Issue 5, September 2001.
- M. Mukai, J. Murata and T. Kawabe (2009), Driving Assist System for Ecological Driving Using Model Predictive Control. *Proceedings of SICE 9th Annual Conference on Control System*.
- Van Mierlo J., G. Maggetto, E. van de Burgwal and R Gense (2004), Driving style and traffic measures— influence on vehicle emissions and fuel consumption, *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, Volume 218, Number 1.
- Vermeulen R.J. (2006), The effects of a range of measures to reduce the tail pipe emissions and/or the fuel consumption of modern passenger cars on petrol and diesel. *TNO report*, IS-RPT-033-DTS-2006-01695.

A.2 “Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions”. (Casanova et al, 2009).

Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions

Jesús CASANOVA*, Natalia FONSECA* & Felipe ESPINOSA**

* Department of Energy and Fluid Mechanic Engineering. Universidad Politécnica de Madrid. C/José Gutiérrez Abascal, 2. 28006 Madrid. Email: jesus.casanova@upm.es

** Department of Electronics. Universidad de Alcalá. Campus Universitario. Ctra. Madrid-Barcelona, km. 33,600 | Alcalá de Henares (Madrid). Email: felipe.espinosa@uah.es

Abstract

The contributions of driver behaviour as well as surrounding infrastructure are decisive on pollutant emissions from vehicles in real traffic situations. This article deals with the preliminary study of the interaction between the dynamic variables recorded in a vehicle (driving pattern) and pollutant emissions produced over a given urban route. It has been established a “dynamic performance index”-DPI, which is calculated from some driving pattern parameters, which in turn depends on traffic congestion level and route characteristics, in order to determine whether the driving has been aggressive, normal or calm.

Two passenger cars instrumented with a portable activity measurement system -to record dynamic variables- and on-board emission measurement equipment have been used. This study has shown that smooth driving patterns can reduce up to 80% NO_x emissions and up to 20% of fuel in the same route.

Keys-words: *real emissions, driving pattern, emission factors, on-board emission measurement, dynamic performance index.*

Introduction

It is well known that the actual driving pattern can highly affect real emission levels and energy efficiency in urban traffic. The average speed in urban areas is mainly a function of the number of stops and starts by kilometre. It has been demonstrated that an increase in average speed in urban areas can improve fuel efficiency by 25 – 50 %, De Vlieger (2000), due to less stops.

Pollutant emissions and fuel consumption of a motor vehicle in a real driving circuit are affected by street configuration, traffic flow, vehicle type and driving style, Casanova and Margenat (2005). The dynamic behaviour of the vehicle in terms of speed, acceleration, engine speed, thermal engine conditions and exhaust after-treatment temperature, most influence the emission and fuel consumption factors. Emission factors are widely used to estimate total emission and fuel consumption inventories in urban and regional environments, which have been developed by simulation of driving cycles on chassis dynamometers derived from vehicle activity data obtained from instrumented cars. CO and HC emission factor are usually a decreasing function of average speed (including stops) in the range of 0 to 60 km/h, but NO_x emission factors could be an increasing function of average speed, Ntziachristos and Samaras (2000).

Pelkmans (2006), showed that emissions quantities from European Driving Cycles are quite different to real life values. The real world emissions and fuel consumption of a single vehicle in different driving situations can vary by a factor of 1 to 6. The use of “eco-driving” has shown its capability to 15 – 20 % fuel consumption reduction in real urban situations, Johansson et al (2003) and Takada (2007), but more realistic and specific situations measurements are needed in order to better understanding the influence of which driving pattern most influence results and in what sense. Also, previous author’s research showed that street and urban configuration affect emissions and consumption of the total vehicle fleet travelling by an urban zone very much depending on slope.

In order to take real life data from vehicles of different technologies and for different driving patterns, on board emission measurement systems (PEMS) have been widely used, some details could be found in Miyazaki et al (2002), Casanova et al (2004) and Gao and Checkel (2007). Direct fuel consumption measurement is difficult to be

done in a vehicle without dismantling some parts of the fuel system, and also it could affect the results. Then, fuel consumption is generally calculated from instantaneous emissions concentrations and exhaust flow. The problem of uncertainty can be solved by a good route characterization and by enough number of tests. When dealing with the relation between driver and emissions, not only emissions should be measured but also other parameters associated with driver behaviour as engine revolutions, speed, gear shifting and gas pedal actuation.

This paper presents the results of a research intended to advance in the knowledge of the relation between car driver behaviour and the surrounding, characterized by the street configuration. This preliminary study seeks to establish a “dynamic performance index”-DPI, which can be calculated based on some driving pattern parameters, which in turn depends on traffic congestion level and route characteristics, in order to determine whether the driving has been aggressive, normal or calm. For this study two different passenger cars -with different engine type- instrumented with a portable activity measurement system specifically designed and developed by the Engines Laboratory (Universidad Politécnica de Madrid) for these tests, have been used. The measures were undertaken on different streets of Madrid City and specifically on selected routes according to a preliminary study.

1 – Methodology

EXPERIMENTAL vehicles AND MEASUREMENTS SYSTEMS DETAILS

The first instrumented vehicle has been a petrol passenger car, Peugeot 205, 1400 cm³, 900 kg. The operating parameters registered in this vehicle have been: vehicle speed, engine speed, fuel consumption, angle position of throttle valve, cooling water and oil temperatures. The emissions measured have been: carbon dioxide CO₂, carbon monoxide CO, hydrocarbons HC, nitrogen oxides NO_x and oxygen O₂, as specified in Casanova and Ariztegui (2004). A scheme of on-board instrumentation is shown in Figure 1.

The second vehicle used is a diesel passenger car, Peugeot 406 BK STDT 2.1, with a direct injection turbo engine, 2088 cm³ and 1485 kg. It has been instrumented with a non-intrusive universal on-board emission measurement system (MIVECO-PEMS) and a portable global activity measurement system (PGAMS), both developed as part of research project for real life emission measurement. The block diagram of the MIVECO PGAMS/PEMS and the scheme of MIVECO PEMS are shown in Figure 2.

The electronic prototype PGAMS (Portable Global Activity Measurement System) aims to record, simultaneously and synchronously, the activity of the main agents involved on car pollutant emissions: driver, vehicle and route. Its hardware architecture is based on three subsystems: sensorial, conditioning and acquisition, processing and monitoring (local and remote). The PGAMS is a system that can be boarded on any type of vehicle.

The MIVECO on-board emission measurement system (MIVECO-PEMS) for Diesel/petrol HD and LD vehicles, depicted in Figure 3, is based on fast response commercial analysers and a self designed exhaust flow meter. The MIVECO-PEMS are conformed by a NDIR analyzer for CO₂ and CO, a non-sampling Zirconia type NO_x -O₂ analyzer, a FID for unburned hydrocarbons (HC), and a Lambda Meter. The signals generated by each analyzer are collected by an acquisition system that uses Labview® software at 10 Hz data recording frequency. The flow meter consists of a Pitot tube for gases with high moisture content, which prevents that condensation may block pressure ducts and a differential pressure gauge of high sensitivity and response rate, capable of detecting pressure changes at a frequency up to 1kHz. This makes it possible to detect the pulses of flow that occur in the engine at idle.

Figure 1: Scheme of on-board instrumentation in the petrol car.

Figure 2: On-board instrumentation in the diesel car a) Block diagram of the MIVECO PGAM/PEMS. b) Scheme of the MIVECO PEMS (portable emission measurement system).

Figure 3: MIVECO-PEM System arrangement in the diesel car.

Urban circuit

The measures were carried out in a specific urban circuit in Madrid City, called “Madrid-UPM Circuit”, which include most of the types of streets there are downtown, like local, secondary, principal and arterial. To know the influence of the type of street, the whole route was divided into 10 sectors, as shown in Figure 4 and whose characteristics are presented. 50 journeys were realized by this route, 40 of them with the petrol passenger car and the others with the diesel passenger car. A portion of the petrol car journeys were made in days off, in order to obtain experimental data about average speed without traffic, which were used as a baseline. Remaining trips were made in normal traffic conditions.

Figure 4: Madrid-UPM Circuit and table of characteristics per sector.

SECTOR	DISTANCE (M)	CROSSROADS PER KM	AVERAGE SLOPE	AVERAGE SPEED WITHOUT TRAFFIC	LANES
1	517	5,80	-1,58	35,36	1
2	271	7,38	-2,81	30,63	3
3	1881	5,32	2,40	34,57	8
4	230	4,35	1,75	38,66	2
5	303	13,20	-2,78	18,06	3
6	385	10,39	2,53	22,95	3
7	796	12,56	-2,53	23,24	3
8	761	6,57	-2,06	41,10	4
9	289	3,46	-3,05	44,28	3
10	257	3,89	1,02	25,14	1
TOTAL	5690	7,21	0,00	32,31	----

Real-time dynamic variable profiles that characterize the driving patterns like vehicle speed, engine speed, current gear and engine load (gas pedal position) were registered in all trips. In addition, the following dynamic variables were calculated –for each sector and for the entire route-, based on the results of several researches carried out by Ericsson (2000, 2001 and 2006): average speed (km/h), average running speed (km/h) – average speed excluding idle time, average acceleration (m/s^2), average deceleration (m/s^2), percentage of time spent in different operating modes (gear) or idle, like percentage of time on high gears (3rd, 4th and 5th), percentage of time over 2000 min^{-1} , average value of the product of Instantaneous speed and acceleration, called “demand of acceleration” as defined by Ericsson (2001), stop time per crossroad.

Driving STYLE, Street and Traffic variables

Because of driving style have a great influence over driving patterns, three kinds of driving styles have been compared as defined by De Vlieger (1997-2000), Ericsson (2000-2001) and Takada (2007): calm driving -where the driver anticipates movements avoiding sudden accelerations-, normal driving -where accelerations and decelerations are moderated- and aggressive driving, -where violent or sudden acceleration and heavy braking are present-. The calm driving corresponds with the concept of “Eco-driving style”, described above.

In addition to the fact that the driving style strongly affects the specific driving pattern, many research works - Brundell-Freij and Ericsson (2005), Ericsson (2001), Ericsson (2000), Rosqvist (2003), De Vlieger (2000) and Ericsson (2006)- have showed that road infrastructure and traffic density have great influence too. So, in this study a Street-Index and a Traffic-Index have been defined in order to measure the degree of constriction that those aspects impose on the way to any driver to make a particular trip.

The variables included in the Street-Index are: type of road, slope and density of crossroads. The type of road is an index defined from 0 to 1 that indicates the traffic constriction as follow: 0 for very high constriction and 1 for very low constriction. In this order, 0.15 for local street, 0.30 for secondary, 0.45 for main, 0.6 for arterial, 0.75 for bypass street and 0.9 for highway. The Street-Index was based on a statistical study conducted with the experimental data obtained with the petrol car during day off journeys, following that average speed without traffic can be expressed in terms of those static variables as follows:

$$\text{Average_speed_without_traffic} = 34,25 - 0,90 \cdot \text{slope} + 32,28 \cdot \text{Type_of_street} - 2,15 \cdot \text{crossroads/km}$$

(R-squared: 83,4%, indicated that this model explains 83,4% of the variability in Average_speed_without_traffic. And, since P-value in the ANOVA table is less than 0.01, there is a statistically significant relationship between the variables at the 99% confidence level)

To obtain a normal Street-Index –from 0 for low constriction and 1 for high constriction-, was necessary to apply the following equation:

$$\text{Street-Index} = Si = 1,25 - 0,025 \cdot \text{Average_speed_without_traffic}$$

In order to determinate the Traffic-index, two associated variables that are naturally related with traffic flow were studied: stop time per crossroad and average speed per average speed without traffic. The Figure 5 shows the relationship between these variables.

Since there has been statistically demonstrated that neither average_speed nor these two variables have any correlation with the specific driving style (maximum R_Squared=5%, indicating that the driving style explains maximum 5% of the variability in Average_speed and in these traffic variables), and Average_speed_without_traffic depends only on road infrastructure, the Traffic-Index has been defined proportionally to the Average speed per average speed without traffic, with a numerical value from 0 to 1 indicating very low and very high traffic density respectively, as shown bellow:

$$\text{Traffic_index} = Ti = 1 - 0.67 \cdot \text{Average_speed_per_average_speed_without_traffic}$$

This makes it possible to obtain an equation to predict the average speed for a given route based on the street-index and traffic-index, as shown in the next equation and in the Figure 6 obtained for different street types:

$$\text{Average_speed} = 60,31 - 46,78 \cdot \text{traffic_index} - 30,06 \cdot \text{street_index} \quad (\text{R-squared} = 95\%, \text{P-value}=0.00)$$

Figure 5: Traffic variables relationship.

Figure 6: Variation of average speed with traffic index for different streets.

2 – Results

The only linearly independent variables related to driving style are average acceleration and percentage of time over 2000 min⁻¹. This has enabled to define the Dynamic_Performance_Index that allows assessing the driving style, as shown below:

$Dynamic_Performance_Index = DPI = -0,17 + 0,55 * Average_acceleration + 0.006 * \%_time_>2000rpm$ (R-squared = 70%, P-value=0.00)

The definition of the Dynamic_Performance_index lets to predict the value of the most important dynamic variables based only on the characteristics of the road infrastructure (Street_index - Si), traffic density (traffic_index - Ti) and driving style (Dynamic_Performance_index-DPi) as shown in the following equations:

$$Average_acceleration = 0,05 + 0,29 * Si + 0,34 * Ti + 1,13 * DPi \quad (R-squared = 83\%, P-value=0.00)$$

$$\% \text{ time} > 2000 \text{ rpm} = 23,33 - 26,34 * Si - 31,27 * Ti + 61,39 * DPi \quad (R-squared = 75\%, P-value=0.00)$$

$$\% \text{ time on large gear} = 123,99 - 61,46 * Si - 95,94 * Ti - 29,45 * DPi \quad (R-squared = 55\%, P-value=0.00)$$

$$\text{Demand of acceleration} = 25,54 - 11,75 * Si - 22,43 * Ti + 25,48 * DPi \quad (R-squared = 82\%, P-value=0.00).$$

The accuracy of the fitted models for these variables is shown graphically in Figure 7. Additionally, the prediction of the average acceleration, for different types of streets, is shown in Figure 8.

Due to the differences between both cars -petrol and diesel- the study of the influence of the different variables (dynamics, traffic and road infrastructure), on the emission factors has been performed separately.

Figure 7: Accuracy of the fitted models for dynamic variables.

Figure 8: Variation of Average acceleration with Dynamic performance index.

Petrol Passenger car Emission factors

To investigate the linear relationship between emission factors and each of the variables considered, analysis of variance was carried out using Pearson coefficient. The Table 1 presents a summary of the main variables (for better visualization only are shown correlation coefficient greater than 0.2, although correlation is considered significant when the coefficient is greater than 0.3).

Table 1: Pearson Correlation coefficients for emission factors

		EMISSION FACTORS (g/km)			
		FE HC	FE CO	FE CO ₂	FE NO _x
Driving behaviour	Driver perception			0.24	0.49
	Dynamic performance			0.23	0.45
Index	Street			0.20	
	Traffic	0.40	0.41	0.45	
Dynamic variables	Average acceleration	0.25	0.28	0.52	0.47
	Average desaceleration		-0.22	-0.36	-0.34
	% time on large gear	-0.30	-0.31	-0.58	
	% time > 2000 rpm	-0.25	-0.29		0.25
	Demand of acceleration				0.30
Traffic variables	Average speed (km/hr)	-0.37	-0.39	-0.58	
	Stop time / crossroad	0.31	0.29	0.59	
	Average speed / Average speed without traffic				
		-0.37	-0.40	-0.41	
Road infrastructure	Type of street			-0.22	
	Slope				
	Crossroads/km				
EMISSION FACTORS (g/km)	FE HC	-	0.89	0.44	
	FE CO	0.89	-	0.40	
	FE CO ₂	0.44	0.40	-	0.34
	FE Nox			0.34	-

BASED ON REAL TIME MEASUREMENT WITH A PETROL TOURING CAR (EURO1) IN URBAN TRAFFIC IN MADRID CITY

The table of Pearson correlation coefficients –Table2-, confirms that the petrol car fuel consumption (CO₂ emission) increases with average acceleration, stop time per crossroad and decreases with average speed and the use of high gears. Additionally, it is noted that the NO_x emission is primarily associated to the acceleration and hence to the driving style. This is an expected result due to the fact that stronger accelerations are related to higher cylinder gas temperatures, which favours NO_x formation. Furthermore, the emissions of HC and CO, closely related to each other, are affected by traffic density, although the correlation is weaker.

To quantify the influence of traffic, street infrastructure and driving style over emissions and fuel consumption, multiple linear regression analysis was performed. It has been found that only CO₂ emissions are directly related to the three factors (traffic, street infrastructure and driving style), the others emission factors are related only to one of them, according to the following equations and as illustrated in the Figure 9:

$$EF_{CO_2} = -31,57 + 131,89 * Si + 127,94 * DPi + 220,26 * Ti \quad (R\text{-squared} = 48\%, P\text{-value}=0.00)$$

$$EF_{CO} = 0,76 + 3,90 * Ti \quad (R\text{-squared} = 17\%, P\text{-value}=0.00)$$

$$EF_{HC} = 0,04 + 0,18 * Ti \quad (R\text{-squared} = 16\%, P\text{-value}=0.00)$$

$$EF_{NO_x} = -0,02 + 0,14 * DPi \quad (R\text{-squared} = 21\%, P\text{-value}=0.00)$$

The model generated for CO₂ emission factor (fuel consumption) explains nearly 50% of its variability, while only explained 16%, 17% and 21% of the variability of the factors CO, HC and NO_x respectively. However to illustrate the trends found, the Figure 10 shows the prediction of the CO₂ emission factor (fuel consumption) with respect to driver style, for different types of streets and traffic conditions.

Figure 9: Accuracy of the fitted models for emission factors.

Figure 10: CO₂ Emission Factor & Dynamic performance index.

Petrol Passenger car Emission factors

The Figure 11 illustrates the comparative curve for instantaneous consumption and average emission factors for two different driving styles. It is noted that in addition to the peaks of consumption are higher in aggressive driving, emission factors are also.

Figure 11: Instantaneous fuel consumption and total emission factor for diesel car in different driving style.

3 – Discussion and conclusion

Average speed in day off trips with “normal” driving, depends only on the street configuration, and is useful to independently evaluate the effect of the street characteristics over the driving style. It is the best parameter to define the Street Index.

