

IMPACTO DE LA ALTITUD SOBRE LAS EMISIONES, PRESTACIONES Y DIAGNÓSTICO TERMODINÁMICO DE UN VEHÍCULO LIGERO EMPLEANDO DIESEL, BIODIESEL Y GTL

RAMOS DIEZMA, Ángel,⁽¹⁾; GARCÍA CONTRERAS, Reyes⁽¹⁾

ARMAS VERGEL, Octavio⁽²⁾

octavio.armas@uclm.es

⁽¹⁾Universidad de Castilla La Mancha. Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales. Ciudad Real.

⁽²⁾Universidad de Castilla La Mancha. Escuela de Ingeniería Industrial. Toledo.

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados, en valores medios, de las emisiones contaminantes reguladas producidas por un vehículo ligero diésel ensayado en condiciones urbanas a diferentes altitudes: en Valencia (próximo al nivel del mar), en Ciudad Real (sobre los 625 m [1]) y en Sierra Nevada (sobre los 2000 m). Como combustibles se ensayaron: un diésel comercial (con 5.8% de biodiesel), un biodiesel de grasas animales y un GTL obtenido a partir de gas natural mediante un proceso Fischer Tropsch de baja temperatura [2]. El vehículo utilizado, además de disponer de acceso a la unidad de control electrónica, fue instrumentado con un equipo de diagnóstico termodinámico on-line y analizadores de gases y de distribuciones de tamaño de partículas, lo que permitió la evaluación de las prestaciones, el diagnóstico termodinámico y las emisiones con los distintos combustibles. La altitud, indirectamente a través de la diferente estrategia de control de la ECU para la posición de la válvula de EGR y la presión de soplado del turbocompresor, tuvo mayor influencia que la diferente composición de los combustibles, provocando un aumento de las emisiones de NOx para los tres combustibles.

Palabras clave: Altitud, ensayos a bordo, combustibles alternativos.

1. Introducción

La contaminación en zonas urbanas se debe, principalmente, al proceso de combustión desarrollado por los motores de combustión interna[3]. A pesar de que los motores diesel se caracterizan por un mayor rendimiento (menor consumo) que los motores de gasolina, presentan mayores emisiones contaminantes. Un claro ejemplo es la consideración por parte de la organización mundial de la salud (OMS) de que las partículas diesel son cancerígenas. Estas repercusiones han provocado que las normativas medioambientales sean cada vez más estrictas, favoreciendo la introducción de nuevos sistemas de post-tratamiento de gases de escape (DPF, sistemas de reducción catalítica de NO_x, etc...) y el empleo de combustibles alternativos y/o renovables como son el biodiesel y el GTL. Un efecto que influye en el proceso de combustión es la concentración de oxígeno en el aire, la cual está directamente relacionada con la altitud.

Diferentes estudios han evaluado el efecto de la altitud sobre las emisiones y prestaciones, debido a la influencia de la concentración de oxígeno en el aire sobre las prestaciones y emisiones. La mayoría de ellos se han desarrollado en bancos de ensayos portátiles o simulando las condiciones de ensayo[4]. La mayoría de autores observan una disminución del rendimiento en el proceso de combustión (mayor consumo de combustible) a medida que aumenta la altitud [5], justificado, en parte, por el retardo del inicio de la combustión (ocurre más tarde) o a la ineficacia del turbo[6]. La mayoría de los autores observan mayores emisiones de CO, THC y partículas cuando el motor trabaja con elevada altitud[8][9], aunque el efecto de esta variable sobre los NO_x no es tan claro [4][9][11]. Con respecto al diagnóstico termodinámico, muy pocos autores han realizado estudios sobre el efecto de la altitud sobre parámetros característicos de la inyección y de la combustión. Benjumea y col.[12] realizaron estudios a dos altitudes pero en condiciones estacionarias. Los resultados mostraban mayor duración de la fase premezclada y de la combustión total. Pérez y col. [13], simulaban distintas condiciones de altitud (hasta 5200 m) y usaron distintas proporciones de aire enriquecido. Los autores concluyeron que el mayor porcentaje de oxígeno en el aire solo contrarrestó, parcialmente, los efectos de la altitud sobre parámetros como el consumo de combustible o la presión pico o el calor liberado, también en condiciones estacionarias.

