

## PROBLEMAS ASOCIADOS A LA MEDIDA DE EMISIONES MÁSCAS INSTANTÁNEAS EN MOTORES DE VEHÍCULOS

**N. Fonseca González\*, J. Casanova Kindelán**

\* Grupo de Motores Térmicos, E.T.S.I. INDUSTRIALES, Universidad Politécnica de Madrid, 28006 Madrid, España  
+34 913 364 219

[nfonseca@etsii.upm.es](mailto:nfonseca@etsii.upm.es)

**Resumen:** *Se ha desarrollado un equipo de medida de emisiones contaminantes de motores térmicos, embarcable en un vehículo, que mide la concentración, el caudal y todas las condiciones termodinámicas asociadas al flujo de escape en tiempo real.*

*Se discute la metodología empleada en la determinación de las emisiones máscas instantáneas, las totales y los factores de emisión, detallando por un lado la configuración física del caudalímetro, la frecuencia de muestreo, el registro de datos, y los cálculos. Y por otro, las correcciones sobre las concentraciones instantáneas por tipo de medida y dinámica propia de los analizadores es necesario realizar.*

*El trabajo se enfoca principalmente en los aspectos termodinámicos asociados, pero se discutirán los problemas físicos de este tipo de medidas: condensado, arrastre de partículas y oscilaciones del flujo.*

*Con objeto de ilustrar las dificultades encontradas y legitimar las soluciones adoptadas, se presentan y se discuten algunos resultados reales obtenidos en un motor en condiciones normales de funcionamiento, y los resultados de validación en base a medidas en banco de rodillos. Los resultados muestran la importancia del diseño físico del caudalímetro, de la precisión y rapidez de los analizadores y de la adecuada frecuencia de muestreo.*

**Palabras clave:** *emisiones contaminantes, medida de caudal, gases de escape, motores térmicos.*

## 1. INTRODUCCIÓN

Los vehículos son una de las mayores fuentes de gases causantes de polución y gases de efecto invernadero en las ciudades, razón por la cual, desde los 90's, ha cobrado gran importancia el desarrollo de equipos portátiles capaces de medir las emisiones en tráfico real, llamados PEMS (Portable Emissions Measurement Systems), como los desarrollados por Gao & Checkel (2007), Akard (2005), Dearth et.al (2005), Miyazaki et.al (2002), Lenaers et.al (2003), Vojtisek-Lom & Allsop (2001), Casanova-Kindelan (2004). Los PEMS permiten la obtención de datos de emisión en tráfico real que no pueden ser obtenidos en laboratorio y que permiten por lo tanto la elaboración de inventarios de emisiones realistas. El diseño de estos equipos tiene muchas restricciones como son el tamaño compacto, bajo peso, alta precisión, velocidad de respuesta y especialmente tienen que medir de forma muy precisa el caudal de escape, para poder determinar el flujo másico instantáneo de contaminantes (Gautam, et al., 2001).

## 2. DESCRIPCIÓN DEL EQUIPO DE ANÁLISIS DE GASES: MIVECO-PEMS

El Laboratorio de Motores Térmicos de la ETSI Industriales de la UPM ha desarrollado un equipo de medida de emisiones contaminantes que llamaremos MIVECO-PEMS (portable emission measurement system), desarrollado para vehículos de servicio pesado y ligero con motor de encendido provocado y de encendido por compresión. Este equipo permite medir de forma instantánea y en tráfico real las emisiones de CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC (hidrocarburos inquemados), O<sub>2</sub>, factor lambda, la temperatura y el caudal de gases de escape. El MIVECO-PEMS está formado por analizadores comerciales de alta velocidad de respuesta y un caudalímetro desarrollado especialmente para la medición de gases de escape de motores. Las señales generadas por cada uno de los analizadores se registran a una frecuencia de 10 Hz a través de un sistema de adquisición de datos. Para garantizar el funcionamiento autónomo, el MIVECO\_PEMS cuenta con dos conjuntos batería/inversor con capacidad de 420 A\_hr. En la figura 1 se muestra un esquema general del MIVECO-PEMS, y en la figura 2 se muestran un par de fotos del equipo instalado en un turismo.

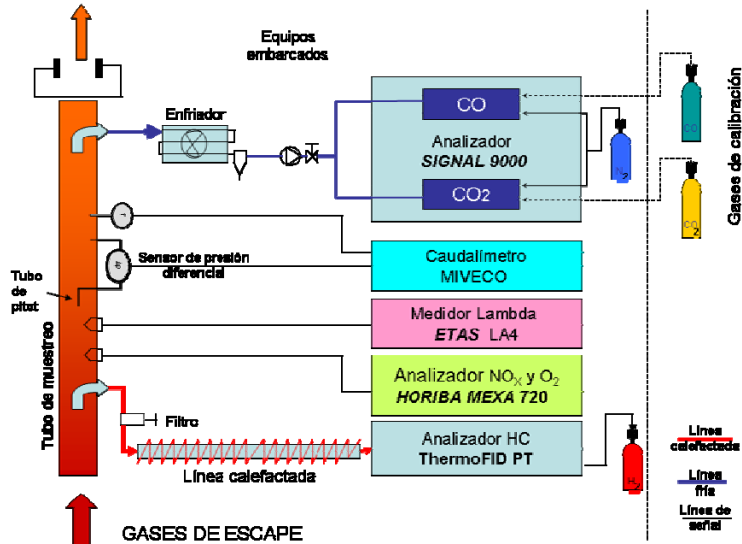


Figura 1- Configuración esquemática del sistema de medida de emisiones contaminantes – MIVECO-PEMS



Figura 2- Sistema de medida de emisiones contaminantes – MIVECO-PEMS

## 2.1. Analizadores de gas

El equipo de medida de emisiones MIVECO-PEMS está formado por dos analizadores del tipo infrarrojo no dispersivo para el CO<sub>2</sub> y CO, un analizador del tipo zirconio cerámico para el O<sub>2</sub> y NO<sub>x</sub>, un analizador de hidrocarburos inquemados (HC) de tipo ionización de llama y un medidor de lambda con sensor de corriente marginal de banda ancha, cuyas características técnicas se muestran en la siguiente tabla:

Tabla 1. Componentes del equipo MIVECO-PEMS.