In spite of the fact that the Traffic Index has been defined only as a function of the average speed to day off average speed ratio, for future research the spot time per crossroad should be included, because it has a significant influence on fuel consumption.

Traffic density has almost double weight that aggressiveness and street constrictions on CO₂ emissions, it confirms that congestion and traffic flow is a relevant factor to be controlled to reduce these emissions in a big town as Madrid Town.

In the case of the petrol car, CO and HC emissions are correlated, as shown in table 1. It is due to the fact that both pollutants are coming from combustion problems with rich mixtures. The fact that no correlations could be found between these pollutants and vehicle dynamic variables, are probably due to the fact that there are some moments in which the injection system cannot control the air fuel ratio dealing to transitory rich mixtures when the gas pedal is released. But probably with a more advanced injection system, this situation will not appear.

Although correlation between NO_x emissions and DPi obtained in this work is lean, it is actually a correlation that should be previously expected because of higher engine loads when aggressiveness is higher. Then more tests in different types of car are needed to understand better the relationship between NO_x emissions and real traffic situations.

The graphics of instantaneous emissions in the diesel car tests show a significant influence of driving style on pollutant emissions and fuel consumption, as should be expected. More tests are needed obtain more statistically consistent results.

Acknowledgments

The authors would like to acknowledge the financial backing for this project provided by the Ministry of Environment and Rural and Marine Affairs of Spain. The authors also wish to acknowledge the contributions of Emilio Cano by the preliminary treatment of the experimental data and to David Nieto, Diego Perez and Alfredo Gonzalez for mounting equipment in vehicles and carrying out of tests.

References

- Ariztegui J., J. Casanova & M. Valdes (2004): A structured methodology to calculate traffic emissions inventories for city centres. Science of the Total Environment. Volume 334-335. (2004) p 101-109.
- Brundell-Freij K. & Ericsson E. (2005): Influence of street characteristics, driver category and car performance on urban driving patterns. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 10, Issue 3, May 2005, p 213-229.
- Casanova J., M. Valdes & J. Ariztegui (2001): The influence of car fleet composition on urban pollutant emissions. Application to the City of Madrid. Proceedings of 10th International Symposium "Transport and Air Pollution". September 17-19, 2001 -- Boulder, Colorado USA.
- Casanova J., J. Ariztegui & M. Valdes (2004): Comparative study of two different on-board emission measurement systems. Proceedings of the Word Automotive Congress, FISITA 2004. Barcelona, Spain 2004. Ref:F2004V053.
- Casanova J., S. Margenat & J. Ariztegui (2005): Impact of driving style on Pollutant Emissions and Fuel Consumption for Urban Cars. Proceedings of the 1st International Congress of Energy and Enviroment Engineering and Management. Portalegre, Portugal. 2005. p175
- De Vlieger I. (1997): On board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars. Atmospheric Environment. Volume 31, Issue 22, November 1997, p 3753-3761.
- De Vlieger I., D. De Keukeleere & J. G. Kretzschmar (2000): Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. Atmospheric Environment. Volume 34, Issue 27, 2000, Pages 4649-4655.
- Ericsson E. (2000): Variability in urban driving patterns. Transportation Research Part D. Vol 5 (2000) p 337.

- Ericsson E. (2001): Independent driving pattern factors and their influence on fuel-use exhaust emission factors. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 6, Issue 5, September 2001, p 325-345.
- Ericsson E., H. Larsson & K. Brundell-Freij (2006): Optimizing route choice for lowest fuel consumption – Potential effects of a new driver support tool. Transportation Research Part C. Volume 14 p369.
- Gao Y. & M.D. Checkel (2007): Experimental Measurement of On-Road CO₂ Emission & Fuel Consumption Functions. SAE paper 2007-01-1610.
- Johansson H., P. Gustafsson, M. Henke & M. Rosengren (2003): Impact of EcoDriving on emissions. Proceedings of the 12th International Symposium Transport and Air Pollution. No. 92. Vol I, p113.
- Miyazaki T., Y. Takada & N. Lida (2002): Development of On-Board System to Measure Running Condition and Actual NO_x Emissions From Freight Vehicle. SAE paper 2002-01-0613.
- Ntziachristos L. & Z. Samaras (2000): Copert III. Computer programme to calculate emissions from road transport. European Environment Agency 2000; 53-54:61-5.
- Pelkmans L. & P. Debal (2006): Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles. Transportation Research Part D: Transport and Environment. Volume 11, Issue 4, July 2006, p 233-241.
- Takada Y., S. Ueki, A. Saito, N. Sawazu & Y. Nagatomi (2007): Improvement of Fuel Economy by Eco-Driving with Devices for Freight Vehicles in Real Traffic Conditions. SAE paper 2007-01-1323.

**A.3 Influence of the stop/start system on CO₂
emissions of a diesel vehicle in urban traffic.
(Fonseca et al, 2011a)**

This article appeared in a journal published by Elsevier. The attached copy is furnished to the author for internal non-commercial research and education use, including for instruction at the authors institution and sharing with colleagues.

Other uses, including reproduction and distribution, or selling or licensing copies, or posting to personal, institutional or third party websites are prohibited.

In most cases authors are permitted to post their version of the article (e.g. in Word or Tex form) to their personal website or institutional repository. Authors requiring further information regarding Elsevier's archiving and manuscript policies are encouraged to visit:

<http://www.elsevier.com/copyright>

Contents lists available at ScienceDirect

Transportation Research Part D

journal homepage: www.elsevier.com/locate/trd

Notes and comments

Influence of the stop/start system on CO₂ emissions of a diesel vehicle in urban traffic

Natalia Fonseca*, Jesús Casanova, Manuel Valdés

Universidad Politécnica de Madrid, Department of Energy Engineering and Fluid Mechanics, c/José Gutiérrez Abascal 2, 28006 Madrid, Spain

ARTICLE INFO

Keywords:

Vehicle emission factors
On-board emission measurement
Tractive power
Stop/start systems

ABSTRACT

This paper presents measurements of CO₂ emission and efficiency of stop/start technology on a diesel vehicle in urban traffic. Two four-wheel-drive diesel vehicles with on-board exhaust emission and vehicle activity measurement systems were tested in two urban driving circuits representative of downtown Madrid. The vehicles had similar turbocharged and intercooled diesel engines fulfilling the same Euro 4 emissions regulation; but one had an improved engine incorporating stop/start technology. CO₂ emission reduction of more than 20% for the car equipped with the stop/start system was obtained. Regardless of the variability in driving style, the grade and type of streets, traffic congestion, and the engine operating temperature, the car equipped with the stop/start system has intrinsically a lower CO₂ emission factor.

© 2010 Elsevier Ltd. All rights reserved.

1. Introduction

Reduction of carbon dioxide emission from light-duty vehicles is one of the priorities in most environmental policies. An agreement to reduce CO₂ emissions from light-duty vehicles (European Parliament, 2009) has been signed in Europe Union, limiting CO₂ emissions to 130 g/km, with progressive implementation from 2012 to 2015.

To fulfil such requirements, vehicle manufacturers have been forced to incorporate technological improvements such as weight lightening, engine size reduction, low-rolling-resistance tires, improved aerodynamics and hybridisation and electrification of vehicles. The “stop/start” (S/S) technology is an easy and low-cost solution, in which the internal combustion engine is automatically powered off when the car is stopped and restarted upon driver's demand or when needed. Thus, it eliminates fuel consumption during idling, as in the case of stops at traffic lights or jams, which can account for up to 10% of total consumption (Rueger, 2008).

The influence of the S/S system on fuel economy and emissions has been studied mainly because of the current interest in hybrid vehicles. Henein et al. (2000) studied the effect of start transients on fuel consumption and hydrocarbon (HC) and NO_x emissions using direct-injection diesel engines. They proved that stopping the engine reduces fuel consumption, even if some energy is consumed stopping and starting the engine. Moreover, they showed that the shutdown time had a considerable influence on NO_x emissions. Bishop et al. (2007) performed chassis dynamometer tests to determine the fuel economy improvement of an S/S system, noting a 5.3% reduction in fuel consumption in the city FTP75 test cycle. Yu et al. (2008) conducted experiments on a gasoline engine coupled to an eddy-current dynamometer and showed that HC transient emissions are higher when the engine is quickly started in the original engine calibration mode.

In order to assess the benefits of the S/S system in real life, tests should be conducted in real traffic with on-board emissions and activity measurement systems. Portable emission measurement systems (PEMS) are nowadays state of the art

* Corresponding author. Tel.: +34 91 336 3155; fax: +34 91 336 3006.

E-mail address: nfonseca@etsii.upm.es (N. Fonseca).

technology. They are based on instantaneous measurement of the different pollutant concentrations and exhaust gas flow. By a subsequent signal processing, instantaneous mass emissions of each pollutant and fuel consumption could be determined.

When dealing with on-board measurements in urban traffic, the grade of the road plays a significant role in instantaneous emissions and fuel consumption, as well as in averaged values. Fuel consumption increase in upgraded streets could not be compensated by downgraded streets, thus it is an important parameter to be also registered. Also, average speed is a variable that affects significantly to fuel consumption.

To explain the fuel economy and pollutant emissions results, the instantaneous power at wheels (based on the tractive force in each moment) need to be measured. It could be calculated from vehicle specification data, vehicle speed and acceleration, front wind speed and road grade. In this work, the vehicle specific power (VSP) has been computed from the car characteristics and real traffic collected data.

2. Methodology

Forty-one driving are evaluated over 300 km driven in real traffic conditions; equivalent to about 20 h of instantaneous emission, atmospheric condition and dynamic variable measurements. Two four-wheel-drive vehicles equipped with an on-board emission and vehicle activity measurement system are used and all tests were conducted with the air conditioning system turned off.

Two urban circuits were chosen to be representative of the congestion found in the city of Madrid, the “Tetuan” and the “Chamberí” circuits; both include streets with high average daily traffic. Each circuit has different types of streets, traffic light sequences and road grades. [Figs. 1–4](#) show the characteristics of the circuits, including the locations of traffic lights and the orographic profile of the streets. [Table 1](#) shows the characterisation of the circuits, including the speed without traffic recorded on a holiday morning.

The tests used two diesel Land Rover Freelander2 vehicles, one, a conventional 2009 year model (9MY) and the other one a 2010 model equipped with a stop/start system (10MY) that can be turned on and off (the latter designated as 10MY-eco off). The S/S system has some refinements over the original diesel engine as controlled smooth throttle closing and ramping down of fuel, an alternator that can be turned off during the shutdown procedure, modified engine calibration, a heavy-duty starter motor, a strengthened dual-mass flywheel and a special absorption glass mat battery.

A non-intrusive, universal on-board portable emission measurement system, MIVECO-PEMS and a portable global activity measurement system, PGAMS, were installed in the cars. The systems are designed and developed, based on commercial analysers and self designed components to be installed on-board. At the frequency of 10 Hz they measure CO, HC, NO_x, λ and exhaust gas flow, as well as other activities such as vehicle speed, engine speed, engine temperatures and atmospheric

Fig. 1. Map of the Tetuan circuit (LR1).

Fig. 2. Orographic profile of the Tetuan circuit (LR1).

Fig. 3. Map of the Chamberi circuit (LR2).

Fig. 4. Orographic profile of the Chamberi circuit (LR2).

parameters including temperature, pressure, humidity and headwind speed. Fuel consumption is calculated from the emission data along with exhausts (Fonseca and Casanova, 2009).

Table 1

Characteristics of the urban circuits.

Circuit name		Distance (km)	Number of intersect.	Intersect. per km	Speed without traffic (km/h)	Average daily occupation (vehicles/day)	% Local streets	% Secondary streets	% Main streets	% Arterial streets
Tetuán	LR1	5.1	33	6.5	25.6	12,402	–	69	31	–
Chamberí	LR2	8.7	47	5.4	27.6	25,632	11	38	29	23

Fig. 5. Positive mean acceleration for version 2009 (9MY) versus version 2010 (10MY) with the S/S system on and off.

As part of the signal post-processing (synchronisation of real-time recorded signals and thermodynamic and fluid mechanics calculations), the instantaneous mass emissions, total emissions and emission factors are calculated for each tests and for the sectors in the two circuits. The on-board instrumentation set, including the energy supply system, had a weight of 110 kg, corresponding to a vehicle loaded of 110 kg plus a driver and passenger.

A professional driver instructed to use the same pattern and driving style in all tests drove both vehicles. A “normal” driving style was used, in which acceleration and deceleration are varied according to the classification of Casanova et al. (2009). Fig. 5 shows average and standard deviation of the positive mean acceleration of all tests for each car.

3. Results

The tests were performed on weekdays for different levels of traffic congestion, therefore, travel times, average speeds, and stop/start times varied between tests. The results are presented as plots of trends as a function of speed, the most representative variable in traffic conditions. For example, Fig. 6 shows the trend of CO₂ emissions versus average speed based on total emissions for each test and shows the strong influence of this variable. The average speeds for all tests were between 9 and 20 km/h, whereas the average speeds without congestion were 25.6 km/h on the Tetuan and 27.6 km/h on the Chamberí circuit.

Fig. 7 shows the average and standard deviation values of CO₂ emission factors for each vehicle for all tests of both urban circuits. Compared with the conventional car (9MY), the figure shows that, in congested urban traffic (average speed of

Fig. 6. Trends and measured data of the CO₂ emission factor versus average speed. Version 2009 (9MY) and version 2010 (10MY) with the S/S system on and off.

Fig. 7. Average and standard deviation values of CO₂ emission factor. Version 2009 (9MY) and version 2010 (10MY) with the Start/Stop system on and off. Madrid urban traffic, average speed 15.5 km/h.

15.5 km/h), the CO₂ emission is reduced by more than 20% when using the car equipped with the S/S system (10MY-on). From these results, it can be estimated that a 12.2% fuel consumption reduction (10MY-off versus 10MY-on) can be attributed to idle consumption and 8% (9MY versus 10MY-off) to engine calibration and optimisation of the version 10MY with the S/S system.

To better understand the reasons for such fuel economy improvements, a multivariable modal analysis has been performed to analyse the influence of the new engine calibration of the stop/start version on CO₂ emission factor in real urban traffic. It is known that in real urban traffic, fuel consumption and pollutant emissions depend mainly on specific engine characteristics, but the variability observed is due to the influence of factors related to traffic congestion (average speed: S_{Va} in km/h) (De Vlieger et al., 2000), driving style, street configuration and engine operating conditions. Each circuit was divided into different zones (six zones in the Tetuan circuit and 10 zones in the Chamberí circuit), as shown in Figs. 2 and 4.

For the multivariable analysis, average acceleration (A_V in km/h/s) was included in order to represent the driving style. Although the average acceleration is quite similar in all tests, small differences caused by the randomness of traffic strongly influence the CO₂ emission factor (e_{VCO_2} in g/km).

The variables related to the configuration of the streets are road grade (G in %) and type of street (t_s). t_s is an index that evaluates the flow of traffic for which the street was designed, being 0 for streets with very low traffic flow and 1 for those with very high traffic flow. The values used are as follows: 0.15 for local streets, 0.30 for secondary streets, 0.45 for main streets, 0.6 for arterials, 0.75 for bypass streets and 0.9 for highways. The most important variable related to the engine operating conditions is the average engine oil temperature (T_E in °C), because CO₂ emissions increase when the engine is cold due to reduced mechanical efficiency. The general mathematical expression for each vehicle is

$$e_{VCO_2} = c_0 + \frac{c_1}{S_{Va}} + c_2 \cdot A_V + c_3 \cdot G + \frac{c_4}{t_s} + c_5 \cdot T_E \quad (1)$$

Coefficients for the tested vehicles are shown in Table 2 and the fitting values in Fig. 8.

The regressions indicate that regardless of the variability imposed by external factors such as traffic congestion, driving style, configuration of the streets and engine operation conditions, the vehicle equipped with S/S system has the lower intrinsic CO₂ emission factor (c_0 [10MY-on] = 165.7 g/km), showing a significant improvement over the conventional model

Table 2
Coefficients of the empirical models.

Tested car	c_0	c_1	c_2	c_3	c_4	c_5
9MY	221.4	1382.4	46.9	31.7	18.1	−2.1
10MY-on	165.7	912.5	50.8	29.8	14.0	−1.4
10MY-off	176.0	1760.7	61.1	32.4	14.3	−2.0

Fig. 8. Fitted values for the CO₂ emission factor models: (a) version 2009 (9MY), (b) version 2010 (10MY) with the start/stop system on and (c) off. Note: Calculated for normal driving style, normal operating condition of the vehicle, and average speed of 20 km/h.

($c_0[9MY] = 221.4 \text{ g/km}$). The coefficients show the strong influence of average speed on CO_2 emissions and, ipso facto, on fuel consumption in the three cases; nevertheless its influence is less critical for a car equipped with the S/S. For example, for the same driving style, engine temperature, type of street and a grade of 0%, a reduction in the average speed from 25 km/h to 15 km/h implies an increment of 37 g/km of CO_2 in a normal diesel vehicle, whereas for the vehicle equipped with S/S system the increment is only 24 g/km.

Fig. 9 shows that the slope and the type of street affect in a similar way to the two vehicles tested. An increase in the street gradient of only 1% can cause an increase in CO_2 emissions of approximately 30 g/km when maintaining the same speed profile in the three cases. Also CO_2 emissions may increase by 20% in local streets over secondary streets because of the higher frequency of stops. In contrast, Fig. 10 shows that the engine temperature and driving style do not affect in the same way to both tested vehicles. The vehicle with the S/S system (10MY-on) is less affected by low engine temperatures; therefore, CO_2 emissions during a cold start are much lower than in the conventional version (LR-9MY). Furthermore, aggressive driving (about 3 km/h/s) can result in an increase of more than 76 g/km of CO_2 emissions in the vehicle with S/S system turned on and almost 92 g/km in the vehicle equipped with S/S system turned off.

To calculate the energy CO_2 emission factor ($e_{\text{ECO}_2} [\text{g/kW h}]$) for each vehicle, instantaneous tractive power ($P_t [\text{kW}]$) is calculated based on the dynamic variables recorded in real-time, including road grade and wind speed. Thus, e_{ECO_2} is calculated as the ratio between mass emission of CO_2 (calculated by summation of the instantaneous mass emission values $\dot{m}_{\text{CO}_2}$ averaged for each Δt period) and positive tractive work (PW_t) for each zone and for each overall test, as shown in Eq. (2). PW_t was calculated as the integral of the positive areas of the curve of instantaneous tractive power.

$$e_{\text{ECO}_2} = \frac{\sum_1^n \dot{m}_{\text{CO}_2} [\text{g/h}] \cdot \Delta t}{PW_t [\text{kW h}]} \quad (2)$$

Fig. 9. Trends of CO_2 emission factor versus road grade (%) for local and secondary streets. Version 2009 (9MY) and version 2010 (10MY) with the start/stop system on and off.