Con respecto al efecto del combustible sobre las prestaciones, emisiones y diagnóstico termodinámico a distintas altitudes, existen diversos estudios con biodiesel pero son casi nulos los trabajos con GTL. Yu y col.[14] observaron que las ventajas con respecto a emisiones de THC y partículas asociadas al biodiesel cuando se ensaya a baja altitud se ven reducidas con la altitud. Por otro lado, Liu y col.[15] concluyeron que tenía un mayor efecto de la variación del contenido en oxígeno del combustible sobre las emisiones (reducción de hollín) que la disminución del oxígeno en el aire al variar la altitud (aumento de las partículas).

2. Materiales y métodos

2.1. Materiales

En la Figura 1 se muestra un esquema completo del vehículo y los distintos componentes que conforman la instalación de pruebas para los ensayos en condiciones reales de funcionamiento.

El vehículo utilizado es un Qasqhai con un motor modelo 2.0 dci de 110 kW con inyección mediante raíl común de alta presión con inyectores piezoeléctricos e inyección partida, sistema de recirculación de los gases de escape refrigerados, turbina de geometría variable, catalizador de oxidación y trampa de partículas como sistema de post-tratamiento de los gases de escape.

La medida de gases contaminantes se lleva a cabo a través del sistema OBS-1300 que permite el análisis de NO_x mediante sonda de Circonio (ZrO) y de las emisiones de CO con infrarrojos no dispersivos (NDIR). Para los THC se ha utilizado el analizador Amluk FID basado en el método de ionización de llama. La sincronización entre las variables a analizar se lleva a cabo mediante la medida de una misma variable en los 3 ordenadores utilizados, y a través de los procesos estandarizados de determinación de los tiempos de retraso característicos de los equipos de emisiones [16].

Para la determinación de la concentración de partículas se utiliza el equipo EEPS (EngineExhaustParticleSizer™ Spectrometer). Para la dilución de la muestra de medida de este equipo se utiliza un sistema de dilución basado en dos diluciones. La primera de ellas se lleva a cabo en un Rotating Disk modelo MD19-2E con una temperatura de la cámara de dilución de 150 °C y un grado de dilución de 18.2. La segunda dilución se hace a temperatura ambiente y con un grado de dilución de 6.18, utilizando un equipo modelo ASET15-1. Tras ambas diluciones, se utiliza un tubo evaporador a fin de evitar condensación de hidrocarburos en las partículas.

La instalación se completa con el sistema Kibox y el sistema de comunicación y control de la ECU, INCA PC. El sistema Kibox lleva a cabo un diagnóstico termodinámico de la combustión online con la ayuda de un sensor de presión en cámara y un codificador angular para la determinación de la posición del cigüeñal. Ambos sistemas (Kibox e INCA PC) tienen la capacidad de funcionar de manera sincronizada, es decir, el software controlador del sistema Kibox permite funcionar de manera remota a través del INCA PC, de tal manera que desde este último se puede controlar la ECU y el Kibox, simultáneamente. Además, el vehículo se equipa con un evaluador de la velocidad del viento relativo a la que se enfrenta el vehículo para descartar ensayos influenciados por este parámetro.