Señal	Componente		Tipo de medida	Rango de medida	Tiempo de respuesta
	Marca	Modelo			
O <sub>2</sub>	HORIBA	MEXA 720	Sensor cerámico de zirconio	0-50% vol	T63: 0.7s
CO	SIGNAL	9000 MGA	NDIR (Infrarojo no dispersivo)	0-10000 ppm	T95: 15s
CO <sub>2</sub>	SIGNAL	9000 MGA	NDIR (Infrarojo no dispersivo)	0-20 % vol	T95: 15s
HC	MESS ANALYSENTECHNIK GMBH	Thermo FID PT	FID (Ionización de llama)	0-500000 mg/m <sup>3</sup>	T90: 0.5s
Lambda	ETAS GmbH	LA4	Sensor de corriente marginal de banda ancha.	0,7 - 32,7	2 ms
Differential pressure	BD SENSORS	DPS100	Sensor de presión inductivo	0-50 mbar	T90: 0.02s
Temperatura	UNIFLEX RISO	RISEX	Termopar tipo K	0-250 °C	<1s
NO <sub>x</sub> (motores gasoil)	HORIBA	MEXA 720	Sensor cerámico de zirconio	0-3000 ppm	T63: 0.7s
NO <sub>x</sub> (motores gasolina)	SENSORS	AGM 400	NDUV	0-10000 ppm	<1s

## 2.2. Caudalímetro

El caudalímetro está constituido por un tubo de Pitot desarrollado especialmente para medir gases con alto contenido de humedad, donde se evita que el condensado obstruya los conductos de presión, y por un medidor de presión diferencial con alta sensibilidad y alta velocidad de respuesta, capaz de detectar cambios de presión a una frecuencia de 1 kHz. Esta característica hace posible detectar los pulsos de caudal que ocurren en un motor en estado de ralentí. En la siguiente figura se muestra un esquema del caudalímetro.

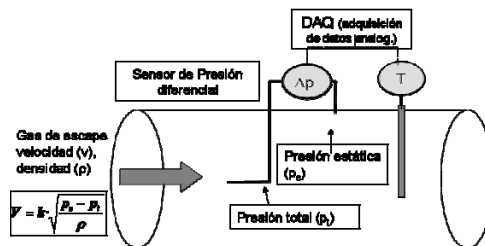


Figura 3- Configuración esquemática del caudalímetro - MIVECO

### 2.3. Tubo de muestreo y acondicionamiento de las muestras

Se diseñó y fabricó un tubo de muestreo, por donde se conducen los gases de escape antes de ser liberados a la atmósfera, con el fin de facilitar el montaje del equipo de análisis de gases en los diferentes vehículos. En el tubo de muestreo se sitúan sondas que miden directamente en el caudal de escape, la toma de muestra fría (para el analizador de CO y CO<sub>2</sub>), la toma de muestra calefactada (para el analizador de HC), el tubo de Pitot y el medidor de temperatura. Así mismo el tubo de muestreo incluye un enderezador de flujo para evitar la formación de vórtices y hacer más fiable la medida de caudal, como me muestra en la siguiente figura.

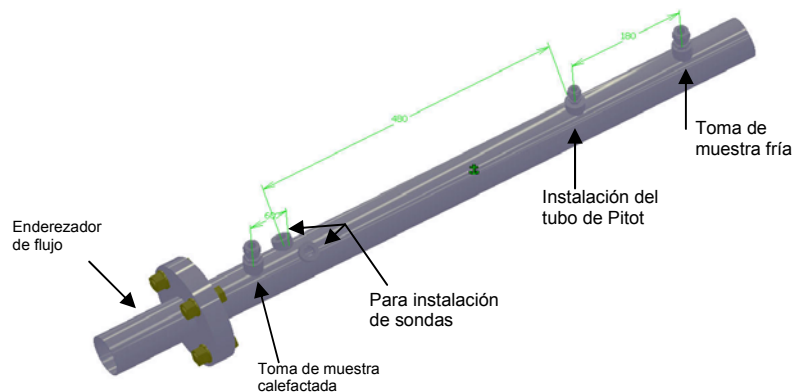


Figura 4- Tubo de muestreo.

Como se indicó anteriormente, para el análisis de las emisiones de HC se requiere que la muestra se mantenga a una temperatura elevada para evitar la condensación de los hidrocarburos, razón por la cual es necesario conducir esta muestra a través de una manguera calefactada con control de temperatura. Por otro lado, la muestra para el analizador de CO y CO<sub>2</sub> debe entrar al analizador seca y a una temperatura menor de 50°C, para lo cual se diseñó un sencillo intercambiador de calor que incluye un filtro coalescente que retiene la humedad.

## 3. METODOLOGÍA DE MEDIDA

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 CO<sub>2</sub> por tipo de medida, el cálculo de las emisiones instantáneas, cálculo de emisiones totales y factores de emisión.

### 3.1. Adquisición de datos

Para la adquisición de datos se usa una tarjeta National Instruments modelo USB6211 a una frecuencia de muestreo de 1 kHz y se registran los datos a una frecuencia de 10Hz porque como se explicará en el apartado del cálculo de caudal, es necesario aumentar la frecuencia de muestreo para detectar la oscilación de caudal que se presenta durante el ralenti. Los datos registrados cada 0,1s corresponden al valor promedio de las señales medidas a 1 kHz.