Fig. 10. Trends of CO_2 emission factor versus average engine temperature for normal and aggressive driving styles, for the 2009 model and the 2010 model with the start/stop system on and off.

Fig. 11. Mass emission of CO₂ versus total positive tractive work (kW h) for version 2009 and version 2010 with the start/stop system on and off.

Fig. 11 shows the energy CO₂ emission factor as the linear relationship existing between mass emission of CO₂ and PW_t for each car. The factor is a measure of the overall efficiency of the vehicle because total positive tractive work represents the engine energy demand for kinetic energy, road grade, rolling resistance, and aerodynamic drag and mass emission of CO₂ represents the fuel consumption of the vehicle. It can thus be used to compare the vehicle's "global efficiency" and to predict the emission of CO₂ in urban traffic for a given circuit, based only on a characterisation of the road and the driving pattern.

Therefore, following Fig. 11, there is an increase in overall efficiency due to integration of the S/S system in the vehicle (LR_10MY), even when driving with S/S disabled (LR_10MY-off). These results confirm the trend shown in Fig. 6 and the improvement in engine efficiency when it is operating in low-load conditions.

4. Conclusions

The three methods have been used to study the influence of the S/S on a four-wheel-drive diesel vehicle: measurement of average CO₂ emissions, modal statistical analysis and energy emission factor, show a significant reduction in CO₂ emissions in actual urban traffic; up to 20% at an average speed of 15.5 km/h. The reduction could be partly attributed to changes in the engine and partly to zero idling emissions. Additionally, modal statistical analysis explains the variability observed in the CO₂ emissions found in actual traffic flows. Finally, the energy emission factor analysis confirms that CO₂ emission reduction is due to better global energy efficiency of the vehicle with S/S system.

Acknowledgements

Part of this work was supported by the Spanish Ministry of the Environment. The authors acknowledge the contribution of Felipe Espinosa of the Universidad de Alcalá for the development of the portable global activity measurement system, Land Rover Spain SL for providing the vehicles and undergraduate students Alfredo Fernandez, David Nieto, Emilio Cano, Víctor Criado and Víctor Pozo for carrying out the tests.

References

- Bishop, J., Nedungali, A., Ostrowski, G., Surampudi, B., Armiroli, P., Taspinar, E., 2007. An Engine Start/Stop System for Improved Fuel Economy, SAE Technical Paper 2007-01-1777.
- Casanova, J., Fonseca, N., Espinosa F., 2009. Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions. In: Presented at 17th Transport and Air Pollution Symposium and 3rd Environment and Transport Symposium. Proceedings INRETS No. 122, Toulouse.
- De Vlieger, I., De Keuleleere, D., Kretschmar, J.G., 2000. Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars. Atmospheric Environment 34, 4649–4655.
- European Parliament, 2009. Setting Emission Performance Standards for New Passenger Cars as Part of the Community's Integrated Approach to Reduce CO₂ Emissions from Light-Duty Vehicles. Regulation (EC) No. 443/2009 of the European Parliament and of the Council of 23 April 2009, Official Journal of the European Union 5.6.2009 L140.
- Fonseca, N., Casanova, J., 2009. Problemas asociados a la medida de emisiones máscas instantáneas en motores de vehículos. Presented at VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica, JNIT2009, Córdoba.
- Henein, N., Taraza, D., Chalhoub, N., Lai, M., Bryzik, W., 2000. Exploration of the Contribution of the Start/Stop Transients in HEV Operation and Emissions, SAE Technical Paper 2000-01-3086.
- Rueger, J., 2008. Clean Diesel – Real Life Fuel Economy and Environmental Performance. Presentation SAE Government/Industry Meeting, Washington, DC.
- Yu, S., Dong, G., Li, L., 2008. Transient characteristics of emissions during engine start/stop operation employing a conventional gasoline engine for HEV application. International Journal of Automotive Technology 9, 543–549.

**A.4 Influencia del contenido de Biodiésel en
gasóleo en el rendimiento térmico de un motor
diésel ligero ensayado en tráfico real. (Fonseca et
al, 2011b)**

INFLUENCIA DEL CONTENIDO DE BIODIESEL EN GASÓLEO EN EL RENDIMIENTO TÉRMICO DE UN MOTOR DIESEL LIGERO ENSAYADO EN TRÁFICO REAL.

FONSECA GONZÁLEZ, Natalia, CASANOVA KINDELÁN, Jesús⁽¹⁾

BETANCOURT ASTETE, Robinson⁽²⁾

nfonseca@etsii.upm.es

⁽¹⁾Universidad Politécnica de Madrid, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica

⁽²⁾Universidad de la Frontera (Temuco, Chile), Departamento de Ingeniería Mecánica.

RESUMEN

La utilización de biocombustibles derivados de aceites vegetales es una opción válida para contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ y extender la vida de los combustibles convencionales. El biodiésel (mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos) mezclado con gasóleo en motores diesel es una opción ya conocida, pero el análisis del comportamiento del motor en un vehículo ligero en tráfico real es aun un tema poco investigado.

El objeto de esta ponencia es presentar la metodología de ensayo y los resultados obtenidos en un trabajo de investigación sobre el efecto que la variación del porcentaje de biodiesel en gasóleo tiene en las prestaciones del motor y su rendimiento térmico en tráfico urbano real. Las medidas se han realizado con equipos embarcados en un vehículo y utilizando el biodiesel producido en la Universidad de la Frontera en Temuco (Chile) mezclado en proporciones diferentes con gasóleo suministrado por Repsolypf, S.A., caracterizado en laboratorio.

Los ensayos se han realizado en la ciudad de Madrid con un SEAT León TDI 2.0 con un solo conductor y aplicado dos estilos de conducción diferentes: agresiva y eficiente, caracterizadas según trabajos anteriores.

Los resultados obtenidos en consumo de combustible no son los que cabía esperar en base al poder calorífico y la densidad de la mezcla, y no siguen los obtenidos en otras investigaciones realizadas en banco de pruebas. Para explicar esta discrepancia se aportan los resultados de un estudio de la energía aportada por el motor en cada instante seguido de una análisis estadístico de todo el volumen de datos obtenidos para presentar los resultados en una nueva forma que muestra cómo la potencia demandada en el vehículo es menor y el rendimiento térmico del motor diesel mejora al aumentar el porcentaje de biodiesel.

Palabras clave: Emisiones, Biodiésel, Tráfico Real.

1. Introducción.

La utilización de biocombustibles derivados de aceites vegetales es una opción válida para contribuir a la reducción de emisiones de CO₂ y extender la vida de los combustibles convencionales. El biodiesel (éster metílico de ácidos grasos) mezclado con gasóleo en motores diesel es una opción ya conocida, pero el análisis del comportamiento del motor en un vehículo ligero en tráfico real es aun un tema poco investigado.

En Temuco (Chile) esta preocupación ha movilizado recursos para desarrollar un procedimiento de obtención de ésteres metílicos de aceite de colza (raps) cultivado en la región. El Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad de La Frontera, apoyado por un proyecto de investigación de FONDEF en Chile, viene desarrollando desde el año 2004 una metodología de fabricación de ésteres metílicos de aceite de Brassica Napus, cuyos detalles pueden verse en las referencias [1] y [2].

En el laboratorio de Motores Térmicos de la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de la Universidad Politécnica de Madrid se ha desarrollado un equipo de medida portátil y una metodología de ensayo para medir emisiones contaminantes (CO, HC, NO_x y partículas) y CO₂ en tiempo real como parte de un proyecto de Investigación Aplicada financiado por el Ministerio de Medio Ambiente, cuyos detalles pueden verse en la referencia [3].

Como consecuencia de ambos trabajos se planteó un trabajo experimental para determinar las emisiones y el consumo de un vehículo ligero turbodiesel en tráfico real en la ciudad de Madrid utilizando como combustible el biodiésel producido en Chile, que fue financiado en parte por la UPM como proyecto de colaboración con América Latina.

Existe mucha información técnica publicada sobre emisiones y consumo de motores diesel alimentados con mezclas de gasóleo y biodiésel en porcentaje diferentes que se refieren a ensayos en banco de pruebas como los presentados por Casanova [4] y Lapuerta [5] y a ensayos de vehículos ligeros en banco de rodillos siguiendo un ciclo NEDC como los que se presentan en los trabajos de Luján [6], Kawano [7] y Kenneth [8]. Este tipo de ensayos las condiciones de potencia y régimen de giro del motor vienen definidas en el protocolo de las pruebas, por lo que no pueden reproducir las modificaciones que se produzcan en la respuesta del motor ante transitorios de carga y régimen de giro o en su conductibilidad. Son útiles para entender el efecto de la mezcla de ésteres metílicos de ácidos grasos con gasóleo en los fenómenos de combustión, formación de emisiones y postratamiento de gases, pero no reproducen la realidad del comportamiento del motor y del conductor cuando opera el vehículo con un combustible diferente al original. Las mezclas de gasóleo con biodiésel tienen mayor densidad y viscosidad que el gasóleo original y su poder calorífico es menor a medida que aumenta el porcentaje de biodiésel en la mezcla.

El reciente desarrollo de las metodologías de medida de emisiones en tráfico real con equipos embarcados, planteadas inicialmente para ensayos de certificación y de comprobación de emisiones en motores de vehículos pesados, ha permitido ampliar el tipo de ensayos e investigar el comportamiento real de los motores cuando operan en condiciones de tráfico urbano real, como los trabajos de Fontaras [9] y Senda [10]. En estas condiciones el motor trabaja parte de su tiempo en condiciones de muy bajo grado de carga y de régimen de giro, incluido los periodos de ralentí, lo que reduce la temperatura de los gases de escape y como consecuencia la eficiencia de los sistemas de postratamiento. Un alto porcentaje del tiempo está en condiciones transitorias de carga y régimen de giro, y parte del mismo con temperatura de la cámara de combustión y del aceite lubricante por debajo de las normales. Además, como se concluye de los trabajos de Fonseca [11], el estilo de conducción es una variable significativa en los valores reales de emisiones y consumo de los motores diesel en utilización real, por lo que debe ser tenida en cuenta.

Por todo ello, el objeto de esta ponencia es presentar la metodología de ensayo y los resultados obtenidos experimentalmente sobre el efecto que la variación del porcentaje de biodiesel en mezcla

con gasóleo tiene en las prestaciones y en el rendimiento térmico de un motor de combustión interna turbodiesel en tráfico urbano real. Las prestaciones se han determinado en base al registro instantáneo de variables dinámicas del vehículo y del motor, y el rendimiento en base al cálculo del consumo de combustible en cada momento en función de las emisiones instantáneas medidas de CO, CO₂ y HC en el escape, conociendo la fórmula química real del combustible (gasóleo y biodiésel).

Las medidas se han realizado con equipos embarcados en un vehículo y utilizando el biodiésel producido en la Universidad de la Frontera en Temuco (Chile) mezclado en proporciones diferentes con gasóleo suministrado por Repsolypf, S.A., caracterizado previamente en laboratorio.

Los ensayos se han realizado en la ciudad de Madrid con un SEAT León TDI 2.0 con un solo conductor y aplicado dos estilos de conducción diferentes: agresiva y eficiente, caracterizadas según los trabajos de Fonseca [11].

2. Metodología.

A continuación se presentan los detalles de las medidas realizadas, el vehículo y los combustibles utilizados, y la instrumentación y los protocolos de los ensayos.

Figura 1. Esquema de los equipos que componen el sistema MIVECO – PEMS y foto del sistema en el vehículo

2.1. Medida de emisiones a bordo.

Para este trabajo se ha utilizado el sistema de medida de emisiones y variables de funcionamiento del vehículo y del entorno MIVECO-PEMS desarrollado por los autores. La figura 1 muestra el esquema de los sub-sistemas que componen el equipo completo y una fotografía del equipo instalado en el vehículo. El conjunto de equipos y, principalmente, la parte del mismo que va instalada en la parte externa del vehículo, han sido certificados por el INSIA en cuanto a la seguridad vial como carga especial para su utilización en tráfico real para labores de investigación.

El conjunto de equipos MIVECO –PEMS consta de las siguientes partes:

- **Conjunto de analizadores de gases** que se compone de los equipos de análisis químico de concentraciones de CO, CO₂, HC (en caliente), NO_x y partículas. En el conjunto se incorpora el sistema de desecación de gases para la medida de CO y CO₂ y el control de temperatura de la línea calefactada.
- **Sistema de toma de muestras y caudalímetro**, que consta de un tubo con un medidor de caudal tipo tubo de Pitot, los sensores de NO_x para motores diésel, de oxígeno y de dosado, así como un termopar y las tomas de muestras fría y calefactada. El caudal se mide por la presión diferencial con un tubo de pitot modificado y la presión absoluta en el tubo de muestreo según se explica en la referencia [12].
- **Sistema de alimentación eléctrica** por baterías e inversores de 12 V CC a 220 V CA, independiente del sistema eléctrico del vehículo.
- **Sistema de sensores del vehículo** con estación meteorológica (presión, temperatura y velocidad de viento frontal), sensores de régimen de giro del motor, sistema GPS para medir posición y velocidad, y un medidor de velocidad por sistema radar doppler. La pendiente de la vía se determina por la presión atmosférica.
- **Sistema de medida y registro de variables**, que consta de una caja de conexiones y adaptación de señales y un ordenador portátil con el programa de registro realizado en lenguaje Labview®. Para la adquisición de datos se ha usado una tarjeta National Instruments modelo USB6211 conectada a un ordenador portátil.

Los datos se almacenan a una frecuencia de 0,1 Hz. El caudal de gases de escape es muy pulsante, por lo que es necesario medirlo a la frecuencia de 1 kHz, pero solo se archiva el valor medio de la décima de segundo anterior. Los datos de los equipos de análisis de gases y el caudalímetro deben tratarse por un procedimiento de tratamiento de señales posterior que se basa en una sincronización y deconvolución de las señales registradas en un proceso de postratamiento.

Cada uno de los analizadores y componentes del sistema de análisis de gases tienen salidas de tipo analógico, las cuales son recogidas usando una tarjeta de adquisición de datos integrada a un portátil que se lleva embarcado. Para esto, se desarrolló un programa sobre LabView® que permite visualizar en tiempo real la concentración de los diferentes gases medidos y el caudal instantáneo, así como almacenar en continuo las diferentes señales.

Como post-procesamiento, se realiza una sincronización de las diferentes señales, la corrección de la concentración de CO y CO₂ por tipo de medida, el cálculo de las emisiones instantáneas, cálculo de emisiones totales y factores de emisión.

Como el equipo MIVECO-PEMS de medida de CO y CO₂ requiere que el gas a medir esté a una temperatura inferior a 50°C y libre de humedad, los gases de escape se acondicionan antes de entrar al equipo de análisis de gases pasando por un enfriador y un decantador y un filtro que retiene toda la humedad, concentración en mezcla seca. La concentración real (concentración en mezcla húmeda) se

calcula con base a la estequiometría de la reacción química, teniendo en cuenta la proporción de C, H y O de la formula real del combustible en sus diferentes mezclas gasóleo + biodiésel.

Para calcular las emisiones másicas instantáneas se necesita el peso molecular de los diferentes gases, M_x . Las ecuaciones utilizadas para calcular las emisiones másicas instantáneas (denotadas de forma genérica como x) del CO, CO₂, NO_x, HC y O₂ con base en la concentración medida en % vol o en ppm son las siguientes:

$$\dot{m}_x \left[\frac{g}{s} \right] = \frac{\%x}{100} \left[\frac{m^3_x}{m^3_{esc}} \right] * \dot{q} \left[\frac{m^3_{esc}}{s} \right] * \frac{p_e}{RT} \left[\frac{mol}{m^3_x} \right] * M_x \left[\frac{g_x}{mol_x} \right] \quad (1)$$

$$\dot{m}_x \left[\frac{g}{s} \right] = \frac{ppm_x}{10^6} \left[\frac{m^3_x}{m^3_{esc}} \right] * \dot{q} \left[\frac{m^3_{esc}}{s} \right] * \frac{p_e}{RT} \left[\frac{mol}{m^3_x} \right] * M_x \left[\frac{g_x}{mol_x} \right] \quad (2)$$

El consumo de combustible se calcula instantáneamente en base al método de balance de carbonos, que puede verse en Heywood [13], utilizando los datos de concentraciones instantáneas de emisiones de CO, CO₂ y HC, considerando despreciables las de partículas para este cálculo.

El consumo por unidad de tiempo promediado se divide por la velocidad media en km/h para obtener el factor de consumo en kg/km o en l/100 km.

2.2. Vehículo de ensayo.

Las características del vehículo se muestran en la tabla 1 y la figura 2 unas fotos del mismo.

Tabla 1: Datos del vehículo de ensayo.

Marca	SEAT	Denominación comercial	Leon
Tipo de motor	Diésel	Cilindrada (cm ³)	1.968
Alimentación	Turbo + postenfriado	Sistema de inyección	Inyector unitario
Normativa emisiones	EU4	Filtro de partículas	No
Año de matriculación	2008	Caja de cambios	Manual (6)
Tara (kg)	1.315	Potencia (kW)	103
Km antes de ensayos	17.962	Número relaciones	6

2.3. Combustibles.

Para estos ensayos se ha utilizado gasóleo comercial para automoción Repsol e+ (10 ppm de S), adquirido en la estación de servicio. Se midió su análisis elemental, necesario para establecer el dosado estequiométrico, su Poder Calorífico Inferior y su densidad. Además, para poder controlar el porcentaje de biodiésel en la mezcla con gasóleo con precisión, fue necesario saber el porcentaje de biodiésel que el gasóleo comercial adquirido tenía, pues según la norma actualmente vigente (EN590) puede contener hasta un 5% (vol).

El biodiésel fue obtenido en la planta piloto de producción en la finca Molino Gorbea en Temuco (Chile) por el método desarrollado en la Universidad de la Frontera. Se midieron las siguientes propiedades del mismo: análisis elemental, Poder Calorífico Inferior, contenido en monoglicéridos, diglicéridos, triglicéridos, glicerina libre y glicerina total, contenido en agua y contenido en ésteres.

Figura 2. Detalle de la adquisición de datos y vista del vehículo utilizado en los ensayos.