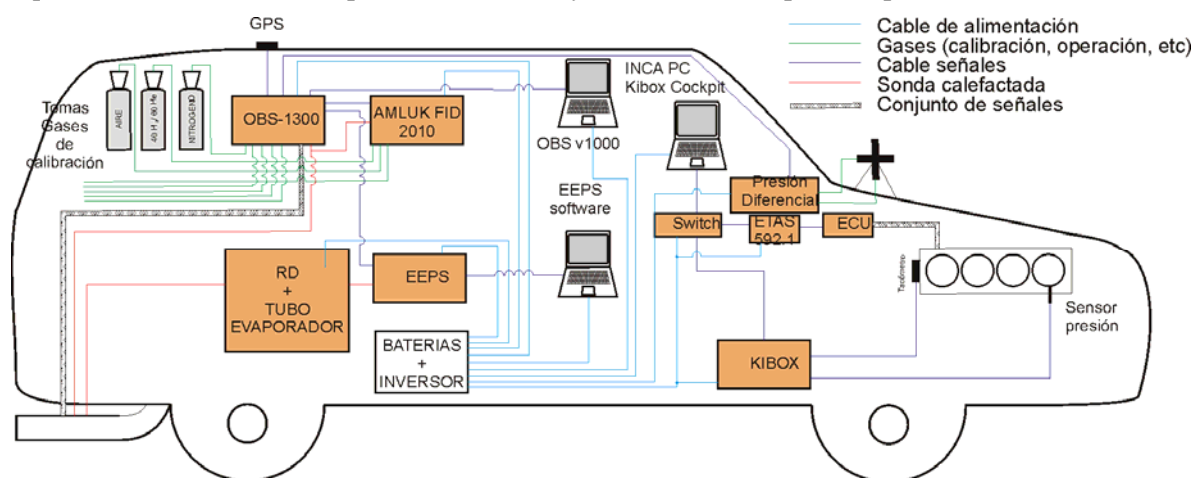


Figura 1: Esquema de la instalación embarcada en el vehículo de pruebas

2.2. Circuitos de ensayo y metodología

Los circuitos seleccionados se sitúan a tres altitudes diferentes: Valencia (< 20 msnm), Ciudad Real (625 msnm) y Sierra Nevada (2200 msnm), con el objetivo de estudiar el efecto de esta variable sobre las prestaciones y emisiones del vehículo. Con el objetivo de hacer comparable los resultados obtenidos de los ensayos del vehículo, se seleccionaron los circuitos para el ensayo en condiciones de conducción real urbana (lo más similares posibles al ciclo urbano de homologación) en las diferentes altitudes seleccionadas. Para definir los circuitos de ensayo se siguieron los criterios que se describen a continuación:

- La máxima pendiente entre dos puntos cualesquiera del circuito no debe ser mayor del 2%, con el objetivo de minimizar los efectos de bajadas o subidas pronunciadas del vehículo
- El circuito debe estar definido dentro de la ciudad y debe contener diferentes tipos de señales, (stops, semáforos, ceda el paso, paso de peatones, etc.), con el objetivo de producir arranques y paradas del vehículo,
- Con el mismo objetivo que en el criterio 2, el circuito debe tener partes con tráfico congestionado, típico de los centros de las ciudades (la velocidad está siempre por debajo de los

límites establecidos) y partes sin congestión de tráfico (velocidad cerca de los límites establecidos).

- La longitud del circuito debe ser equivalente a la distancia que recorre un vehículo en condiciones de conducción urbana del ciclo NEDC (aproximadamente 4 ± 1 km).

Considerando todos estos criterios, se seleccionaron los circuitos mostrados en la Figura 2, destacando que la duración de cada uno de ellos fue de unos 10 minutos.

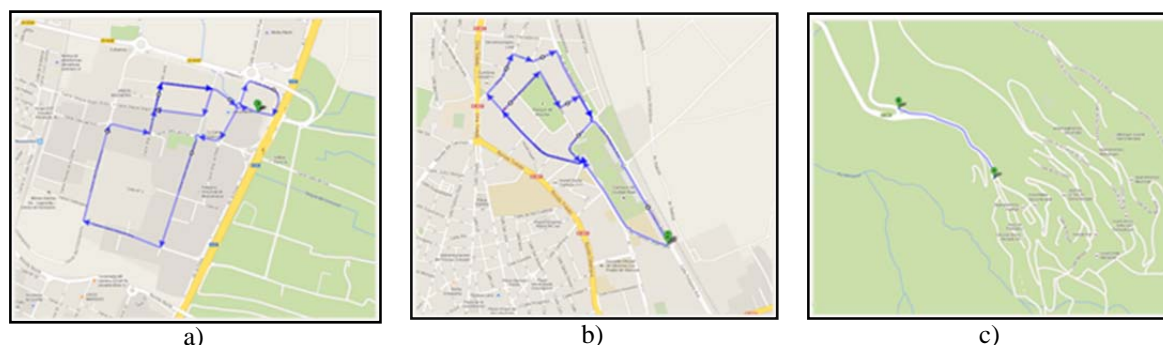


Figura 2: Vista de Google maps de los circuitos urbanos a) Valencia (< 20 msnm), b) Ciudad Real (625 msnm) y Sierra Nevada (2200 msnm)

Se llevan a cabo 4 repeticiones con cada combustible en cada una de las localizaciones de ensayo caracterizadas por tres niveles de altitud sobre el nivel de mar. Las bandas de error se determinan con el intervalo de confianza para un nivel de confianza del 90%. Tras el cambio de combustible se fuerza una regeneración controlada del filtro de partículas a fin de evitar acumulación de hollín en los sucesivos ensayos y que el efecto de la contrapresión de escape asociado a ello sea diferente entre combustibles. La temperatura ambiente en las tres localizaciones es de 20-30 °C, para lo cual se eligieron épocas del año correspondientes a esas temperaturas en cada una de las localizaciones de ensayo.