### 3.2. Cálculo del caudal

Múltiples investigaciones se han realizado con el fin de determinar la forma adecuada de medir el caudal de gases de escape de motores, entre ellos los realizados por Nakamura, et. Al (2005). En este estudio se trata en profundidad el problema de la medida del flujo pulsátil y especialmente de la medida del flujo inverso, en la cual nos basamos para el desarrollo del caudalímetro MIVECO. Como se anticipó en el apartado 2.2, el caudal se calcula a partir de la presión diferencial medida en el tubo de Pitot y de la temperatura medida, como se muestra en las siguientes ecuaciones.

$$\dot{q} \left[ \frac{m^3}{s} \right] = A [m^2] * v \left[ \frac{m}{s} \right] \quad v \left[ \frac{m}{s} \right] = S \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p [Pa]}{\rho [kg/m^3]}} \quad (1) \quad (2)$$

$$\Delta p [Pa] = (p_e - p_t) [Pa] \quad \rho_{exh} \left[ \frac{kg}{m^3} \right] = \frac{p_e [Pa] * M_{exh}}{R * T [K]} \quad (3) \quad (4)$$

donde  $q$  es el caudal de gases de escape,  $A$  es el área transversal del tubo de muestreo,  $v$  es la velocidad del gas,  $S$  el factor del tubo de Pitot obtenido experimentalmente,  $\Delta p$  la presión diferencial medido directamente del tubo de Pitot,  $p_e$  la presión estática,  $p_t$  la presión total,  $\rho_{exh}$  la densidad de los gases de escape,  $M_{exh}$  el peso molecular del gas de escape,  $R$  la constante universal de los gases ideales y  $T$  la temperatura del gas.

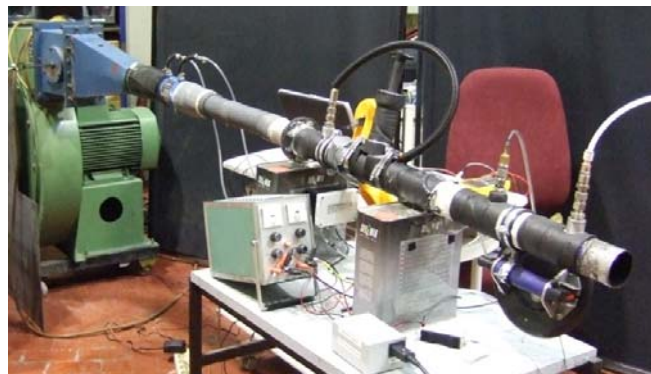


Figura 5- Montaje para la determinación del factor del tubo de Pitot.

Para la determinación del factor del tubo de Pitot S, se utilizó un soplante centrífugo y un medidor de caudal de flujo laminar calibrado marca MERIAM Instrument modelo 50MH10-3NT, como se observa en la figura siguiente:

La calibración realizada muestra que el factor del tubo de Pitot no es una constante, sino que varía de forma lineal con respecto a la velocidad del gas. En la siguiente gráfica se observa el grado de ajuste de la calibración realizada.

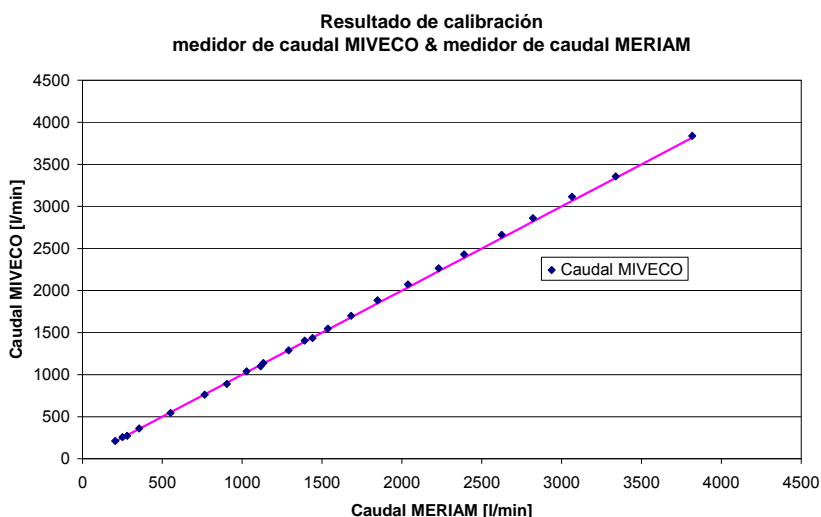


Figura 6- Resultados de calibración del caudalímetro MIVECO

La frecuencia de muestreo de todas las señales medidas se fijó inicialmente en 10 Hz, por ser lo suficientemente alta para apreciar adecuadamente los transitorios que ocurren en tráfico urbano y lo suficientemente baja, para que los ficheros generados no superen los 4 MB / hora de ensayo. Se observó que para la medida de caudal esta frecuencia de muestreo es insuficiente, por lo cual se hicieron pruebas de adquisición a 1 KHz que permitió ver completamente la onda de caudal que ocurre durante el ralenti por el consecutivo abrir y cerrar de la válvulas de escape del motor (la frecuencia de oscilación del caudal para un motor de 4 tiempos es de aprox. 28 Hz= 2 x rpm en ralenti). El caudal así medido se muestra en la gráfica siguiente (caudal real).

Y puesto que registrar a 1 kHz no es viable por el volumen de datos que se generarían durante los ensayos reales en calle, se compararon diferentes formas de registrar el caudal a 10 Hz. La primera fue, haciendo el muestreo de la presión dinámica a 10 Hz y calculando el caudal a esa frecuencia (en la gráfica "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 en la gráfica "Caudal prom. Calculado 10 Hz", esta forma de medir el caudal es errónea, debido a que la relación entre la presión dinámica y el caudal no es lineal. 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 gráfica "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.