Las tablas 2 y 3 muestran los resultados del análisis elemental, de poder calorífico y de densidad y la tabla 4 los datos y denominación de las mezclas ensayadas.

Tabla 2: Análisis elemental de los combustibles.

Análisis Elemental	Biodiésel Chile	Gasóleo comercial
% (m/m) C	76,35	84,03
% (m/m) H	13,41	14,56
% (m/m) N	0	0,27
% (m/m) S	0	0,00486
% (m/m) O	10,24	1,13514
C	1,0	1,0
H	2,109	2,081
O	0,10074	0,01015

Tabla 3: Poder calorífico y densidad de los combustibles.

	kJ/kg	Densidad	kJ/dm ³
Gasóleo	42753,0	841,8	35987,8
Biodiésel	37388,0	880,4	32917,5

Tabla 4: Poder calorífico y densidad de los combustibles de las mezclas de ensayo.

Denominación	% biodiésel medido	% biodiésel Chile	% gasóleo comercial	Densidad mezcla (kg/m ³)	PCI (kJ/kg)
B0	3,85	0,00	100,00	841,8	42.824,6
B10	11,30	7,75	92,25	844,8	42.390,4
B30	31,30	28,55	71,45	852,9	41.240,0
B50 (29/09)	42,50	40,20	59,80	857,5	40.605,4
B50 (10/10)	51,70	49,77	50,23	861,3	40.089,1
B100	98,75	98,70	1,30	880,4	37.517,4

El cambio de combustible se realizó siguiendo un protocolo preciso para asegurar el completo vaciado del tanque, de la línea y del filtro de combustible y de la bomba de inyección de la mezcla anterior antes de cargar la nueva. En todo caso siempre se conservó una muestra de la mezcla real ensayada para posteriormente determinar con precisión el porcentaje real usado en cada tanda de medidas

2.4. Circuitos urbanos.

En base a las experiencias anteriores en medidas con equipos embarcados, referencia [11], se seleccionaron y caracterizaron dos recorridos urbanos en la ciudad de Madrid. Cada circuito se caracterizó en pendientes mediante el análisis de planos geográficos y de medidas in situ con una combinación de un sistema GPS y de la medida de la presión atmosférica instantánea. Cada circuito se subdividió en zonas con diferentes tipos de calles, número de carriles, distancia, pendientes positivas o negativas, número de cruces y de semáforos y flujo medio diario de vehículos. Debido a la aleatoriedad del tráfico real, se realizaron varias pasadas por cada recorrido y con cada mezcla para asegurar la consistencia estadística.

3. Resultados obtenidos

Debido al menor poder calorífico (en kJ/kg) del biodiésel frente al gasóleo – por su contenido en oxígeno en la molécula del éster metílico – y por su mayor densidad, las mezclas con mayor contenido en biodiésel tiene menor poder energía por litro. Por ello, es esperable que el consumo de combustible medido en litros por 100 kilómetros (L/100km) aumente al aumentar el porcentaje de biodiésel. Pero el consumo de combustible en L/100km ya se ha demostrado en la referencia [11] que depende significativamente de la velocidad media en tráfico urbano, menores velocidades medias van asociadas con mayor número de paradas por kilómetro y mayores aceleraciones positivas, es decir mayor cantidad de energía utilizada en un recorrido dado.

Del conjunto de todos los ensayos realizados con el SEAT León desde gasóleo puro hasta biodiésel puro, se ha podido constatar este efecto inverso de la velocidad media en el consumo, como se ve en las gráficas de la figura 3. En esta figura se ha representado, también, otra forma de ver este resultado: valor de la “eficiencia global positiva”. Este término, utilizado en este trabajo por primera vez, se refiere al cociente entre la potencia que se ha utilizado en propulsar el vehículo, pero sumando solo los valores que son positivos, pues los negativos son debidos al efecto de resistencias y frenado, que no puede recuperarse, y la potencia aportada por el combustible inyectado en los cilindros del motor. El

primer valor se calcula en cada instante a partir de la dinámica del vehículo en base a conocer su peso, su resistencia a la rodadura, los datos aerodinámicos, el viento frontal, la pendiente de la calle, la velocidad y valor instantáneo de la aceleración calculado de la velocidad instantánea. El segundo valor se calcula en cada instante a partir del consumo instantáneo calculado de los datos medidos y con el poder calorífico de la mezcla que en cada caso se esté usando. Se observa que esta eficiencia aumenta al aumenta la velocidad media.

Figura 3. Consumo de combustible y eficiencia global positiva del conjunto de ensayos con mezclas de biodiésel

La gráfica de la figura 4 muestra el consumo de combustible promediado para el conjunto de todos los recorridos y pasadas con cada porcentaje de biodiésel. En función del porcentaje de biodiésel (desde B0: gasóleo puro, hasta B100: biodiésel puro). Se observa que la tendencia no es la que se podría esperar y que se ha obtenido por otros investigadores en ensayos en banco de rodillos siguiendo ciclo MVEG, por ejemplo los presentados en la referencia [9]: un aumento sostenido del consumo con el porcentaje de biodiésel.

Figura 4. Consumo de combustible en función del porcentaje de biodiésel.

Aunque no es el objeto de esta comunicación, también se midieron las emisiones contaminantes y los resultados se presentan en la figura 5, pudiendo observarse también una tendencia diferente a lo que hubiera sido esperado.

Figura 5. Emisiones en función del porcentaje de biodiésel

4. Discusión de los resultados.

Para entender mejor las razones de esta discrepancia se estudió en mayor detalle la dinámica de la conducción para cada recorrido y cada mezcla. Las gráficas de las figuras 6 (a) y 6 (b) muestran el régimen medio de revoluciones del motor y la aceleración media durante los ensayos.

Figura 6. Régimen de giro medio del motor (a) y aceleración media positiva del vehículo (b) obtenido en los ensayos en función del porcentaje de biodiésel.

Se observa algo inesperado: al aumentar el porcentaje de biodiésel en la mezcla el conductor, a pesar de tener la intención de usar el mismo estilo de conducción, tiene la tendencia a utilizar regímenes de giro del motor menores y menores aceleraciones positivas. Esto solo puede ser debido a que la variación de las características del combustible (mayor densidad y viscosidad) modifica el reglaje y la respuesta del motor ante la demanda de par del conductor, y éste tiende a conducir de forma diferente. El conductor efectivamente era consciente de que el motor “tiraba menos” y “era como más perezoso”, en sus propias palabras. Efectivamente, se observa en la figura 7 (a), obtenida de la dinámica de movimiento del vehículo, que la energía consumida en tracción del vehículo por km era menor al aumentar el porcentaje de biodiésel, pero el conductor tenía la intención de conducir con la misma

pauta y el mismo estilo. La figura 7 (b), calculada a partir del consumo medido y del poder calorífico de cada mezcla, aclara que la energía aportada por km ha descendido al aumentar el porcentaje de biodiésel,

Figura 7. Energía utilizada en tracción (a) y energía térmica aportada por el combustible (b) en función del porcentaje de biodiésel.

Con los valores anteriores se puede calcular la eficiencia global de la conducción al aumentar el porcentaje de biodiésel, y en la figura 8 se observa claramente su tendencia creciente. Esta tendencia, que de mejora del rendimiento ya fue observada por Casanova [4] en ensayos en banco de pruebas, y puede ser debida no solo a lo comentado anteriormente sobre menores aceleraciones, sino también a algún tipo de mejora en los procesos de inyección y combustión en el motor al modificar por la presencia de oxígeno en la formulación del combustible. Pero esto debe ser estudiado en mayor profundidad.

Figura 8. Eficiencia global de la conducción en función del porcentaje de biodiésel.

En todo caso, esto aporta alguna luz a por qué el consumo no aumenta en el porcentaje en que disminuye el poder calorífico de la mezcla gasóleo – biodiésel. Sin embargo, como cabría esperar las emisiones de CO₂ en utilización (del tanque a la rueda) no siguen exactamente la tendencia del consumo, figura 9 y su tendencia es la que cabría esperar porque la emisión específica de CO₂ por litro de combustible es mayor al aumentar el contenido en oxígeno de las mezclas con más biodiésel.

Figura 8. Emisiones de CO₂ en función del porcentaje de biodiésel.

5. Conclusiones y consideraciones finales

Con este trabajo se ha tratado por una parte confirmar la aplicabilidad del biodiésel desarrollado en la Universidad de Temuco (Chile) y por otra determinar la realidad de la tendencia del consumo de combustible en motor turbo-diésel modernos alimentados con mezclas diferentes de de gasóleo y biodiésel. El elevado número de ensayos realizados, el estudio de la dinámica del comportamiento del vehículo y del motor y el cuidado puesto en la determinación de las propiedades del combustible, aseguran la validez de los resultados.

Los resultados obtenidos son en principio algo sorprendentes por las tendencias del consumo con el porcentaje de biodiésel, que no es continuamente creciente como se hubiera predicho. El estudio realizado, analizando la potencia realmente utilizada del motor diésel y la eficiencia térmica del conjunto moto-propulsor, ha permitido explicar dicha tendencia.

Por ello se puede afirmar que en motores diesel con sistemas de inyección tipo *inyector unitario* con control electrónico avanzado, la modificación de las propiedades del combustible al aumentar el porcentaje de biodiésel en la mezcla contribuyen a cambiar la repuesta del motor ante las solicitudes del conductor y a reducir la potencia utilizada en la tracción a pesar de la intención del conductor de mantener una mismo estilo de conducción. Será necesario realizar estos ensayos en otros motores, sobre todo en aquellos dotados de sistemas de inyección tipo common rail. Por otra parte, no puede descartarse que en pruebas de más larga duración, algún tipo de auto-adaptación de los algoritmos de control electrónico de la inyección, del sistema de recirculación de gases de escape y del turbo da paso variable, podrían haber llevado a modificaciones no sustanciales de estos resultados.

6. Agradecimientos

Los autores agradecen especialmente a Víctor Pozo Arroyo su contribución a la realización de los ensayos y el tratamiento posterior de los datos. El biodiesel fue fabricado en Chile con la subvención del proyecto FONDEF D05/10391. Este trabajo se ha podido realizar por el apoyo para la realización de Actividades con Latinoamérica de la UPM (código AL07-PAC-017). Los equipos de medida se desarrollaron como parte del proyecto MIVECO financiado por el M° de Medio Ambiente (referencia MMA 071/2006/3-13.2). El vehículo fue cedido para estos ensayos por Castellana Motor, concesionario de SEAT en Madrid.

7. Referencias

- [1] BETANCOURT, R., CASANOVA, J., NAVIA, R., HIDALGO, P., ANTILEO, C., CURAQUEO, C. y AZOCAR, L. "Elaboración de biodiesel a partir de brassica napus". *IV Congreso Nacional y I Congreso Ibérico de Agroingeniería (Albacete, Septiembre 2007)*.
- [2] BETANCOURT, R., CASANOVA, J., y FARIAS, O. "Estudio Teórico Experimental de la Utilización de Esteres Metílicos de Brassicas Napus como Combustible" En *Actas del I Congreso Latinoamericano Biorrefinerías (Concepción, Chile, noviembre 2006)*.
- [3] FONSECA, J. y CASANOVA, J. "Problemas asociados a la medida de emisiones másicas instantáneas en motores de vehículos" En *Actas de las I Jornadas Técnicas. Ensayos de Emisiones con Equipos Embarcados (Pamplona, noviembre 2010)*.
- [4] CASANOVA, J. y BARRIOS, C. "Análisis experimental de la influencia del porcentaje de éster metílico de aceite de girasol en mezcla con gasóleo sobre el ciclo termodinámico de un motor diesel" En *Actas de las VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica (Córdoba, junio 2009)*. Universidad de Córdoba.
- [5] LAPUERTA, M., ARMAS, O. y RODRÍGUEZ-FERNÁNDEZ, J. *Effect of biodiesel fuels on diésel engine emissions*. Progress in Energy and Combustion Science 2008, vol. 34, número 2, pp.198-223.
- [6] LUJAN, J.M., BERMÚDEZ, V., TORMOS, B. y PLA, B. *Comparative analysis of a DI diesel engine fuelled with biodiesel blends during the European MVEG-A cycle. Performance and emissions (II)*. Biomass and Bioenergy 2009 Vol. 33, pp. 948-956.
- [7] KAWANO, D., ISHII, H. y GOTO, Y. *Effect of Biodiésel Blending on Emission Characteristics of Modern Diésel Engine*. SAE Technical Paper 2008-01-2384.
- [8] KENNETH, D. R. y otros. *Impact of Biodiesel Blends on Fuel Consumption and Emissions in Euro 4 Compliant Vehicles*. SAE Technical Paper 2010-01-1484.
- [9] FONTARAS, G. y otros *Effects of biodiésel on passenger car fuel consumption, regulated and non-regulated pollutant emissions over legislated and real-world driving cycles*". Fuel 2009, vol 88, número 9, pp.1608-1617.
- [10] SENDA, J., OKUI, N., TSUKAMOYO, T. y FUJIMOTO, H. *On-Board Measurement of Engine Performance and Emissions in Diésel Vehicle Operated with Bio-diésel Fuel* SAE Technical Paper 2004-01-0083, 2004.
- [11] FONSECA, CASANOVA, J y ESPINOSA, F. "Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car". En *Proceedings of the 18th International Symposium Transport and Air Pollution (Zurich, junio 2010)* EMPA, Universidad Técnica de Zurich.
- [12] FONSECA, J. y CASANOVA, J. "Desarrollo de una metodología de ensayo de emisiones en tráfico real. Aplicación al estudio del estilo de conducción" En *Actas de las VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica (Córdoba, junio 2009)*. Universidad de Córdoba
- [13] HEYWOOD, J.B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. McGraw Hill. 1988.

**A.5 Environmental assessment of low speed
policies for motor vehicle mobility in city
centres. (Casanova y Fonseca, 2012)**

ENVIRONMENTAL ASSESSMENT OF LOW SPEED POLICIES FOR MOTOR VEHICLE MOBILITY IN CITY CENTRES

J. CASANOVA^{1,*}
N. FONSECA²

¹*Department of Energy and Fluid Mechanical Engineering
Universidad Politécnica de Madrid*
²*Department of Energy Systems
Universidad Politécnica de Madrid*

Received: 16/12/11
Accepted: 09/03/12

*to whom all correspondence should be addressed:
e-mail: jesus.casanova@upm.es

ABSTRACT

In order to assess the influence of reducing the speed limit from 50 km h⁻¹ to 30 km h⁻¹ in one-lane streets in local residential areas in large cities, real traffic tests for pollutant emissions and fuel consumption have been carried out in Madrid city centre. Emission concentration and car activity were simultaneously measured by a Portable Emissions Measurement System. Real life tests carried out at different times and on different days were performed with a turbo-diesel engine light vehicle equipped with an oxidizer catalyst and using different driving styles with a previously trained driver.

The results show that by reducing the speed limit from 50 km h⁻¹ to 30 km h⁻¹, using a normal driving style, the time taken for a given trip does not increase, but fuel consumption and NO_x, CO and PM emissions are clearly reduced. Therefore, the main conclusion of this work is that reducing the speed limit in some narrow streets in residential and commercial areas or in a city not only increases pedestrian safety, but also contributes to reducing the environmental impact of motor vehicles and reducing fuel consumption. In addition, there is also a reduction in the greenhouse gas emissions resulting from the combustion of the fuel.

KEYWORDS: pollutant emissions, fuel consumption, motor vehicle, urban traffic calming.

INTRODUCTION

In order to increase pedestrian safety levels, in many urban residential zones of European cities, the speed of road motor vehicles has been limited to 30 km h⁻¹ in narrow, local one-lane streets. Area-wide urban traffic calming schemes are to be implemented in many other residential zones to reduce the safety problems caused by road traffic. (Elvik 2001) reported a 25 % reduction in injury accidents when traffic is calmed but similar conclusions can be drawn for 30 km h⁻¹ urban zones because at collision speeds below 30 km h⁻¹, encounters between motor vehicles and pedestrians do not usually result in a fatality.

But it is of great interest for urban authorities to assess whether such speed limits also have a positive effect on the environmental impacts of urban traffic and on transport energy consumption (as well as CO₂ emissions). The answer to such a question is not as obvious as might be thought, because the engine operating conditions at such low speeds might not be the best for low pollutant emissions and for fuel efficiency, and also the time spent in an urban journey might be increased.

This paper presents some experimental results regarding the expected changes to light diesel vehicle exhaust pollutant emissions and fuel consumption when the speed limit is reduced from 50 km h⁻¹ to 30 km h⁻¹ in some narrow urban streets, but not in other arterial or collector streets of the same district, with more than one lane.

It is well known that motor vehicle exhaust emissions (CO, HC, NO_x and PM) are a significant source of urban air pollutants, and that this pollution is the cause of various health problems for citizens and of other environmental impacts.

In Europe, all light vehicles have to fulfil restrictive emissions limits that are certified by tests carried out in chassis dynamometers, in which the vehicle is driven following an NEDC (New European Driving Cycle) driving pattern comprising an urban cycle with 50 km h⁻¹ as maximum speed and an extra-urban cycle with 120 km h⁻¹ as the maximum speed. Although in the certification test there are speeds as slow as 30 km h⁻¹, the emissions and fuel consumption at such speeds are not recorded on their own. Several research studies on vehicle emissions carried out in real life urban traffic conditions have shown that real emissions are quite different from certified emissions for a given car (Lenaers, 1996; Pelkmans, 2006) and that this issue is much more important in the case of slow speeds.

The speed, the acceleration and the street slope significantly affect the fuel economy and the pollutant emissions of a vehicle during a trip through the city (Daham *et al.*, 2005, Li *et al.*, 2006, Li *et al.*, 2007; Li *et al.*, 2010). The power used, the transitory condition and the rotational speed of the engine at each instant result in the instantaneous fuel consumption and emissions of each pollutant during a given trip. During a complete trip through a city, the resulting total mass of pollutants emitted and the fuel consumed is not only a consequence of the average speed and acceleration, but also of the instantaneous engine conditions, which is a function of the driving style (De Vlieger 2000). It is expected that by reducing the maximum speed in some streets of a city, both the average speed and accelerations will also be reduced. But it could be the case that the operating point of the engine when the speed is very low could be a low efficiency point or a high emission point. It should be noted that some correlations of fuel consumption with average speed, regarding fuel consumption and emissions inventories, show an increase in both emissions and fuel consumption factors when the average speed is reduced in the range that occurs in urban areas (less than 40 km h⁻¹) (Fonseca *et al.*, 2010). This trend cannot be applied to the case to be studied, because it is related to similar speed limitations and to speed reductions that are mainly due to traffic conditions and to more intersections and stops per kilometre. However, this is not the case when dealing with different speed limitations and the same number of intersections and stop lights.

In order to assess the influence of reducing the speed limit from 50 to 30 km h⁻¹ in one-lane streets in local residential zones of a large city, emissions and fuel consumption have been measured in real traffic tests following a representative route along the narrow streets of a typical central district of Madrid. In such a district, there are both one-lane streets that are likely to be included in 30 km h⁻¹ zones and arterial streets with more than one lane.

It might be thought that less speed implies more time driving the car and consequently more time with the engine running, which could lead to more pollutants emitted into the atmosphere and more fuel consumed; however, this is not the case. A lower maximum speed is only expected to slightly change the average speed but not the acceleration values and acceleration time, which are expected to be the main periods with high values of fuel consumed and pollutants emitted. So, one of the aims of this work was to assess this predicted behaviour.

Therefore, this paper presents the results obtained with a light duty diesel vehicle that is representative of common medium size passenger cars in Europe, when travelling through the above-mentioned urban zones. A new car was not used because the purpose of the tests was to collect data on real-life cars circulating in European cities.

An on-board Portable Emissions Measurement System developed and validated in various tests by the authors for light duty cars (Fonseca and Casanova, 2009), was the main instrument used in this research to measure fuel consumption, car activity and environmental parameters instantaneously in real traffic emission conditions.

It has been demonstrated (Vlieger, 1997; Vlieger *et al.*, 2000, Casanova *et al.*, 2005, Fonseca *et al.*, 2010) that driving style very much affects pollutant emissions and fuel economy in urban driving conditions. The way the gear box is used and the way the accelerator pedal is pressed are the main parameters that the driver can modify in their driving style (Saboochi and Farzaneh, 2009). Ecodriving (Takada *et al.*, 2007) is a well accepted style to increase driving efficiency, but on the other hand, aggressive behaviours leads to high fuel consumption. But the influence of driving style on emissions is not as clear as for fuel economy (Casanova *et al.*, 2009). For this research, three driving styles have been used by only one expert driver. The tendencies of the results obtained could be extended to similar car or street configurations and drivers.

EXPERIMENTAL ASPECTS

On-board instrumentation

The Portable Emissions Measurement System (PEMS), called MIVECO-PEMS 2.0, used in these tests is a combination of different exhaust gas analyzers, measuring systems for thermodynamic variables and meteorological and car parameters as well as recording and energy supply systems. It comprises the following parts:

- Sampling tube and exhaust flow-meter, which includes a Pitot type flow-meter specially designed for hot and wet exhaust gases, with NO_x and O₂ chemical cells and absolute pressure and temperature sensors.
- A frame containing a CO and CO₂ NDIR (Non Dispersive Infrared) analyzer, heated HC FID (Flame Ionization Detector) analyzer, a laser spectrometry mass PM analyzer and all the amplifiers and electronic units. It also includes the vacuum pumps and a gas cooling Peltier unit. (Fonseca and Casanova, 2009).
- A system for recording the temperature, the pressure and speed of the surrounding air.

The measurement system was powered by two lead acid batteries. A laptop was used to control and record the different instruments. Figure 1 shows a scheme of the on-board instrumentation.

Figure 1. Portable emissions and car activity measurement system for on-board measurements

The recorded signals are post-processed to obtain instantaneous and averaged results of the emission factors (g km⁻¹) and fuel consumption in litres per 100 km.

In order to calculate the instantaneous pollutant at the instant “i” mass flow emission ($\dot{m}_{j,i}$) for each pollutant, Eq. 1 was used:

$$\dot{m}_{j,i} [\text{g/s}] = \chi_{j,i} \left[\frac{\text{ppm} V_i}{10^6} \right] \cdot \dot{m}_{E,i} [\text{g/s}] \cdot \frac{M_j}{M_E} \left[\frac{\text{g/mol}_j}{\text{g/mol}_E} \right] \quad (1)$$

where $\chi_{j,i}$ is the instantaneous molar fraction of pollutant “j”. $\dot{m}_{E,i}$ is the instantaneous exhaust mass flow calculated as the instantaneous exhaust volume flow (measured by the Pitot type flow-meter) multiplied by instantaneous exhaust gas density. M_j and M_E are the pollutant “j” and exhaust gas molar mass respectively. The fuel used was commercial diesel-oil following the European Standard EN 590. It contained almost 4 % of biodiesel. The fuel consumption was computed from the instantaneous lambda factor (λ_i) measured directly on exhaust flow and using the CHO formulae of the fuel submitted by the oil supply company (REPSOL, S.A.). Due to the fact that the tests were always made in hot engine conditions the uncertainties of this procedure are small. Nevertheless, in previous chassis dynamometer tests, performed with the MIVECO-PEMS system, the results of the instantaneous fuel consumption obtained with this procedure were checked in steady state conditions with the fuel consumption computed from the CO₂, CO and HC measured emissions, with

an excellent correlation being obtained. Eq. 2 was used to calculate the instantaneous fuel mass flow ($\dot{m}_{F,i}$), where $(A/F)_{EST}$ is the stoichiometric air fuel ratio.

$$\dot{m}_{F,i} = \frac{\dot{m}_{E,i}}{1 + \lambda_i * \left(\frac{A}{F}\right)_{EST}} \left[\frac{g}{s} \right] \quad (2)$$

Global emissions and fuel consumption factors (EF_j and FCF respectively) were calculated by dividing the total mass amount of each pollutant or the mass of fuel consumed by the total distance travelled in each sector of the route and for each trial, as shown in Equations 3 and 4:

$$EF_j [g/km] = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{m}_{j,i} [g/s] \cdot \Delta t [s]}{\sum_{i=1}^N v_i [km/h] \cdot \Delta t [s]} \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right] \quad (3)$$

$$FCF [l/100 \cdot km] = \frac{\sum_{i=1}^N \dot{m}_{F,i} [g/s] \cdot \Delta t [s]}{\sum_{i=1}^N v_i [km/h] \cdot \Delta t [s]} \cdot \frac{100}{\rho_F [g/l]} \cdot 3600 \left[\frac{s}{h} \right] \quad (4)$$

Where v_i is the instantaneous car speed, Δt is the sample time used for data register, N is the number of instantaneous data sampled in each trial and ρ_F is the fuel density.

Vehicle and driver

A light duty passenger car (Peugeot 406 2.0 HDI Break) was used for these tests. The main characteristics are shown in Table 1.

Table 1. Characteristics of the car used in the tests

Engine Type	4 cylinder Intercooler	turbodiesel	Max. Power	81 kW (4000 r min ⁻¹)
Displacement	1997 cm ³		Max. Torque	250 Nm (1900 r min ⁻¹)
After-treatment	Diesel oxidation Catalyst		Weight	1485 kg

Obviously it was a used car, but the engine and the entire car were completely checked before the tests. Although it fulfilled the Euro 2 emissions limits, the technology used in this car to reduce pollutant emissions was similar to that used in most Euro 4 passenger cars, with a DOC (Diesel Oxidation Catalyst) and not a Diesel Particle Filter, which is the most widespread technology nowadays.

The vehicle driver was the same in all the tests, a normal driver who had held a driving licence for over 10 years. He had been previously trained in different normal, aggressive and Ecodriving trips. Three degrees of aggressiveness were used, in order to see the influence of the driver on the results:

- Aggressive driving pattern, with high acceleration and deceleration values, but not exceeding the maximum speed.
- Normal driving pattern following the surrounding vehicles, maintaining normal smooth accelerations and decelerations when braking.
- Ecodriving, following the recommendations of the New Driving Style promoted by the EcoDriving Consortium (Wilbers 1999). This driving is based on anticipation, regular speed, smooth accelerations and changing gear at low engine speed.

Route

As the tests were focused on the effect of speed limits on emissions and fuel consumption, the routes had to include narrow one-lane roads but also wider roads with two or more lanes on each side. The function of the streets had to be residential or commercial, mainly local streets instead of collector streets.

Taking these constraints into account, a route along the streets of the Chamberi district of Madrid was plotted including streets limited to 30 km h^{-1} or 50 km h^{-1} and also other streets limited to 50 km h^{-1} . Neither ring roads nor motorways were included. Figure 2 shows the map of the route on the plan of the Chamberi district in Madrid and the slope profile of this route. It can be seen that Madrid is characterized by streets that are never flat. This strongly affects the average fuel consumption and emission factors of the cars in central urban zones.

Figure 2. Map and slope profile of the route

Testing procedure

33 tests were conducted in three different driving styles; 12 normal and 12 eco-driving and aggressive. About 250 km were travelled that corresponded to about 15 hours of data collected each 0.1 seconds. The tests were randomly carried out during eight different days throughout the month of March 2011.

In the one-lane local streets in which these tests were made, the traffic flow is usually light because those streets are used mainly by local residents to access the main streets. This vehicle flow is naturally regulated by priority on street intersections; however, it is affected by random phenomena such as the stopping of a car to unload goods or persons or to park at the kerb. Despite the small variation in traffic during the day, tests were carried out during both peak and off-peak hours of the day to statistically eliminate any possible influence.

Emissions analyzers, heated line and sample tube heating were warmed throughout the night before the tests. A calibration procedure was carried out before each day of the tests, and the engine was heated during a previous 5 km route, and also to ensure that all systems were functioning properly. In addition, the sample tube was scavenged with hot air between each consecutive tests.

RESULTS AND DISCUSSION

Effect of speed limit on vehicle dynamics

The results are presented here as averaged values of dynamic variables of the car movement. The average results were computed from each trial, which included the car moving in a zone in which the speed was always limited to 50 km h^{-1} because there were more arterial than one-lane roads, and in another zone in which the speed was limited to 50 km h^{-1} or 30 km h^{-1} because they were narrow one-lane streets. It was attempted to reproduce the reality of a car driving along the streets of a standard city centre. The results set out here include only those where a normal driving style was used by the driver.

Table 2 gives an overview of the average measured speed of the car and the average positive acceleration, calculated taking into account only the periods in which the vehicle speed was increased, and the average engine speed. The results of this table were measured on the complete route (comprising 64 % $30\text{--}50 \text{ km h}^{-1}$ streets and 36 % 50 km h^{-1} streets) using a normal driving style and include the standard deviation of each of the dynamic variables. In addition, Figure 3 shows graphically the relative change in the dynamic variables

Table 2. Results obtained on the 7.4 km route with a normal driving style

Speed limit (km h ⁻¹)	Average speed (km h ⁻¹)	Average positive acceleration (m s ⁻²)	Average engine speed (r min ⁻¹)
30	16.1 ± 2.1	0.494 ± 0.053	1152.6 ± 61.0
50	16.2 ± 2.0	0.619 ± 0.112	1217.5 ± 66.4

Figure 3. Average speed, positive acceleration and engine speed for the total route

From Figure 3, it can be observed that for the whole route that changing the speed limit in only one part of it does not affect the average speed of the whole route. Nevertheless, it can be seen that the average positive acceleration is reduced by 20 % and the average engine speed is slightly reduced by 5 % when the speed is limited to 30 km h⁻¹. This means that the driver naturally increases the speed more slowly when he tries to reach the 30 km h⁻¹ limit than when he tries to reach the 50 km h⁻¹ limit. In fact, the car is always increasing or decreasing its speed, because the distance between street intersections is less than 200 m in the 30 – 50 km h⁻¹ zone. The reason for those results can be explained in both cases by the analysis of the instantaneous driving pattern.

Figure 4. Instantaneous speed on the same section of the route with 30 and 50 km h⁻¹ speed limits

Figure 4 shows the instantaneous speed of the car on the same section of the route, with no traffic light-controlled street intersections. It can be observed that the speed is always changing due to the fact that street sections between intersections are short (approx. 100 m). For this reason, with the 50 speed limit the car never reaches the maximum speed, even though the driver presses the accelerator pedal more. When approaching an intersection the car speed is reduced and the car only stops if another car or pedestrian has the right of way.

Effect of speed limit on fuel consumption and pollutant emissions.

Figure 5 shows the instantaneous fuel consumption on the urban section of the route, in which the speed limit is changed from 50 km h⁻¹ to 30 km h⁻¹. In the acceleration periods the fuel consumption is higher than at constant speed due to the increase in the fuel-air ratio, but these values are less when the limit is 30 km h⁻¹ than when it is 50 km h⁻¹.

Figure 5. Instantaneous speed along the section of the urban route, with both speed limits

Peak fuel consumption of 1.8 to 2.2 g s^{-1} can be found at the 50 km h^{-1} limit, but this peak fuel consumption does not exceed 1 g s^{-1} at the 30 km h^{-1} limit. As a result of such instantaneous behaviour, the accumulated fuel consumption along the whole section of the route is much lower, as the graph in Figure 6 shows for the same section of Figure 5.

Figure 6. Accumulated fuel consumption along the same section of the urban route, with both speed limits

The pollutant emissions are also affected by the speed limit but in a different way. Figure 7 shows the relative change in NO_x , CO, HC and PM mass emissions along the studied urban route that includes 50 km h^{-1} limit zones and $30 - 50 \text{ km h}^{-1}$ limit zones (Figure 2).

Figure 7. Modification of emissions and fuel consumption in the studied urban route when the speed limit is reduced to 30 km h^{-1}

Nitrogen oxides, carbon monoxide and particulate matter emissions are reduced when the speed limit is reduced to 30 km h^{-1} , but hydrocarbon emissions increase. The increase in average HC emissions does not have any statistical significance due to the high variability observed. However, this variability can be explained because these emissions are formed in transient operating conditions that depend on several instantaneous engine conditions such as exhaust gas temperature, oxidation, catalytic converter temperature, fuel / air ratio, turbocharger conditions, etc., that are also a function of engine load and speed, as well as the time spent with the car stopped (cooling of the catalytic converter).

The reduction in NO_x emissions, when the speed limit is reduced, is linked to the fuel consumption reduction shown in Figures 5, 6 and 7, due to the fact that NO_x emissions depend on the relative fuel / air ratio, as shown in Figure 8.

Figure 8. Instantaneous NO_x emissions related to relative fuel / air ratio

Table 3 shows the numerical values of the fuel consumption (l per 100 km) and emission factors (g km⁻¹) along with the standard deviations of the different test trials on the same route. The fuel consumption increase, as was previously explained, has a low standard deviation.

Table 3. Fuel consumption and emission factor on the urban route with both speed limits

Speed limit (km h ⁻¹)	Fuel consumption (l 100km ⁻¹)	NO _x emission factor (g km ⁻¹)	CO emission factor (g km ⁻¹)	HC emission factor (g km ⁻¹)	PM emission factor (g km ⁻¹)
30	9.4 ± 0.5	0.65 ± 0.07	0.27 ± 0.17	0.012 ± 0.010	0.31 ± 0.15
50	11.1 ± 0.8	0.89 ± 0.44	0.34 ± 0.12	0.009 ± 0.006	0.40 ± 0.19

The reduction in the CO emission factor is due to the rise of the average catalytic converter temperature, which improves the catalytic converter oxidation performance. A 14 % rise in exhaust gas temperatures was measured.

Influence of driving style when speed limit is 30 km h⁻¹

The driving style affects the above-explained results. In order to illustrate this influence, Figure 9 illustrates the percentage change in average speed, average positive acceleration and average engine speed when the car is driven in Ecodriving and Aggressive styles with respect to the Normal driving behaviour of the same driver.

Figure 9. Percentage change in average speed, positive acceleration and engine speed during 30 km h⁻¹ sections of the route with three driving styles

Table 4 shows the results of average speed, positive acceleration and engine speed with the three driving styles, the values for Normal driving are used as a reference for Figure 9. It should be noted that the Ecodriving has no influence on those parameters because of the type of traffic environment in which there were more than 4 intersections per kilometre and Ecodriving could not be widely used. Nevertheless, when an Aggressive driving style is used, the average speed increases by less than 10 %. Meanwhile the average positive acceleration and the average engine speed are more significantly increased.

Table 4. Results of dynamic variables for the three driving styles for the route

Driving Style	Average speed (km h ⁻¹)	Average positive (m s ⁻²)	Average engine speed (r min ⁻¹)
Eco	16.6 ± 3.1	1.78 ± 0.27	1164.6 ± 49.5
Normal	16.1 ± 2.2	1.78 ± 0.19	1152.6 ± 61.0
Aggressive	18.3 ± 1.1	2.61 ± 0.43	1452.7 ± 72.3

Figure 10 illustrates the percentage change in fuel consumption factors and NO_x, CO, HC and PM emissions when Ecodriving and Aggressive driving styles are used with respect to the Normal driving styles that are presented in Table 5. The results for Fuel consumption and NO_x emissions follow the tendencies found in car and engine behaviour but other emissions follow different tendencies. CO and HC emissions are higher in Ecodriving conditions due to lower oxidation catalyst temperatures (a reduction of about 10 % in average exhaust gas temperature was measured). Higher CO emissions in aggressive driving are due to higher fuel / air ratios in transient acceleration periods and the lower HC emissions to higher oxidation catalyst temperatures.

Figure 10. Percentage change in fuel consumption and emission factor during 30 km h⁻¹ sections of the route with three driving styles

PM emissions mainly depend on engine load, and then the tendency for them to increase as the aggressiveness of the driving style increases is what would be expected. The high standard deviation of CO, HC and PM emissions is probably due to the transient operative conditions of the turbocharger, too far removed from its design operating conditions.

Table 5. Emission and fuel consumption results for the three driving styles

Driving style	FCF (l 100km ⁻¹)	NO _x (g km ⁻¹)	CO (g km ⁻¹)	HC (g km ⁻¹)	PM (g km ⁻¹)
Eco	9.3 ± 1.0	0.67 ± 0.12	0.39 ± 0.22	0.019 ± 0.012	0.24 ± 0.13
Normal	9.4 ± 0.5	0.65 ± 0.07	0.27 ± 0.17	0.012 ± 0.010	0.31 ± 0.15
Aggressive	12.2 ± 1.0	0.86 ± 0.18	0.44 ± 0.16	0.005 ± 0.004	0.52 ± 0.29

CONCLUSIONS

From the tests carried out in a light duty diesel vehicle driven along urban streets with two different speed limits, the following conclusions can be highlighted:

- Reducing the speed limit in some residential narrow one-lane streets in city centres, which is being used to increase pedestrian safety, is also a good measure to reduce fuel consumption, and the resulting Green House Gas emissions.
- Also CO, NO_x and PM emission factors tend to be lower when the speed is limited to 30 km h⁻¹ than when the limit is 50 km h⁻¹, but on the other hand HC emissions are increased. But it is assumed that the most important pollutants in the case of European cities are NO_x and PM, mainly when dealing with diesel engine cars.
- The driving style affects the results, which, in turn, affects the fuel consumption factors as well as the emission factors.
- From a general point of view, reducing the speed limit to 30 km h⁻¹ in some residential areas in large cities can lead to benefits for both fuel consumption and the urban environment.