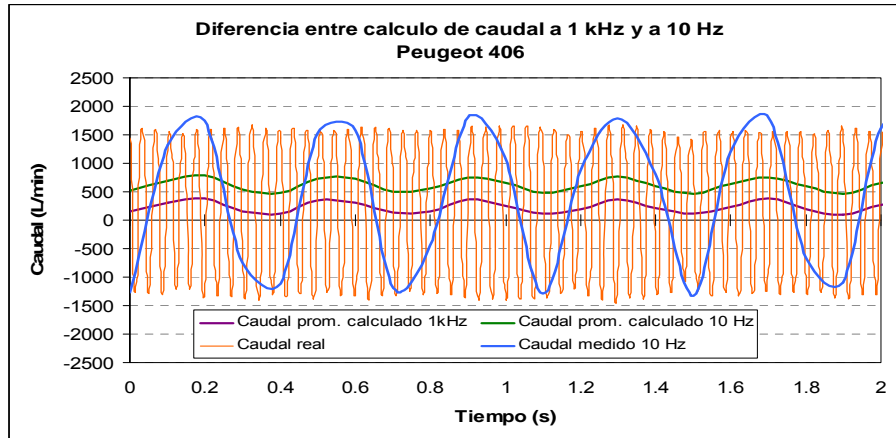


Figura 7- Gráfica de comparación de medida de caudal a diferente frecuencia

### 3.3. Sincronización de señales

Con el fin de sincronizar las diferentes señales de los analizadores que conforman el equipo MIVECO-PEMS, se determinó experimentalmente el tiempo de retardo y el de respuesta para cada una de las señales leídas por el sistema de adquisición de datos, cuyos resultados se muestran en la figura 8. El tiempo de retardo determinado se utilizó para la sincronización de las señales por medio de un programa desarrollado sobre LabView®.

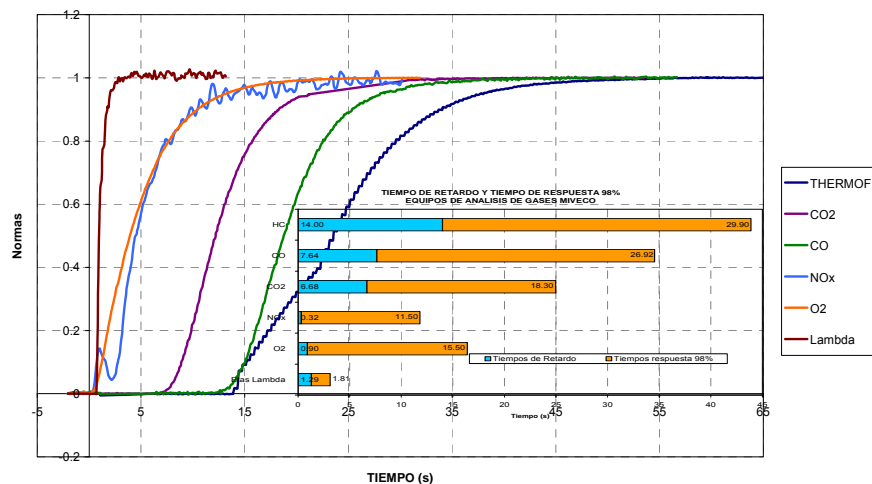


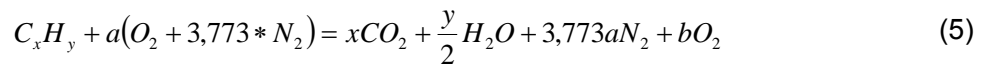
Figura 8- Respuesta escalón unitario, tiempo de respuesta y tiempo de retardo de los analizadores del MIVECO-PEMS

El tiempo de respuesta causa una distorsión de las señales medidas, que por medio de un estudio de de-convolución de señales se podría llegar a corregir. De todas formas, para el analizador de CO y CO<sub>2</sub>, se ha cuantificado el grado de distorsión que ocasiona el tiempo de retardo, pues como se dirá más adelante, el consumo en el equipo MIVECO-PEMS puede ser calculado de dos formas independientes, una con base en las emisiones de CO y CO<sub>2</sub> y otra con base en la medida del factor lambda. El medidor ETAS Lambda al tener un tiempo de respuesta muy corto, se puede considerar como equipo de referencia y de esta forma con base en los resultados de la validación en el INTA, que más adelante

se expondrán, se determina que el error máximo que el tiempo de retardo del equipo SIGNAL genera en las emisiones totales y factores de emisión es sólo del 5%.

### 3.4. Corrección de concentraciones instantáneas para motores de encendido por compresión (diesel) (Turns, 2006)

Como el equipo MIVECO de medida de CO y CO<sub>2</sub> (equipo SIGNAL) 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 filtro que retiene toda la humedad y por lo tanto, la concentración de emisiones que mide el equipo SIGNAL no es la real (y la llamaremos concentración en mezcla seca). La concentración real (a la que llamaremos concentración en mezcla húmeda) se calcula con base en la estequiometría, como se muestra en la ecuación 5. Y así, para corregir adecuadamente las concentraciones de los gases de la línea fría se calculan las moles de gas de escape en las distintas condiciones de seco y húmedo y a partir de estos valores se calcula la fracción molar real de CO y CO<sub>2</sub>:



Siendo el número de moles de la mezcla húmeda  $N_{mix,wet}$  y el número de moles de la mezcla seca  $N_{mix,dry}$  entonces:

$$\frac{N_{mix,wet}}{N_{mix,dry}} = 1 + \frac{y}{2 * (4,76 * a - y/4)} \quad (6)$$

Donde la cantidad de aire admitido a (moles de aire por mol de combustible) se puede calcular conociendo la composición química del combustible y con base en la medida de la concentración de oxígeno  $\chi_{O_2}$  (fracción molar en base húmeda) en los gases de escape.

$$a = \frac{x + (1 - \chi_{O_2,wet}) * y/4}{1 - 4,76 * \chi_{O_2,wet}} \quad (7)$$

De esta forma, la fracción molar corregida de cualquiera de los componentes de los gases de escape responderá a la siguiente ecuación:

$$\chi_{i,wet} = \chi_{i,dry} * \frac{N_{mix,dry}}{N_{mix,wet}} \quad (8)$$

### Corrección de concentraciones instantáneas para motores de encendido provocado (gasolina) (CFR, 2005)

Para el cálculo de las concentraciones medidas por la línea fría hay que hacer correcciones debidas a la humedad eliminada. Donde:

$$W_{CO} = k * D_{CO} \quad W_{CO_2} = k * D_{CO_2} \quad (9)$$

Donde  $W_X$  es la concentración del componente X en base húmeda en los gases de escape [ppm o %Vol] y  $D_X$  en la concentración del componente X en base seca en los gases de escape [ppm o %Vol]. La constante  $k$  se puede calcular con base en las concentraciones de CO y CO<sub>2</sub> en base seca de la siguiente manera:



$$k = \frac{1}{1 + 0,005 * (D_{CO} + D_{CO_2}) * \alpha - 0,01 D_{H_2}} \quad (10)$$

Y la concentración de hidrógeno en base seca se puede calcular a partir de la composición del combustible y de las concentraciones de CO y CO2 en base seca, así:

$$D_{H_2} = \frac{0,5 * \alpha * D_{CO} * (D_{CO} + D_{CO_2})}{D_{CO} + 3 * D_{CO_2}} \quad (11)$$

Donde  $\alpha$  es la relación Hidrógeno – Carbón y  $\beta$  es la relación Oxígeno – Carbón del combustible. Para la gasolina  $\alpha = 1,85$  y  $\beta = 0.0145$ .

### 3.5. Cálculo de emisiones másicas instantáneas

Para ello se necesita el peso molecular de los diferentes gases, que denotaremos por  $M_x$ . Las ecuaciones utilizadas para calcular las emisiones másicas instantáneas (denotadas de forma genérica como  $x$ ) del CO, CO<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub>, HC y O<sub>2</sub> con base en la concentración medida en %Vol o en ppm son las siguientes:

$$\dot{m}_x \left[ \frac{g}{s} \right] = \frac{\%x}{100} \left[ \frac{m^3_x}{m^3_{esc}} \right] * \dot{q} \left[ \frac{m^3_{esc}}{s} \right] * \frac{p_e}{RT} \left[ \frac{mol}{m^3_x} \right] * M_x \left[ \frac{g_x}{mol_x} \right] \quad (12)$$

$$\dot{m}_x \left[ \frac{g}{s} \right] = \frac{ppm_x}{10^6} \left[ \frac{m^3_x}{m^3_{esc}} \right] * \dot{q} \left[ \frac{m^3_{esc}}{s} \right] * \frac{p_e}{RT} \left[ \frac{mol}{m^3_x} \right] * M_x \left[ \frac{g_x}{mol_x} \right] \quad (13)$$

### 3.6. Cálculo de consumo instantáneo

El consumo en el equipo MIVECO-PEMS, puede ser calculado de dos formas de manera independiente, la primera basada en el factor lambda y la segunda basada en las medidas de CO y CO<sub>2</sub>.

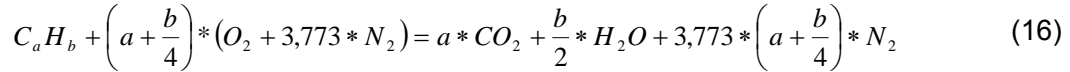
El cálculo del consumo instantáneo basado en la medida del factor lambda ( $\lambda$ ), se basa en el hecho de que este factor es el inverso del dosado relativo, el cual se define de la siguiente forma:

$$\lambda = \phi^{-1} = \frac{\left( \frac{A}{F} \right)_{INS}}{\left( \frac{A}{F} \right)_{EST}} \quad (14)$$

siendo  $A$  el caudal másico de aire y  $F$  el caudal másico de combustible, y representando los subíndices  $INS$ , instantáneo y  $EST$ , estequiométrico. Por lo tanto, para cualquier combustible de la forma  $C_aH_b$  se tiene que el peso molecular del combustible será:

$$M_{CaHb} = 12,011 * a + 1,008 * b \quad (15)$$

Además la estequiometría de la reacción de combustión será:



de donde se obtiene que la relación aire/combustible en reacción estequiométrica es:

$$\left(\frac{A}{F}\right)_{EST} = \frac{34,56 * (4 + y)}{12,011 + 1,008y} \quad \text{donde } y = \frac{b}{a} \quad (17)$$

Con esto y el balance de masa  $\dot{m}_a + \dot{m}_f = \dot{m}_{esc}$  se tiene que:

$$\dot{m}_f = \frac{\dot{m}_{esc}}{1 + \lambda * \left(\frac{A}{F}\right)_{EST}} \left[\frac{g}{s}\right] \quad (18)$$

Donde el caudal másico de escape se calcula a partir del caudal volumétrico medido y la densidad calculada a la presión absoluta y a la temperatura de los gases de escape.

$$\dot{m}_{esc} = q_{esc} * \rho_{esc} \left[\frac{g}{s}\right] \quad (19)$$

La segunda forma de calcular el consumo instantáneo 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<sub>2</sub> principalmente y de CO, HC y partículas. En los motores de gasoil, casi el 99,7% de las moléculas de carbono salen en forma de CO<sub>2</sub> y sólo un 0,2% en forma de CO y menos de 0,1% sale en forma de HC más partículas. Por lo tanto, despreciando los HC y las partículas, el consumo instantáneo  $\dot{V}_f$  se puede calcular sabiendo que 1 lt de gasoil equivale a 2650,83 g CO<sub>2</sub> y 1 lt de gasoil equivale a 1689,67 g de CO, y por lo tanto:

$$\dot{V}_f \left[\frac{lt_{gasoil}}{s}\right] = \frac{\dot{m}_{CO_2} \left[\frac{g_{CO_2}}{s}\right]}{2650,83 \left[\frac{g_{CO_2}}{lt_{gasoil}}\right]} + \frac{\dot{m}_{CO} \left[\frac{g_{CO}}{s}\right]}{1689,67 \left[\frac{g_{CO}}{lt_{gasoil}}\right]} \quad (20)$$

### 3.7. Cálculo de emisiones totales y factores de emisión

Las emisiones totales y el consumo total se calculan por medio de una integración discreta de las emisiones instantáneas y del consumo instantáneo respectivamente, donde  $X$  es la emisión total en g y  $\Delta t$  es el tiempo de muestreo, como se expresa en la siguiente ecuación:

$$X = \Delta t \cdot \sum_{i=0}^N m_x \quad (20)$$

El factor de emisión  $FE$  de cada una de las emisiones estudiadas es igual a la emisión total del recorrido  $X$  dividido en la distancia recorrida  $d$  en km.

$$FE_x = \frac{X[g]}{d[km]} \quad (21)$$

## 4. RESULTADOS

#### 4.1. Validación física

Los principales problemas que se han presentado en el desarrollo de este equipo han sido los relativos a la medida del caudal, debido a la presencia de condensado, arrastre de partículas y oscilación del flujo de gas.