ACKNOWLEDGMENTS

The author wish to thanks Alexandre Baudry and Cesar Chacon for their help in preparing and carrying the tests, Jesus Rodriguez for processing the data and Adrian Alonso for driving the car during the road trials. The financial support of the Spanish Ministry of the Environment is gratefully acknowledged.

REFERENCES

- Aarts L. and van Schagen I., (2006). Driving speed and the risk of road crashes: a review, *Accident Analysis and Prevention*, **2**, 215-224.
- Casanova J., Fonseca N. and Espinosa F., (2009). Proposal of a dynamic performance index to analyze driving pattern effect on car emissions. Proceedings 17th Transport and air pollution symposium and 3rd Environment and Transport Symposium. Toulouse, France. Actes INRETS n°122.
- Casanova J., Margenat S., Ariztegui J., (2005). Impact of driving style on Pollutant Emissions and Fuel Consumption for Urban Cars. Proceedings of the 1st International Congress of Energy and Environment Engineering and Management. Potoalegre, Portugal. P.175.
- Daham B., Andrews G., Li H., Ballesteros R., Bell M., Tate J. and Ropkins K., (2005). Application of a Portable FTIR for Measuring On-Road Emissions, SAE Technical paper, 2005-01-0676.
- De Vlieger I. (1997). On board emission and fuel consumption measurement campaign on petrol-driven passenger cars, *Atmospheric Environment*, **31**(22), 3753-3761.
- De Vlieger I., De Keukeleere D. and Kretzschmar J., (2000). Environmental effects of driving behaviour and congestion related to passenger cars, *Atmospheric Environment*, **34**(27), 4649-4655.
- Elvik R., (2001). Area-wide urban traffic calming schemes; A meta-analysis of safety effects, *Accident Analysis and Prevention*, **33**(3), 327-336.
- Fonseca N. and Casanova J., (2009). Problemas asociados a la medida de emisiones máxicas instantáneas en motores de vehículos. Memorias del VI Jornadas Nacionales de Ingeniería Termodinámica JNIT2009 ISBN 078-84-692-2642-1, Córdoba, España.
- Fonseca N., Casanova J. and Espinosa F., (2010). Influence of Driving Style on Fuel Consumption and Emissions in Diesel-Powered Passenger Car, Transport and Air Pollution, 18th International Symposium TAP 2010, Zurich May 2010, 57-7.
- Johansson H., Gustafsson P., Henke M., Resengren M., (2003). Impact of Ecodriving on emissions. 12th International Symposium "Transport and Air Pollution" Avignon, 16-18 june 2003 Proceedings actes, **92**(1). Inrets ed., Arcueil. France, 2003. 113-120.
- Lenaers G., (1996) On-board real life emission measurements on a 3 way catalyst gasoline car in motor way-, rural- and city traffic and on two Euro-1 diesel city buses, *Sci Total Environ.*, **189/190**, 139-147.
- Li H., Andrews G., Daham B., Bell M., Ropkins K., (2006). Study of the Emissions Generated at Intersections for a SI Car under Real World Urban Driving Conditions, SAE Technical paper, 2006-01-1080.
- Li H., Andrews G., Daham B., Bell M., Tate J., Ropkins K., (2007). The Impact of Traffic Conditions and Road Geometry on Real World Urban Emissions using a SI Car, SAE Technical paper 2007-01-0308.
- Li H., Andrews G., Tate J., Ropkins K., Bell M., (2010). Driver Variability Influences on Real World Emissions at a Road Junction using a PEMS, SAE Technical paper, 2010-01-1072.
- Pelkmans L. and Debal P., (2006). Comparison of on-road emissions with emissions measured on chassis dynamometer test cycles. Transportation Research Part D: *Transport and Environment* **11**(4), July 2006, Pages 233-241.
- Saboochi Y. and Farzaneh H., (2009). Model for developing an eco-driving strategy of a passenger vehicle based on the least fuel consumption, *Applied Energy*, **86**, 1925-1932.
- Takada Y., Ueki S., Saito A., Sawazu N., Nagatomi Y., (2007). Improvement of Fuel Economy by Eco-Driving with Devices for Freight Vehicles in Real Traffic Conditions, SAE Technical paper, 2007-01-1323
- Taylor M. and Wheeler A., (2000). Accidents reductions resulting from village traffic calming. In: Demand management and safety systems; proceedings of seminar J, Cambridge 11-13 September 2000, p. 165-174
- Vis A.A., Dijkstra A. and Slop M., (1992). Safety effects of 30 km/h zones in The Netherlands, *Accidents Analysis and Prevention*, **24**, 75-86.
- Zones 30 urban residential areas http://www.swov.nl/rapport/Factsheets/UK/FS_Residential_areas.pdf

A.6 Solicitud de patente española. Dispositivo Universal, no intrusivo, de medida en tiempo real de emisiones contaminantes de motores embarcable en vehículos. (Casanova y Fonseca, 2010c)

DISPOSITIVO UNIVERSAL, NO INTRUSIVO, DE MEDIDA EN TIEMPO REAL DE EMISIONES CONTAMINANTES DE MOTORES, EMBARCABLE EN VEHÍCULOS.

CAMPO TÉCNICO DE LA INVENCION

- 5 Instrumentación para la medida de emisiones contaminantes en tiempo real para vehículos de motor de combustión interna.

ESTADO DE LA TÉCNICA

- 10 La mayoría de los medios de transporte y las máquinas de obras públicas y agrícolas utilizan en la actualidad motores de combustión interna para su funcionamiento y propulsión. Estos motores generan gases de escape durante su funcionamiento que son emitidos a la atmósfera y que contienen además del nitrógeno y parte del oxígeno del aire entrante, especies químicas como el dióxido de carbono (CO_2) proveniente del carbono del combustible y el vapor de agua (H_2O)
- 15 del hidrógeno del combustible y otras especies químicas disueltas en el gas de escape, que pueden ser contaminantes, como el monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos (HC), óxidos de nitrógeno (NO_x), además de partículas micrométricas sólidas y líquidas en suspensión. Algunos de estos compuestos son perjudiciales para los seres vivos y tienen efectos medio ambientales por
- 20 reacciones atmosféricas que los hacen ser catalogados como contaminantes. Actualmente, diversas normativas internacionales y regulaciones limitan la cantidad que cada motor puede emitir según ensayos normalizados para cada tipo y aplicación del motor.

- Para desarrollar motores, vehículos y máquinas que puedan cumplir los límites
- 25 impuestos por las diferentes normativas aplicables, existen dispositivos que proporcionan la información de la cantidad de especies contaminantes producidas por los motores, los vehículos o las máquinas. Estos dispositivos son sistemas más o menos complejos que tienen analizadores de concentración de especies y sensores de propiedades físico – químicas del gas de escape que permiten calcular
- 30 la contaminación producida. Estos sistemas suelen estar compuestos por equipos estáticos, no portátiles, de la precisión adecuada que miden según ciclos y ensayos iguales para cada tipo de motor o vehículo. En el estado de la técnica actual, la mayoría de estos medidores de emisiones contaminantes de los motores que

- forman parte de algún medio de transporte o maquinaria móvil, se centran en dispositivos adaptados a un banco motor estático o a un banco de rodillos en el que se puede instalar el vehículo completo, que le proporcionan, al motor o al vehículo según el caso, unas resistencias adecuadas para simular el funcionamiento o la
- 5 circulación real del mismo. Estos equipos de medida son estacionarios y se basan en principios de medida que exigen equipos de gran tamaño y peso que no son transportables en un vehículo y por lo tanto no pueden medir las emisiones en circulación real. Por ello el motor o el vehículo a ensayar deben ser transportados al lugar donde se sitúa el banco motor o el banco de rodillos.
- 10 Sin embargo, la necesidad de comprobar la validez de las soluciones anticontaminación de los motores, su durabilidad en la vida real y de conocer las emisiones de las fuentes móviles de contaminación, exige poder disponer de datos de especies contaminantes emitidas en tiempo real en condiciones operativas reales, fundamental para adoptar políticas y métodos para su reducción, obliga a
- 15 disponer de sistemas de medida capaces de ser utilizados a bordo del vehículo o máquinas que contiene al motor, mientras éste realiza su función en el entorno real.
- En el caso de esta invención, el sistema de medida de emisiones es un dispositivo mínimamente intrusivo, fácil de instalar y de poner a punto, en cualquier vehículo del parque automovilístico, independientemente de marca, tipo, combustible,
- 20 sistema de diagnosis, etc. y ser utilizado mientras el vehículo realiza su función en condiciones reales, como puede ser el de circular por calles urbanas, carreteras interurbanas, caminos, autopistas o desempeñar otras funciones como en el caso de la maquinaria móvil. Adicionalmente, la operación del sistema no influye significativamente en los parámetros de funcionamiento del vehículo, como pueden
- 25 ser la masa (el peso del equipo es similar al peso de un pasajero) o el volumen (el equipo cabe dentro del espacio trasero incluso de un turismo pequeño), y no afecta a las condiciones de conducción del mismo, maniobrabilidad, visibilidad etc.
- En el pasado ya se han realizado algunos equipos de este tipo, conocidos por las siglas PEMS (Portable Emissions Measurement System), que se diferencian entre
- 30 sí, según ciertas características como pueden ser la toma y acondicionamiento de la muestra, la medición del flujo, los analizadores, instrumentación y sistema de adquisición de datos.

Respecto a la toma y acondicionamiento de la muestra, existen en la actualidad dos maneras de llevarla a cabo, una es realizar una dilución de la muestra, tomando

- una muestra de los gases de escape y mezclándola con una cierta cantidad de aire limpio. Esta forma de toma de muestra, impide la condensación de parte del vapor de agua de los gases, el cual puede arrastrar parte de los hidrocarburos contenidos. Sin embargo tiene dos desventajas importantes, este sistema es muy voluminoso y
- 5 difícil de implantar en un vehículo y produce una distorsión de las concentraciones de las distintas especies químicas existentes en los gases de escape. La otra vía de realizar la toma de muestra es hacerlo por medio de la muestra directa, que evita los problemas antes mencionados. Por lo que, en la actualidad la mayoría de los medidores de emisiones a bordo utilizan la toma directa de muestra.
- 10 Para realizar la medida de los caudales de escape, se utilizan mayoritariamente dos tipos de dispositivos o técnicas. Uno es el caudalímetro de presión diferencial, como es el caso del tubo de Pitot convencional o el caudalímetro de diferencia de temperatura, que tiene la desventaja de ser más voluminoso y menos preciso que el tubo de Pitot.
- 15 En cuanto a los analizadores de gas, se suele utilizar equipos de métodos espectroscópicos como el de absorción de infrarrojos no dispersivos (conocida por sus siglas en inglés NDIR) más usado para la medida de CO, CO₂ y HC o el de absorción de rayos ultravioleta no dispersivos (en inglés NDUV) usado comúnmente para la medida de NO y NO₂, también están los equipos de ionización de llama para
- 20 la medida de HC, los equipos de quimioluminiscencia (CLD son sus siglas en inglés) y los sensores de estado sólido para la medida de los óxidos de nitrógeno. Donde cada una de estas tecnologías tiene sus ventajas e inconvenientes para su uso en aplicaciones on-board.
- Algunos de los equipos de este tipo que se han desarrollado a nivel mundial, son:
- 25 – **VPEMS**. Prototipo desarrollado por la Imperial Collage y SIRA para medir emisiones en los vehículos diésel y gasolina. Utiliza un analizador de 5-gases comercial, un GPS para determinar la posición y velocidad del vehículo, y obtiene información de la actividad del vehículo a través de la ECU.
- **MEMS**. Diseñado por la Universidad de West Virginia para medir las emisiones
- 30 de gases producidos por los camiones.
- **TRL**. Este sistema ha sido desarrollado por el “Transport Research Laboratory” inglés para medir las emisiones de gases producidas por el tráfico rodado en el centro de Londres. Este sistema incluye un analizador de 5-gases marca

Crypton, GPS situado en la parte delantera del vehículo y conectado a un ordenador a través de un puerto USB, a través de la ECU del vehículo se obtienen la velocidad del vehículo y datos del motor. Este sistema incorpora 2 ordenadores, uno para analizar las emisiones y el otro para la lectura de la ECU y recibir información del GPS.

- **RAVEM.** El Ride-Along Vehicle Emissions Measurement puede medir emisiones de PM además de las emisiones convencionales NO_x, CO y CO₂ con la opción adicional de medir los THC, SO₂, NH₃, N₂O, especies individuales de compuestos orgánicos volátiles (VOC) y carbonilos como el formaldehído, acetaldehído y acroleína. El sistema RAVEM está basado en el muestreo de flujo parcial proporcional de los gases de escape del vehículo.

A nivel comercial, existen algunos equipos similares como los siguientes:

- **Horiba OBS-series 1000/2000.** Sistema medidor y analítico de emisiones en tiempo real que guarda información sobre los gases de escape y sobre el ambiente de conducción. Es capaz de medir emisiones de vehículos gasolina diésel, y de combustibles alternativos, además de poder ser utilizado en vehículos off-road.
- **Sensores SEMTECH.** Sistema desarrollado por la firma Sensors Inc con dos variantes: SEMTECH QCM que utiliza la precipitación electrostática para medir emisión de partículas y MPS que es el complemento de SEMTECH permitiendo realizar medidas en los estados transitorios. Existen versiones para vehículos diésel (SEMTECH-D) y gasolina (SEMTECH-G). En ambos casos el sistema incluye un analizador de 5-gases, que se encarga de medir NO, NO₂, CO, CO₂ y THC con una precisión de $\pm 3.4\%$. La información de la velocidad del vehículo, rpm del motor y el flujo de aire para la combustión, se registra accediendo a la lectura de la ECU, y mediante un GPS se define la posición del vehículo.
- **MONTANA.** La firma Clean Air Technologies International Inc desarrolló el PEMS Montana que incorpora un analizador de 5-gases y PM mediante sensores láser. Para medir la actividad del vehículo se obtiene la información de la ECU del mismo. En el caso de vehículos antiguos el sistema tiene prevista la incorporación de los sensores necesarios para medir la velocidad de giro del motor, así como la presión y temperatura del aire entrante (intake air) para estimar la cantidad de aire y combustible consumidos. Por último el sistema integra, un GPS, para registrar la posición y velocidad del vehículo en un

ordenador portátil. Este ordenador se encarga de sincronizar las lecturas, guardarlas y analizar el conjunto de datos: emisiones gaseosas, aire entrante, régimen del motor, y GPS.

En cuanto a patentes relacionadas con este tipo de invención, tenemos:

- 5 – La patente PCT/US2001/010700 clasificación: G01M 15/00. Es un dispositivo de medida de emisiones en el cual parte de la información se obtiene directamente del motor, instalando varios sensores en el mismo y varios sensores que analizan los gases que salen por el tubo de escape, y que es capaz de ser instalado a bordo.
 - 10 – La patente PCT/US2006/037491 clasificación: G01M 17/00. Dispositivo para interpretar las medidas de emisiones de motores de combustión interna. No analiza las emisiones en sí.
 - La patente US5452576 clasificación: F01N 3/20. Dispositivo de control de relación aire/combustible y de medida de las emisiones de motor de combustión interna embarcable, que mide las emisiones directamente en el escape del motor. Esta patente también incluye el método de control del motor acoplado a un convertidor catalítico.
 - 15 – La patente US6308130 clasificación: G01M 15/00. Trata de un dispositivo embarcable para medida másica de emisiones contaminantes de vehículos equipados con motores de combustión interna, que incorporando diferentes sensores, recogen la información de su funcionamiento; y que la medida de la masa de dichos gases la obtiene mediante cálculos realizados por un procesador a partir de los datos obtenidos del motor y de sensores colocados a lo largo del conducto del escape del motor.
 - 20 – La patente US6308130 clasificación: G01M 15/00. Trata de un dispositivo embarcable para medida másica de emisiones contaminantes de vehículos equipados con motores de combustión interna, que incorporando diferentes sensores, recogen la información de su funcionamiento; y que la medida de la masa de dichos gases la obtiene mediante cálculos realizados por un procesador a partir de los datos obtenidos del motor y de sensores colocados a lo largo del conducto del escape del motor.
 - 25 En general, los sistemas actuales utilizan medidores de concentración de especies contaminantes en el tubo de escape que se sitúan a cierta distancia del escape, por lo que la muestra a analizar debe ser conducida por conductos al analizador. En estos equipos, el consumo se calcula indirectamente a partir de la concentración de CO₂, CO y HC, utilizando tales analizadores, por lo que existe siempre una
 - 30 incertidumbre de la medida por el retardo de la respuesta de los diferentes equipos.
- Estos equipos de medida no son universales y no pueden medir en cualquier tipo de motor sea de encendido provocado o de tipo diésel.

En estos equipos el caudal de gases de escape se mide por un caudalímetro basado en algunos casos en dos tubos de Pitot trasversales a 90° o por otro medio, sistemas que está muy afectado por el efecto del ensuciamiento debido a las partículas del gas de escape.

- 5 En la mayor parte de estos sistemas no se determina la relación aire / combustible de la mezcla en el motor mediante un sensor específico.

Algunos de estos sistemas no disponen de una metodología de corrección de los caudales pulsatorios durante los periodos de muy bajo grado de carga y bajo régimen de giro del motor.

- 10 Por ello, resulta útil disponer de un equipo portátil y universal que sea capaz de medir en tiempo real las emisiones en forma de caudales máscicos, registrando en tiempo real los valores instantáneos y que pueda ser embarcado en vehículos ligeros y vehículos pesados de transporte rodado y en otro tipo de maquinaria móvil no de carretera y permita una medida a bordo de otras variables instantáneas como
- 15 el consumo de combustible o la relación aire / combustible de la mezcla utilizada en el motor, y que sea instalable en cualquier vehículo sin ninguna actuación ni intrusión en sus funciones y en su estructura.