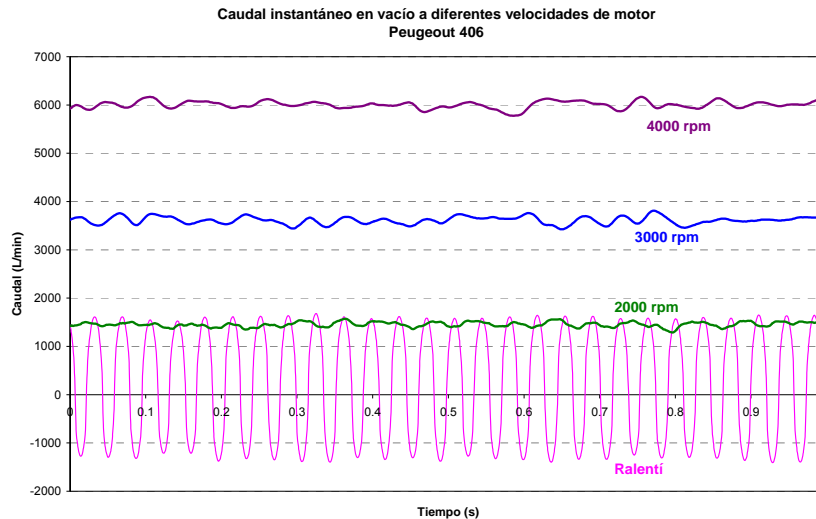


Figura 9- Gráfica de caudal instantáneo medido con caudalímetro MIVECO. Turismo Peugeot 406 Diesel 2L.

Inicialmente se utilizó un caudalímetro comercial tipo Pitot, que se calibró correctamente en varias condiciones de flujo estacionario generadas por medio de un soplante centrífugo y con base a un medidor de caudal calibrado marca MERIAM. Tras los primeros ensayos de validación en banco de motor, se detectó que la medida del caudalímetro comercial con gases reales de escape de motor no era adecuada. Y después de múltiples ensayos y de volver a comprobar la calibración del caudalímetro con el equipo de referencia MERIAM, se llegó a la conclusión de que el problema de la medida de caudal por una parte estaba en la configuración física del tubo de Pitot convencional, pues favorece la formación de gotas de condensado y la acumulación de partículas que se quedan atrapadas dentro de los tubos concéntricos que lo forman, distorsionando la señal de presión que se mide. Por otra parte, se demostró que el caudalímetro comercial no tiene la resolución adecuada para medir las oscilaciones reales del caudal de escape por tener un tiempo interno de muestreo de 1 segundo frente a una frecuencia real de oscilación de caudal a ralentí que es de 28 Hz. Razón por la cual se hizo necesario diseñar un tubo de Pitot, que no se obstruyera a pesar del condensado que se pueda generar ni de las partículas que se puedan depositar. Adicionalmente fue necesario buscar un medidor de presión diferencial capaz de medir con precisión y con alta velocidad de respuesta la oscilación de caudal que presenta los gases de escape de motores de combustión interna. En la figura 9 se muestra el caudal real de gases de escape de un turismo diesel Peugeot 406 2L, medidos con el caudalímetro desarrollado MIVECO.

#### 4.2. Validación de resultados

Con el fin de comprobar el grado de exactitud de las medidas, se hicieron pruebas en el Banco de Rodillo del Centro de experimentación y Certificación de vehículos del INTA,

similar a las realizadas por Gierczak et.al, (2007). La validación se hizo con el fin de comprobar la repetitividad de las medidas y calibrar y/o comprobar los resultados obtenidos con el equipo de medida de emisiones desarrollado por nosotros con respecto a equipos homologados de medida de emisiones.

Para los ensayos de validación se utilizó un coche Peugeot 406, con motor diesel 2lt de propiedad del laboratorio de motores térmicos de la ETSII – UPM. Y los ensayos consistieron en llevar a cabo el ciclo europeo para homologación de coches (NEDC-New European Driving Cycle).