DESCRIPCIÓN DE LA INVENCION

- 20 Se trata de un sistema para medir emisiones máscicas instantáneas de motores de combustión interna en vehículos, caracterizado por ser para medida embarcada, universal (valido tanto para motores de encendido provocado como para motores de encendido por compresión y para trabajar con cualquier combustible) totalmente no-intrusivo (para su utilización no requiere modificación alguna en el vehículo), no
- 25 requiere conexión con la OBD del coche y autónomo, con lo cual no se sobrecarga el sistema eléctrico del coche. El sistema tiene la capacidad de medir las emisiones de gases contaminantes como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO/NO₂ y NO_x), así como de las emisiones de partículas (masa total), emisiones de dióxido de carbono (CO₂), y el consumo de
- 30 combustible del motor de un vehículo automóvil (ligero o pesado) o de una máquina móvil no de carretera, en tiempo real mientras el vehículo circula por cualquier tipo de vía o la máquina realiza su función.

El dispositivo comprende un tubo de muestreo, un conjunto de analizadores de gases para medir CO, CO₂, NO/NO₂/NO_x, HC, relación aire/combustible y partículas, un sistema de registro de variables dinámicas para medir la, temperatura ambiente, la velocidad del vehículo, el régimen de giro y la temperatura del motor,
5 un sistema adquisición y registro de señales y un sistema autónomo de alimentación eléctrica.

El tubo de muestreo es un tubo compacto, de fácil instalación, conectable al tubo de escape del motor donde se acondiciona el flujo, se hace toda la toma de muestras y la medida directa del caudal, que comprende un laminador de flujo a la entrada
10 seguido de un tramo recto, dos tomas para muestreo de gases y un caudalímetro.

El laminador de flujo seguido del tramo recto de tubería sirve para garantizar que el flujo esté completamente desarrollado en el punto de la medida de caudal y comprende un tubo exterior y una serie de tubos capilares paralelos que cubre sustancialmente la totalidad del área transversal del tubo exterior.

15 Las tomas de muestreo de gases tienen una configuración que evita la entrada de partículas en las líneas de muestreo de los gases que van a los analizadores y comprenden un tubo ciego en forma de “L” que penetra hasta el centro del tubo de muestreo de forma perpendicular a la superficie y cuya boca sellada queda enfrentada al flujo, caracterizado por que entre el extremo sellado y el codo del tubo
20 en forma de “L” existen una pluralidad de orificios laterales que están deformados de forma contraria al flujo.

El caudalímetro es tipo tubo de pitot diseñado especialmente para evitar la obstrucción de las tomas de presión en aplicaciones en la que hay presencia de partículas y altos contenidos de humedad y donde los tubos de Pitot
25 convencionales no sirven. El caudalímetro comprende una toma independiente de presión de remanso, una toma múltiple de medida de presión sensible, un sensor de presión diferencial, un sensor de presión absoluta y un sensor de temperatura. La toma múltiple de presión sensible, incluye al menos tres orificios sobre la superficie del tubo de muestreo, localizados de forma simétrica sobre un plano
30 perpendicular al eje del tubo de muestreo y alineado a la boca de la toma de presión de remanso. La toma múltiple de presión sensible comprende una pieza alojada en cada orificio de forma que internamente queda enrasada con la superficie interior del tubo de muestreo y externamente se apoya sobre su superficie exterior. Cada pieza es acoplable a mangueras y entre sí se unen por

medio de piezas en forma de “T”, formando un collarín de igualación de presión alrededor del tubo de muestreo. Donde el collarín de igualación de presión, es acoplable al tramo de manguera que lleva la señal de presión sensible al sensor de presión diferencial y de presión absoluta. La toma de presión de remanso del caudalímetro, diseñada para que el condensado que se pueda formar en la superficie interna de este tubo resbale evitando así la obstrucción de esta toma de presión y por consiguiente garantizar la medida correcta de caudal, está formada por un tubo en forma de “L” que penetra sustancialmente de manera perpendicular a la superficie del tubo de muestreo, de tal forma que la boca quede enfrentada al flujo y en el plano coincidente con el de la toma múltiple de presión sensible. La toma de presión de remanso del caudalímetro se caracteriza por que los dos tramos de tubo en “L” forman sustancialmente un ángulo de 100°.

DESCRIPCIÓN DE LAS FIGURAS

La figura 1, muestra el esquema general de los elementos que comprenden el sistema de medida a bordo de emisiones contaminantes en el que se observan los 6 subconjuntos por los que está conformado el sistema y los elementos que los conforman.

La figura 2, muestra la distribución de los subconjuntos que conforman el sistema y la localización de algunos de los elementos constitutivos.

La figura 3, muestra una vista longitudinal seccionada del laminador de flujo (1).

La figura 4, muestra una vista seccionada de las tomas de presión del caudalímetro.

La figura 5, muestra las dos vistas principales de las tomas de muestra de alta y baja temperatura.

DESCRIPCIÓN DETALLADA DE UN MODO DE REALIZACIÓN

Se trata de un sistema para medir emisiones másicas instantáneas de motores de combustión interna en vehículos, caracterizado por ser para medida embarcada, universal (valido tanto para motores de encendido provocado como para motores de encendido por compresión y para trabajar con cualquier combustible) totalmente no-intrusivo (para su utilización no requiere modificación alguna en el vehículo), no requiere conexión con la OBD del coche y autónomo, con lo cual no se sobrecarga

el sistema eléctrico del coche. El sistema tiene la capacidad de medir las emisiones de gases contaminantes como monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), óxidos de nitrógeno (NO/NO₂ y NO_x), así como de las emisiones de partículas (masa total), emisiones de dióxido de carbono (CO₂), y el consumo de combustible del motor de un vehículo automóvil (ligero o pesado) o de una máquina móvil no de carretera, en tiempo real mientras el vehículo circula por cualquier tipo de vía o la máquina realiza su función. Los datos obtenidos son conjuntos de valores en forma de señales analógicas o digitales (según el caso) que son registradas en un sistema de registro informático. Las medidas de emisiones másicas instantáneas y consumo instantáneo son obtenidas con base en las medidas de concentración de gases y del caudal de gases de escape. Por ello el sistema consta de seis subconjuntos:

1. Un **Tubo de Muestreo (I)** caracterizado por ser compacto, de fácil instalación, en donde se hace toda la toma de muestras y la medida directa del caudal y demás variables en el gas de escape del motor, caracterizado por ser un tubo metálico ligero que contiene: un laminador de flujo (1), una toma de muestra de alta temperatura (2), unas sondas de NO_x (3) y lambda (4), unas tomas de presión para el caudalímetro (5 y 7), un sensor de temperatura (6) y una toma de muestra de baja temperatura (8)
2. **Conjunto de Conductos** de gases, que son dos líneas: una línea enfriada (21) que contiene un filtro (22) y un sistema de enfriamiento y decantación de vapor de agua (9) y una bomba de vacío (10), y una línea calefactada (18) que mantiene la temperatura de los gases a 200 °C y que contiene un filtro calefactado de partículas aislado térmicamente (19).
3. **Conjunto de Analizadores de gases (II)** que analizan la concentración de CO y de CO₂ y NO/NO₂ que les llegan desde el Tubo de Muestreo por la línea enfriada (21) y las concentraciones de hidrocarburos totales en caliente de los gases que llegan por la línea calefactada (18). CO y CO₂ se analizan por el método de Infrarrojos No Dispersivos (12 y 13), HC por el método de Ionización de Llama (15) y NO_x, de forma redundante usando por un lado un sensor NO_x de estado sólido (16 y 3) y por otro lado, un analizador espectroscópico NDUV NO/NO₂ (14). Adicionalmente, en este conjunto, se incluye un medidor de relación aire/combustible (17), un medidor de concentración másica de partículas (26) y el conjunto de unidades electrónicas para medida de

temperatura (28), presión diferencial (23) y presión sensible (29) del gas de escape, que en sí conforman el medidor de caudal de gases de escape.

4. Un **Sistema de Adquisición y Registro** de señales analógicas y digitales (III) de los sensores y analizadores de gases. Así como el conjunto del software de post-procesamiento de las señales.
5. Un **Sistema Autónomo de Alimentación** de energía eléctrica (IV), el cual está formado por baterías e inversores.
6. Un **Sistema de Registro de Variables** del vehículo (V) como velocidad, régimen de giro del motor y temperaturas del motor.

Tubo de Muestreo (I)

Es un tubo metálico (acero o aluminio), que se conecta al tubo de escape del motor por una manguera flexible (35). El Tubo de Muestreo tiene las características siguientes: en la entrada tiene instalado un laminador de flujo (1), cuyo objetivo es el de garantizar un flujo laminar para la medida correcta del caudal. Este laminador está caracterizado por estar a la entrada del tubo de muestreo (I) y estar formado por un tubo exterior y una serie de tubos capilares de acero inoxidable paralelos al flujo formando una especie de panal de abeja que cubre la totalidad del área transversal del tubo exterior. El laminador de flujo forma un cuerpo que se une al resto del tubo de muestreo a través de una brida. Como se observa en la figura 3.

A continuación un tubo de longitud determinada que contiene en la dirección del flujo primero una toma de gases para la línea calefactada (2), formada por un tubo ciego en forma de L que penetra hasta el centro del tubo de muestreo (I) de forma perpendicular a la superficie y cuya boca sellada queda enfrentada al flujo. En la zona comprendida entre el extremo sellado y el codo (de la L) hay orificios laterales uniformemente espaciados y deformados de forma contraria al flujo para evitar la entrada de partículas como se puede observar en la figura 5. El tubo de toma de muestra a alta temperatura está sujeto al tubo de muestreo (I) a través de un racor pasa muro e incluye en el extremo los accesorios necesarios para el acople de una manguera que conduce los gases muestreados a los analizadores, que evita la entrada masiva de partículas en la línea de muestreo.

Poco después dos sondas de medida (3) y (4) para NO_x y para la relación aire / combustible (sensor lambda) respectivamente, seguidamente las tomas de presión

para el caudalímetro (5 y 7), que incluye una toma de presión sensible (5) y una toma de presión de remanso (7). La toma de presión sensible está formada por 3 orificios realizados sobre la superficie del tubo de muestreo (I), localizados de forma simétrica sobre un mismo plano perpendicular al eje del tubo de muestreo (I). En

5 cada uno de los tres orificios entra una pequeña pieza que internamente queda enrasada con la superficie interior del tubo de muestreo y que externamente se apoya sobre su superficie exterior (Figura 4). Las tres piezas están sujetas al tubo de muestreo (I) por medio de una abrazadera. A las tres pequeñas piezas se acoplan mangueras que entre si se unen por medio de piezas en forma de T,

10 formando un collarín alrededor del tubo de muestreo (I). Del collarín, por medio de otra pieza de unión en forma de T, se acopla la manguera que lleva la señal de presión sensible al sensor de presión diferencial (23) y de presión absoluta (29). La toma de presión de remanso, está formada por un tubo en forma de L que penetra de forma perpendicular a la superficie del tubo de muestreo (I), cuyo extremo se

15 localiza en el centro del tubo de muestreo (I), de tal forma que la boca quede enfrentada al flujo y en el plano coincidente con el de la toma de presión sensible. Los dos tramos de tubo que conforman la L forman entre sí un ángulo de 100°, de tal forma que el condensado que se pueda formar en la superficie interna de este tubo resbale evitando así la obstrucción de esta toma de presión y por consiguiente

20 garantizando la medida correcta de caudal. El tubo de toma de presión de remanso está sujeto al Tubo de Muestreo (I) a través de un racor pasa muro e incluye en el extremo los accesorios necesarios para el acople de una manguera que lleva la señal de presión de remanso al sensor de presión diferencial (23). Adicionalmente, en esta misma sección se sitúa un sensor de temperatura (6), que en conjunto con

25 la toma de presión de remanso (7) y la toma de medida de presión sensible (5) constituyen en esencia un tubo de Pitot de diseño propio, inventado especialmente para este tipo de aplicación en la que hay presencia de partículas y altos contenidos de humedad, debido a que para esta aplicación, los tubos de Pitot convencionales no sirven.

30 Más adelante y cerca a de la salida del Tubo de Muestreo se encuentra la toma de muestra para la línea fría (8), formada por un tubo ciego en forma de L que penetra hasta el centro del tubo de muestreo (I) de forma perpendicular a la superficie y cuya boca sellada queda enfrentada al flujo. En la zona comprendida entre el extremo sellado y el codo (de la L) hay orificios laterales uniformemente espaciados

35 y deformados de forma contraria al flujo para evitar la entrada de partículas como

se puede observar en la figura 5. El tubo de toma de muestra a baja temperatura está sujeto al tubo de muestreo (I) a través de un racor pasa muro e incluye en el extremo los accesorios necesarios para el acople de una manguera que conduce los gases muestreados a los analizadores, que evita la entrada masiva de partículas en la línea de muestreo y que termina en una conexión para manguera.

Conjunto de Conductos de gases

Está formado por dos conductos de material que soporta gases calientes, que no se degradan con los gases de escape y que no adsorben hidrocarburos, siendo el mejor material el teflón. Uno de los conductos constituye la línea calefactada (18) que succiona una pequeña parte de gases de escape por la toma de gases (2). Estos gases pasan primero por un filtro calefactado aislado térmicamente (19) que retiene las partículas y son conducidos al medidor de concentración de HC. Dispone de un sistema de calentamiento mediante una resistencia eléctrica (20) controlada por un termostato. El otro conducto constituye la línea fría (21) que aspira una pequeña cantidad de gases de escape por la toma (8) que tras pasar un filtro de papel (22) para retener partículas, llega a un enfriador y decantador (9) constituido por un tubo curvado en varios codos y refrigerado por la corriente de un pequeño ventilador y un decantador de agua, seguidamente es propulsado por una bomba (10), y a través de una válvula (11) conduce los gases a los medidores de concentración de CO (12), de CO₂ (13) y al medidor NDUV de NO/NO₂ (14).

Conjunto Analizadores (II).

Este conjunto de analizadores (II) está caracterizado especialmente por incluir la medida discriminada de NO y NO₂, que lo diferencia de los equipos convencionales. Este conjunto forma una estructura sólida y que contiene los siguientes elementos:

1. Un medidor de concentración de CO (12) alimentado por la línea fría y que funciona según el principio de Infrarrojos No Dispersivos.
2. Un medidor de concentración de CO₂ (13) alimentado por la línea fría y que funciona según el principio de Infrarrojos No Dispersivos.

3. Un medidor de concentración de NO/NO₂ (14) para gases con bajo contenido en oxígeno alimentado por la línea fría y que funciona según el principio de Ultravioletas No Dispersivos.
4. Un medidor de concentración de HC (15) alimentado por la línea calefactada y
5 que funciona según el principio de Ionización de Llama de hidrógeno.
5. La unidad electrónica de medida de NO_x (16) conectada por un cable al sensor de NO_x del Tubo de Muestreo (3).
6. Un medidor de concentración en masa de partículas (26) al cual se conecta la
10 sonda de muestreo de este medidor (30). Esta sonda se instala en la boca de escape de la manguera flexible que se coloca a continuación del Tubo de Muestreo para dirigir adecuadamente los gases de escape que se emiten a la atmósfera.
7. La unidad electrónica de medida de relación aire / combustible (17) conectada por un cable el sensor lambda del Tubo de Muestreo (4).
- 15 8. La unidad electrónica de medida de presión diferencial (23), conectada a las tomas de presión (5) y (7).
9. La unidad electrónica de medida de presión absoluta (29), conectada a la toma de presión sensible (5).
10. La unidad electrónica para medida de señal de temperatura (28), conectado al
20 sensor de temperatura de los gases de escape (6).

Sistema de Adquisición y Registro de señales analógicas y digitales (III)

- Todas las señales electrónicas correspondiente a las diferentes variables medidas en el Conjunto Analizadores y Sistema de Registro de variables del vehículo, se
25 colectan a través de un sistema de adquisición de datos (24) operado desde un ordenador (25), que por medio de un programa desarrollado bajo entorno LabView[®], registra en tiempo real todas las variables medidas y genera ficheros con los valores instantáneos a una frecuencia de 0,1 segundo. Posteriormente se ejecutan una serie de programas de post-procesamiento desarrollado bajo entorno
30 LabView[®], el cual calcula emisiones máxicas instantáneas y los valores totales de recorrido o por zonas.

Sistema Autónomo de Alimentación de energía eléctrica (IV)

Para no afectar al funcionamiento del motor y del vehículo, el sistema se alimenta de forma autónoma por medio de baterías portátiles. Se configura en dos líneas eléctricas: una de 12 V corriente continua y otra línea a 220 V corriente alterna mediante inversores desde la batería, que alimenta los analizadores, las bombas de circulación de la línea fría y el sistema de calefacción de la línea calefactada. Existe una toma de tierra común para todo el conjunto de medidores que se conecta al polo negativo de las baterías.

10 Sistema de Registro de Variables del vehículo (V)

Este sistema se caracteriza especialmente por incluir medida de velocidad por radar (27) y medida de régimen de motor por vibración (31), lo cual hace que la medida de variables del vehículo no dependan del sistema OBD del coche, ni de señal de GPS que en se pierde dentro de los túneles. Esta característica lo diferencia de los sistemas convencionales. Está constituido por los siguientes sensores de condiciones operativas del vehículo:

- Sensor de velocidad por sonda radar situado en la parte inferior externa del vehículo. (27).
- Sensor de régimen de giro del motor, constituido por un sensor de vibración que se adhiere magnéticamente a una parte de hierro en el motor (31).
- Sensor de temperatura exterior (32).
- Sensor de temperatura de refrigerante mediante un termopar de superficie adherido a la parte externa del maguito de salida de refrigerante hacia el radiador (33)
- Sensor de temperatura de aceite por un termopar de longitud suficiente para ser introducido por el conducto de la varilla de control de nivel de aceite. (34).

El funcionamiento del sistema es como sigue:

Los gases de escape salen por el tubo de escape habitual del vehículo y entran directamente en un tubo flexible de silicona (35) que está conectado al Tubo de Muestreo (I). El laminador de flujo (1) favorece que el flujo de gases de escape sea

unidireccional para obtener las adecuadas condiciones para las medidas de presión y caudal.

En su recorrido por el Tubo de Muestreo los gases se encuentran con una toma de muestra de alta temperatura (2) por la que se succiona una pequeña parte de los gases dirigiéndolos hacia la línea calefactada (18) que alimenta el medidor de concentración de HC (15) (que debe mantener la muestra a 200 °C). Del medidor de concentración de HC (15) sale un cable que envía las señales de datos medidos a una tarjeta de la adquisición de datos (24). Los gases introducidos al medidor de concentración de HC (15) salen por un tubo y se hacen pasar por un filtro decantador para evitar la obturación por humedad, para seguidamente ser expulsados al aire exterior.