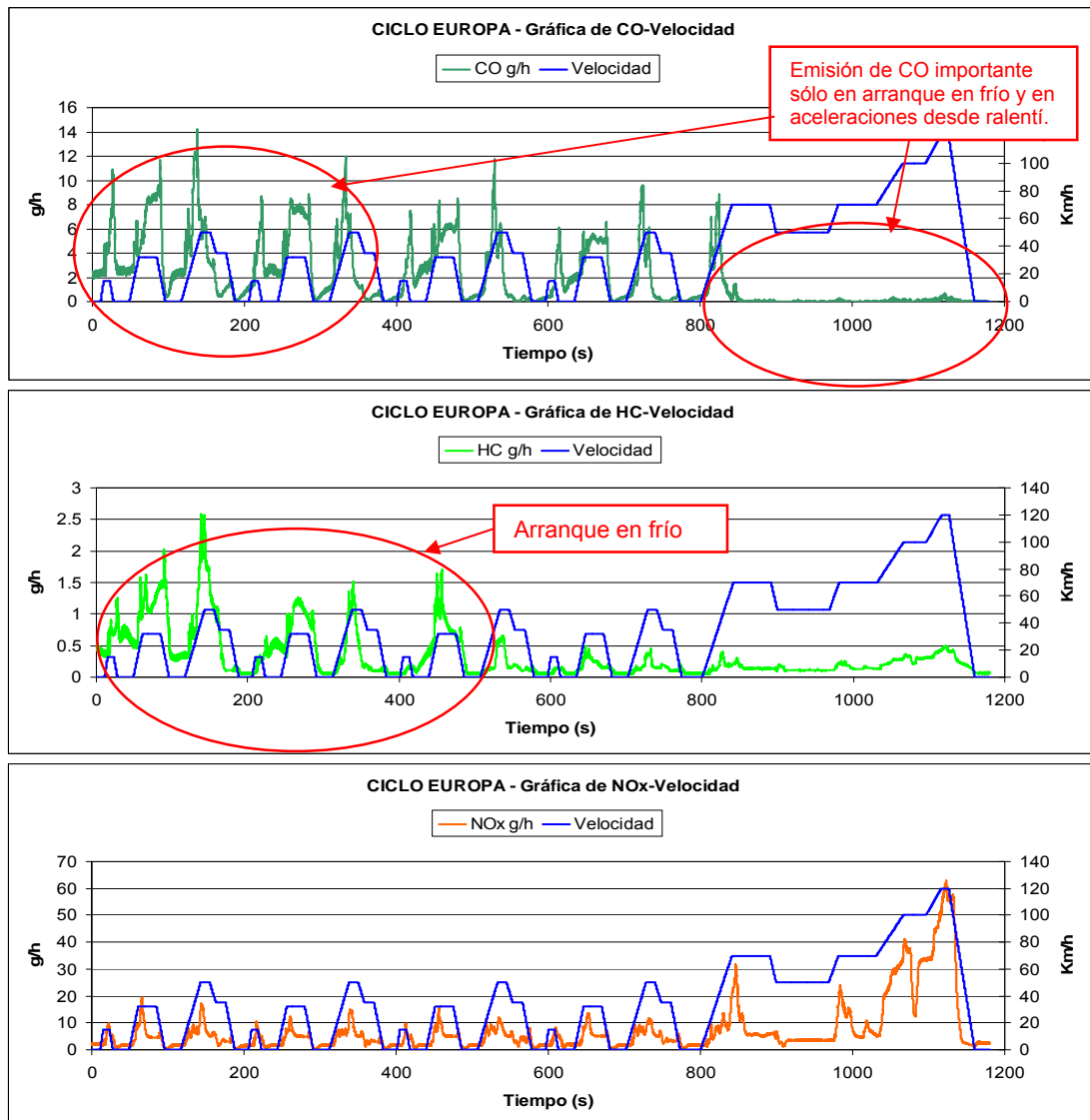


Figura 10- Gráficas instantáneas de emisiones en Ciclo Europa (NEDC -New European Driving Cycle)

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 los ensayos, y puesto que los ensayos no son exactamente iguales entre si -pues depende de la pericia del conductor para seguir estrictamente las indicaciones de

velocidad del ciclo- sólo ha sido posible comparar los valores promedio en un intervalo de confianza del 95%, como se muestra en la figura 11.

De los Ciclos Europa medidos se extrajeron los mapas de emisiones para los tramos urbanos y el de carretera. Los resultados más importantes se muestran en las gráficas de la figura 10. Estos gráficos de consumo y de emisión son comparados con la velocidad instantánea en cada punto del ciclo.

Los resultados de validación correspondientes al consumo total y factores de emisión se muestran en las siguientes gráficas. Con respecto al consumo total, se muestran los valores promedio obtenidos con base en el cálculo en el factor lambda -MIV LAMBDA- y con base en las emisiones de CO + CO<sub>2</sub> -MIVECO COx.

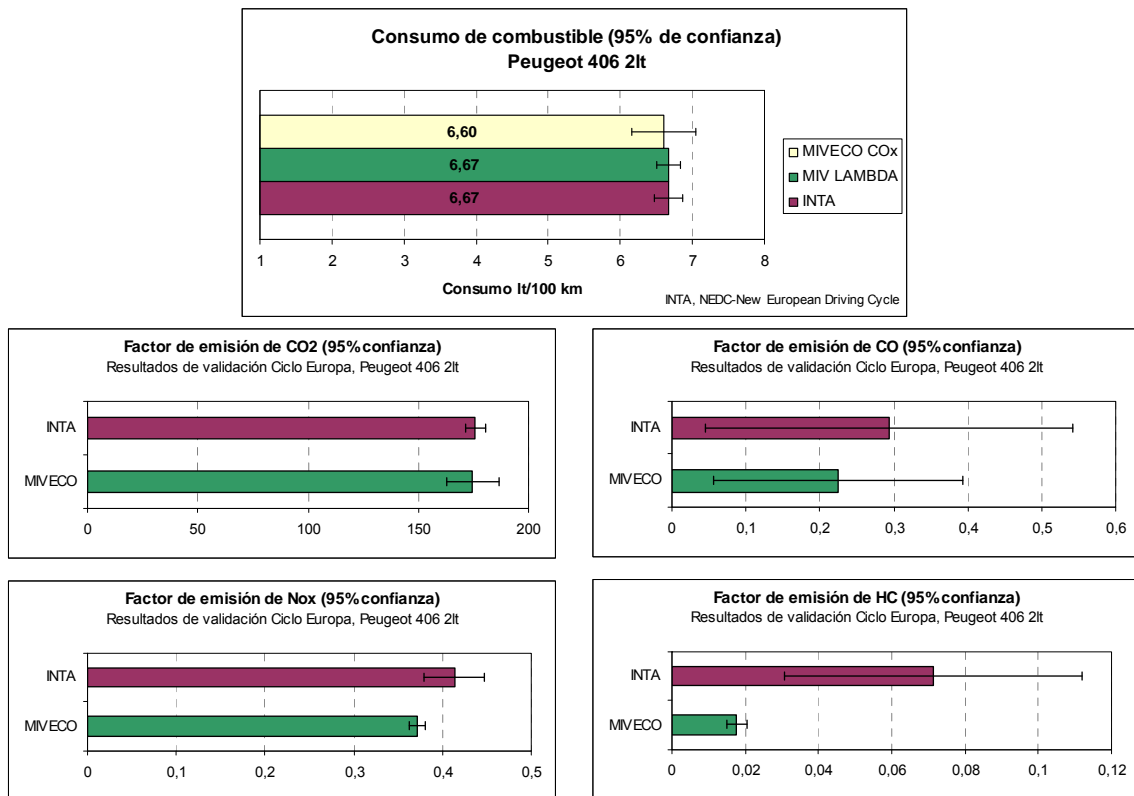


Figura 11- Resultados de validación del MIVECO-PEMS en el INTA en Ciclo Europa.

Como se observa en las anteriores gráficas, el consumo y el factor de emisión de CO<sub>2</sub> medido con el equipo MIVECO-PEMS se ajusta muy bien a los resultados del INTA, no obstante, a pesar de la misma variabilidad de los resultados del INTA, se observa que el factor de emisión de NO<sub>x</sub> medido con el equipo MIVECO es ligeramente inferior al medido por el INTA. En cuanto al CO y HC, se observa que la variabilidad de los resultados del INTA es muy alta, por lo que estas emisiones dependen fuertemente de la temperatura del motor, lo cual hace muy difícil garantizar la repetitividad entre un ensayo y otro, razón por la cual estos resultados no son concluyentes.

#### 4.3. Algunos resultados en tráfico real

Se realizaron pruebas en el *Circuito Madrid-UPM* (Casanova,2005) desarrollado y probado por más de 8 años por el grupo de Motores Térmicos de la ETSII-UPM, en

régimen de conducción suave y brusca, con el fin de comprobar la influencia del régimen de conducción sobre las emisiones y el consumo, en condiciones de tráfico real en la ciudad de Madrid.



Figura 12- Pruebas en tráfico real del equipo MIVECO-PEMS.

En la figura 13 se observa que, para un mismo coche, recorrido y congestión de tráfico, las emisiones de CO, NO<sub>x</sub> y HC pueden llegar a aumentar hasta en un 50% y el consumo hasta un 60% al conducir de forma brusca.

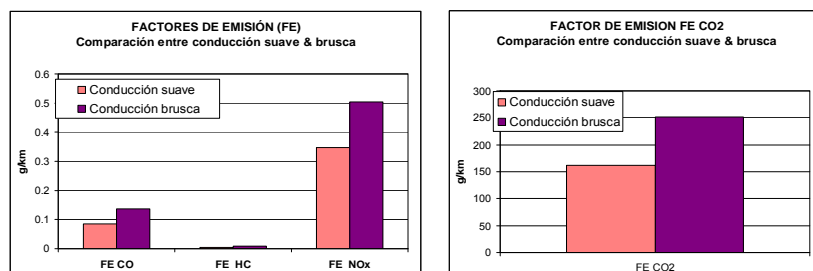


Figura 13- Resultados del estudio preliminar de la influencia de la agresividad en la conducción sobre el consumo y las emisiones.

## 5. CONCLUSIONES

La experiencia adquirida durante el desarrollo del equipo de medida de emisiones portátil MIVECO-PEMS, ha mostrado de que a pesar de que se encuentran analizadores de gas a nivel comercial con capacidad para medir concentraciones en continuo, la mayor dificultad radica en la medición del caudal de gases de escape, por la presencia de flujo inverso, pulsaciones de caudal a frecuencias de casi 30Hz, rápida variación de caudal y el alto contenido de humedad y partículas. Esto hace que el desarrollo de un caudalímetro capaz de medir un flujo con estas características constituya de por si un verdadero reto.

### Agradecimientos

Los autores agradecen la subvención económica recibida del Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Rural y Asuntos Marítimos de España, proyecto MIVECO

071/2006/3.13.2. Adicionalmente, reconocer las múltiples contribuciones de los diferentes estudiantes-becarios que han participado en el proyecto y en especial a David Nieto, por la realización de los diferentes ensayos de calibración y validación, y por el desarrollo del software de tratamiento de datos.

## 6. REFERENCIAS

- Akard M., Nakamura H., Shintaro A., Kihara N., Adachi M., 2006, Performance Results and Design Considerations for a New In-Use Testing Instrument, SAE paper 2005-01-3606.
- Casanova J., Ariztegui J. & Valdes M. (2004): Comparative study of two different on-board emission measurement systems. Proceedings of the World Automotive Congress, FISITA 2004. Barcelona, Spain 2004. Ref:F2004V053.
- 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. Portalegre, Portugal. 2005. p175.
- CFR, 2005, Raw emission sampling calculations – gasoline fuelled engines, Code of Federal Regulations, Title 40, charter I-C-PART 90.419.
- Dearth M.A., Butler J.W., Colvin A., Gierczak C.A., Kaberline S., Korniski T., 2005, SemtechD: The Chassis Roll Evaluation of a Commercial Portable Emission Measurement System (PEMS), SAE paper 2005-01-0673.
- Gao Y., Checkel M.D., 2007, Experimental Measurement of On-Road CO<sub>2</sub> Emission & Fuel Consumption Functions, SAE paper 2007-01-1610.
- Gautam M., Thompson G.J., Carder D. K., Clark N., Shade B. C., Riddle W. C., Lyons D. W., 2001, Measurement of In-Use, On-Board Emissions From Heavy-Duty Diesel Vehicles: Mobile Emissions Measurement System, SAE paper 2001-01-3643.
- Gierczak C., Korniski T., Wallington T. - Ford Motor Co. Ensfield C.- Sensors Inc., 2007, Simultaneous Real-Time Measurements of NO and NO<sub>2</sub> in Medium Duty Diesel Truck Exhaust, SAE paper 2007-01-1329.
- Lenaers G., Pelkmans L., Debal P., 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.
- Miyazaki T., Takada Y., Lida N., 2002, Development of On-Board System to Measure Running Condition and Actual NO<sub>x</sub> Emissions From Freight Vehicle, SAE paper 2002-01-0613.
- Nakamura H., Asano I., Adachi M. & 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.
- Turns S.R., 2006, An introduction to combustion: concepts and applications, Second Edition, Mc.GrawHill International Editions. ISBN:9780071260725.
- Vojtisek-Lom M., Allsop J.E., 2001, Development of Heavy-Duty Diesel Portable, On-Board Mass Exhaust Emissions Monitoring System With NO<sub>x</sub>, CO<sub>2</sub> and Qualitative PM Capabilitie, SAE paper 2001-01-3641.