Los gases de escape se encuentran con dos sondas de medida directa de emisiones, una mide la concentración de óxidos de nitrógeno (3) en el gas de escape junto con el contenido en oxígeno y otra mide la relación aire / combustible relativa –llamado factor lambda (4). Estos dos sensores están conectados a dos dispositivos electrónicos (16) y (17) situados en el Conjunto Analizadores (II), que se encargan cada uno de acondicionar las señales de los sensores y generar señales de salida que son enviadas por los correspondientes cables a la tarjeta de adquisición de datos (24).

A continuación los gases pasan por la zona de medida de caudal, cuyo principio de medida es equivalente a un tubo de Pitot convencional, pero que se ha desarrollado especialmente para la medida de caudal de gases con alto contenido de humedad y partículas en suspensión. En donde, por un lado, se mide la presión sensible (5) por medio de un medidor de presión absoluta (29), por otro lado la presión diferencial – diferencia entre presión sensible (5) y presión de remanso (7) – por medio del sensor de presión inductivo (23) y por último la temperatura de los gases por medio de un termopar (6) en contacto directo con los gases de escape. La presión sensible (5) se toma por tres orificios circulares de eje perpendicular al eje del Tubo de Muestreo, separados la misma distancia y situadas en el mismo plano perpendicular al eje de la toma de presión de remanso (7). Posteriormente los gases de escape encuentran la toma de presión de remanso (7) que tiene un diámetro suficiente y una ligera inclinación respecto al eje del Tubo de Muestreo, para evitar que el condensado y que las partículas de los gases de escape obturen esta toma. Las señales analógicas de salida de los sensores de presión diferencial

(23), presión absoluta (29) y temperatura (28) se registran en el ordenador (25) a través de las tarjetas de adquisición de datos (24). El caudal se calcula de forma instantánea en base a las curvas de calibración experimental, que están integradas dentro del software de adquisición de datos desarrollado. La medida de presión tanto sensible como de remanso se realiza a alta frecuencia para captar las variaciones de caudal debidas al flujo pulsátil, de tal forma que el caudal se calcula de forma instantánea a alta frecuencia, pero sólo se registran en los ficheros generados los valores medios de caudal cada 0.1 seg.

Seguidamente los gases de escape se encuentran con la toma de muestra de la línea fría (8), en la que los gases al entrar en esta pasan por un filtro de baja presión (22), por una bomba de vacío (10), un enfriador (9) y un filtro decantador en el que se elimina la humedad de la muestra que le llega a los medidores de CO (12), de CO₂ (13) y de NO/NO₂ (14). De estos equipos salen unas líneas de señal analógica a las tarjetas de adquisición de datos (24) y unos tubos de escape con los gases analizados para expulsarlos a la atmósfera.

Al final del Tubo de Muestreo los gases de escape salen por un tubo flexible de silicona (36) que se adosa a la parte trasera del vehículo mediante ventosas en situación que no obstruya la visión del conductor, ni tape las luces traseras del vehículo, ni sobresalga por los laterales más de lo que permite la normativa de circulación de vehículos. Al final del tubo flexible se instala la toma de muestra de partículas (30), en la cual se succiona gas al analizador de partículas (26).

Todos los datos obtenidos por los diferentes medidores, sensores y dispositivos van a parar a unas tarjetas de adquisición de datos (24) que los digitaliza y los transfiere en formato digital a un ordenador que con el software desarrollado los interpreta, realiza los cálculos pertinentes y entrega los informes y gráficas de las emisiones contaminantes y el consumo de combustible en función del tiempo.

EJEMPLO

En el caso utilizar el dispositivo en un vehículo turismo, el Conjunto Analizadores de gases (II) y el Sistema Autónomo de Alimentación de energía eléctrica (IV) van instalados dentro del maletero y/o en la parte trasera del vehículo a ensayar.

Asimismo, al tubo de escape del vehículo se le empalma un tubo flexible (35) que saldrá por el lateral del vehículo y subirá por la parte lateral trasera (izquierda o

derecha dependiendo de dónde se sitúe el tubo de escape) y se empalma con el Tubo de Muestreo (I) que estará adherido a la carrocería del vehículo o máquina por su parte exterior mediante unas ventosas (Figura 2).

5 Por la parte contraria del tubo de muestreo saldrá otro tubo flexible (36) hacía abajo por la parte lateral trasera contraria por el que ha subido, y se situará su salida por la parte baja del vehículo para expulsar los gases de escape analizados de una forma adecuada.

10 Todas los cables de señal y las mangueras de las líneas de presión que salen del Tubo de muestro, así como las líneas fría (21) y caliente (18) entran al habitáculo del vehículo por una de las ventanillas laterales.

La realización preferente de la invención descrita utiliza los siguientes equipos comerciales:

- Medidor de relación aire / combustible (17): ETAS modelo LA4.
- 15 – Medidor de concentración de NO_x y O₂ (16): HORIBA modelo Mexa 720, con sensor de óxido de zirconio.
- Unidad electrónica para medida de señal de temperatura (28): marca PMA, modelo UNIFLEX RISO, termopar tipo K.
- Filtro decantador para la línea fría (9): Filtro de la marca PARKER, modelo 58N.
- Bomba de la línea fría (10): Bomba de diafragma de la marca SIGNAL, modelo 20 327983.
- Medidor de concentración de HC (15): Medidor por ionización de llama de la marca MESS ANALYSENTECHNIK GMBH, modelo Thermo FID PT.
- Unidad electrónica de medida de presión absoluta (29): Sensor de presión inductivo de la marca BD SENSORS, modelo DPS100-200-B100-2-3-B-00Y-0- 25 000.
- Unidad electrónica de medida de presión diferencial (23): Sensor de presión inductivo de la marca BD SENSORS, modelo DPS100-200-050-2-3-5-Y00.
- Medidor NDUV de concentración de NO/NO₂ (14): Marca SENSORS, modelo AGM 400.

- Un medidor de concentración de CO₂ (13) y CO (12) de la marca SIGNAL modelo 9000 MGA, cuya técnica de medida utilizada es vía infrarrojos no dispersivos.
- Para la línea caliente (20) se utiliza una manguera calefactora marca ELTHERM modelo ELH/AIW-200°C.
- Medidor de concentración en masa de partículas (26): Marca MAHA, modelo MPM4 mediante Laser Light Scattering Photometry.
- Las tarjetas de adquisición de datos (24) son marca National Instruments modelo NI USB-6211
- Medidor de velocidad por efecto doppler marca GMH Engineering, modelo DRS1000.
- Tacómetro universal marca Centralauto, modelo TB 8600.

APLICACIÓN INDUSTRIAL

- 15 Los diseñadores de motores buscan cumplir los límites de emisiones marcados por las normativas, pero cada vez les resulta más importante, también, controlar la fiabilidad y durabilidad de los sistemas anticontaminación de los motores y su comportamiento en las condiciones reales de utilización, no las del laboratorio. Además, los expertos en control de la contaminación y las autoridades implicadas,
- 20 demandan datos reales, medidos en condiciones reales de uso para la toma de decisiones regulatorias o políticas.

- Por lo tanto, el mercado de sistemas de medida de emisiones contaminantes con equipos embarcados a bordo de vehículos y maquinaria en general está en claro crecimiento movido por la cada vez más estricta normativa de reducción de
- 25 emisiones contaminantes en el sector de los vehículos de transporte que se está ahora extendiendo a otros motores de maquinaria de obras públicas, ferroviarios, tractores y maquinaria agrícola, etc.

- Las empresas interesadas en esta invención son las que proveen y suministran equipos de ensayos y de laboratorio en los sectores del transporte, del control de
- 30 emisiones y de investigación y desarrollo. Los clientes de dichas empresas son centros de investigación y desarrollo, centros tecnológicos, universidades y unidades de investigación y desarrollo de los fabricantes de motores, vehículos y

maquinaria en general equipada con motores de combustión interna, que deberán disponer de este tipo de equipos en los próximos años. Con este equipo podrían aportar a sus clientes un sistema menos costoso que los actualmente existentes y con la posibilidad de aplicación universal a un gran número de vehículos diferentes.

5

Referencias numéricas en los dibujos:

- I Tubo de muestreo de gases, incluye tomas de muestra para los analizadores (2, 8, 30), sondas de medida de NO_x (3), y relación aire/combustible (4) y un caudalímetro para gases con alto contenido de humedad y partículas (5, 6 y 7)
- 10
- II Conjunto de analizadores de gases, incluye analizadores de CO, CO_2 , NO/ NO_2 , HC, masa total de partículas (12, 13, 14, 15 y 26 respectivamente), unidades electrónicas de medida de relación aire/combustible (17), NO_x (16) y caudal (28, 23 y 29)
- 15
- III Sistema de adquisición y registro de señales
- IV Sistema autónomo de alimentación eléctrica, incluye baterías e inversores
- V Sistema de registro de variables dinámicas del coche, incluye medida de velocidad por radar (27), medida de régimen por vibración (31), sensor de temperatura exterior (32), sensor de temperatura de refrigerante (33) y sensor de temperatura de aceite (34)
- 20
- 1 Laminador de flujo instalado en el tubo de muestreo (I)
- 2 Toma de muestra de gas a alta temperatura. Componente instalado en el tubo de muestreo (I) a través del cual se recoge de forma continua un pequeño caudal de gases para ser analizado por el equipo analizador de HC (15)
- 25
- 3 Sonda para medida de concentración de NO_x (detector electroquímico de NO_x), instalado en el tubo de muestreo (I)
- 4 Sensor de oxígeno universal de relación aire/combustible (UEGO-Sonda lambda), instalado en el tubo de muestreo (I)
- 5 Toma de presión sensible (absoluta) en el interior del tubo de muestreo (I)
- 30
- 6 Sensor de Temperatura de los gases de escape que circulan por el interior del tubo de muestreo (I)

- 7 Toma de presión de remanso (presión de estanqueidad) de los gases que circulan por el interior del tubo de muestreo (I)
- 8 Toma de muestra de gases a baja temperatura. Componente instalado en el tubo de muestreo (I) a través del cual se recoge de forma continua un pequeño caudal de gases para ser analizado por los equipos analizadores de CO (12), CO₂ (13) y NO/NO₂ (14)
- 9 Intercambiador de calor para enfriamiento de los gases muestreados a través de la toma de muestra de baja temperatura (8).
- 10 Bomba de vacío de desplazamiento positivo, para mantener flujo constante de gases muestreados a los analizadores de CO (12), CO₂ (13) y NO/NO₂ (14)
- 11 Válvula de aguja, para regulación de presión de los gases muestreados a baja temperatura, hace parte de la línea de muestreo a baja temperatura (21)
- 12 Analizador de CO, que mide la concentración de CO en el gas muestreado a través de la toma de muestra de gases a baja temperatura (8)
- 15 13 Analizador de CO₂, que mide la concentración de CO₂ en el gas muestreado a través de la toma de muestra de gas a baja temperatura (8)
- 14 Analizador de NO/NO₂, que mide la concentración de NO/NO₂ en el gas muestreado a través de la toma de muestra de gas a baja temperatura (8)
- 20 15 Analizador de HC, que mide la concentración de HC en el gas muestreado a través de la toma de muestra de gas a alta temperatura (2)
- 25 16 Unidad electrónica de la sonda de NO_x, recibe la señal de la sonda de NO_x (3) instalada en el tubo de muestreo (I) y entrega salida de señal correspondiente a la concentración de NO_x en los gases que circulan por el tubo de muestreo (I)
- 17 Unidad electrónica del sensor de relación aire/combustible (sonda lambda), recibe la señal de la sonda lambda (4) instalada en el tubo de muestreo (I) y entrega salida de señal correspondiente a la relación aire/combustible que tienen los gases que circulan por el tubo de muestreo (I)
- 30 18 Línea de muestreo de gas a alta temperatura, para conducción de los gases muestreados en la toma de muestra de alta temperatura (2) hacia el equipo analizador de HC (15)

- 19 Filtro de gas línea calefactada. Filtro con calefacción por resistencia eléctrica y aislado térmicamente, para retención de partículas
- 20 Manguera calefactada por resistencia eléctrica, incluye regulador de temperatura externo
- 5 21 Línea de muestreo de gas a baja temperatura, para conducción de los gases muestreados en la toma de muestra de baja temperatura (8) hacia los analizadores de CO (12), CO₂ (13) y NO/NO₂ (14)
- 22 Filtro de gas para retención de partículas y humedad en la línea fría (21), incluye sistema de drenaje manual
- 10 23 Sensor de presión diferencial para medida de caudal. Recibe las señales de presión de remanso (7) y de presión sensible (5) de los gases que circulan a través del tubo de muestreo (I)
- 24 Tarjetas de adquisición de datos. Elemento accesorio del ordenador a través del cual se reciben todas las señales eléctricas de los diferentes analizadores y
- 15 sensores que conforman el dispositivo
- 25 Ordenador portátil, para registro en tiempo real de todas las variables
- 26 Equipo medidor de concentración másica de partículas. Determina la concentración en masa de partículas en suspensión que se encuentran presentes en los gases a la salida de la manguera flexible para evacuación de gases (36)
- 20 27 Sensor de velocidad del vehículo, tipo sonda radar
- 28 Unidad electrónica medida de temperatura de los gases que circulan por el tubo de muestreo (I). Recibe señal del sensor de temperatura de gases (6)
- 29 Sensor de presión absoluta de los gases para medida de caudal. Recibe la señal de presión sensible (5) del gas que circulan a través del tubo de muestreo (I)
- 25 30 Toma de muestra partículas. Elemento instalado a la salida de la manguera flexible para evacuación de gases (36) a través del cual se recoge de forma continua un pequeño caudal de gases para ser analizado por el equipo medidor de concentración másica de partículas (26)
- 31 Sensor de régimen de giro de motor. Constituido por un sensor de vibración
- 30 que se adhiere magnéticamente al motor

- 32 Sensor de temperatura para medida de temperatura atmosférica. Instalado en el exterior del habitáculo del vehículo
- 33 Sensor de temperatura para medida de temperatura del refrigerante del motor. Instalado en el exterior de uno de los conductos del circuito de refrigeración del motor
- 5
- 34 Sensor de temperatura de medida de la temperatura de aceite del motor. Instalado en el sitio de la varilla de medida de nivel de aceite del motor
- 35 Manguera flexible de alta temperatura para conexión del tubo de muestreo (I) al tubo de escape del vehículo
- 10 36 Manguera flexible de alta temperatura para evacuación de gases de escape, conectado a la salida del tubo de muestreo (I)

REIVINDICACIONES

- 5 1. Un dispositivo universal, no intrusivo, de medida en tiempo real de emisiones contaminantes de motores, embarcable en vehículos **caracterizado por que** comprende:
- un tubo de muestreo (I),
 - un conjunto de analizadores de gases (II) configurado para medir CO, CO₂, NO/NO₂/NO_x, HC, relación aire/combustible y partículas,
 - 10 - un sistema de registro de variables dinámicas (V) configurado para medir la temperatura ambiente, la velocidad del vehículo, el régimen de giro y la temperatura del motor,
 - un sistema adquisición y registro de señales (III).
- 15 2. Dispositivo según la reivindicación 1, caracterizado por que el tubo de muestreo (I) es conectable al tubo de escape del motor y además comprende un laminador de flujo (1) a la entrada seguido de un tramo recto, dos tomas para muestreo de gases (5,7) y un caudalímetro.
- 20 3. Dispositivo según la reivindicación 2, caracterizado por que en el tubo de muestreo (I), el laminador de flujo (1) comprende un tubo exterior y una serie de tubos capilares paralelos que cubre sustancialmente la totalidad del área transversal del tubo exterior.
- 25 4. Dispositivo según la reivindicación 2 o 3, caracterizado por que las tomas de muestreo de gases (2,8) comprenden un tubo ciego en forma de "L" que penetra hasta el centro del tubo de muestreo (I) de forma perpendicular a la superficie y cuya boca sellada queda enfrentada al flujo.
- 30 5. Dispositivo según la reivindicación 4, caracterizado por que entre el extremo sellado y el codo del tubo en forma de "L" existen una pluralidad de orificios laterales.
6. Dispositivo según la reivindicación 5, caracterizado por que un conjunto de orificios están deformados de forma contraria al flujo.
7. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones 2 a 6, caracterizado por que, el caudalímetro es tipo tubo de pitot y comprende una toma

independiente de presión de remanso (7), una toma múltiple de medida de presión sensible (5), un sensor de presión diferencial (23), un sensor de presión absoluta (29) y un sensor de temperatura (6).

- 5 8. Dispositivo según la reivindicación 7, caracterizado por que la toma múltiple de presión sensible (5) incluye al menos tres orificios sobre la superficie del tubo de muestreo, localizados de forma simétrica sobre un plano perpendicular al eje del tubo de muestreo (I) y alineado a la boca de la toma de presión de remanso (7).
- 10 9. Dispositivo según la reivindicación 8, caracterizado por que el tubo de muestreo (I) comprende al menos una pieza alojada en cada orificio de forma que internamente queda enrasada con la superficie interior del tubo de muestreo (I) y externamente se apoya sobre su superficie exterior.
- 15 10. Dispositivo según la reivindicación 9, caracterizado por que la pieza es acoplable a manguera que se unen entre sí por medio de piezas en forma de "T", formando un collarín igualación de presión alrededor del tubo de muestreo (I).
- 20 11. Dispositivo según la reivindicación 10, caracterizado por que el collarín de igualación de presión, es acoplable al tramo de la manguera que lleva la señal de presión sensible al sensor de presión diferencial (23) y de presión absoluta (29).
- 25 12. Dispositivo según la reivindicación 11, caracterizado por que la toma de presión de remanso (7) del caudalímetro está formada por un tubo en forma de "L" que penetra sustancialmente de manera perpendicular a la superficie del tubo de muestreo (I), de tal forma que la boca quede enfrentada al flujo y en el plano coincidente con el de la toma múltiple de presión sensible (5).
- 30 13. Dispositivo según la reivindicación 12, caracterizado por que los dos tramos de tubo en "L" forman sustancialmente un ángulo de 100°.
14. Dispositivo según una cualquiera de las reivindicaciones anteriores, caracterizado por que comprende además un sistema autónomo de alimentación eléctrica (IV).

FIG. 1

FIG. 2

FIG. 3

FIG. 4

FIG. 5