2.3. Combustibles utilizados

Los combustibles utilizados son un diesel de referencia típico de los que se pueden adquirir en cualquier estación de servicio de España. Este combustible posee un contenido en biodiesel del 5.8 %. Como combustibles alternativos se estudia un biodiesel puro proveniente de grasas animales que ha sido facilitado por la empresa Stock del Valles y un combustible parafínico denominado GTL proveniente de un proceso Fisher Tropsch de baja temperatura con Gas Natural como materia prima, facilitado por la empresa SASOL (República Sudafricana).

Un resumen de las principales características de los citados combustibles aparece en la Tabla 1. Se debe destacar que el biodiesel presenta el menor poder calorífico pero un menor poder calorífico que el resto de combustibles, mientras que el número de cetano del GTL es el más elevado.

Tabla 1: Propiedades de los combustibles ensayados

Propiedad	DIESEL	BIODIESEL	GTL
Formula molecular	$C_{14.62}H_{26.87}O_{0.08}$	$C_{18.41}H_{37.23}O_2$	$C_{16.89}H_{35.77}$
Peso molecular (g/mol)	203.7	290.7	238.9

Ratio H/C	1.84	2.02	2.12
Dosadoestequiométrico	1/14.45	1/12.70	1/14.95
Densidad a 15°C (kg/m ³) (EN ISO 12185)	845	877	774
Viscosidad a 40°C (cSt) (EN ISO 3104)	2.51	4.03	2.34
Poder calorífico inferior (MJ/Kg)	42.43	36.83	44.03
Numero de cetano	54.2	65.6	89.2

3. Resultados

En la Figura 3 (a) se muestran los valores de velocidad media obtenidos en los circuitos de las distintas ciudades. Se observa que la velocidad reproducida con los tres combustibles es similar dentro de cada ciudad lo que permite realizar una comparación más correcta de las prestaciones y emisiones con los distintos combustibles. Al comparar entre ciudades, la velocidad media del circuito de Sierra Nevada fue ligeramente superior a Valencia y Ciudad Real.

Al comparar la apertura de la válvula de EGR (Figura 3 (b)) se comprueba que en Sierra Nevada (2200 msnm) no se produjo recirculación de gases de escape durante los ensayos, lo cual es coherente con la baja presión atmosférica de este circuito. En estas condiciones, la estrategia de control del motor no permite la apertura de dicha válvula debido a que a tan baja presión atmosférica el aire posee una densidad y un contenido en oxígeno menor, factor que limita en gran medida las prestaciones del motor.

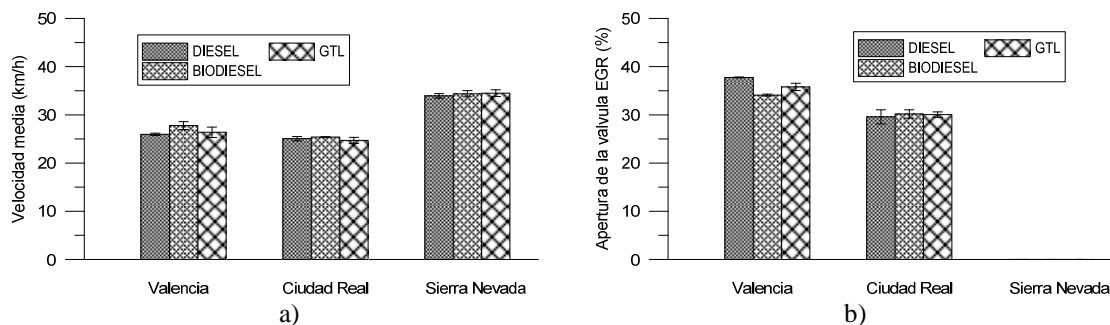


Figura 3. Velocidad media (a) y apertura media de la válvula de EGR (b).

El consumo específico de combustible (Figura 4(a)) se correlaciona (de manera inversa) con el poder calorífico de los mismos, puesto que el mayor consumo se obtiene con el biodiesel seguido del diesel y el GTL. A pesar del mayor consumo con biodiesel, el rendimiento con este combustible es similar al del GTL y mayor que el correspondiente al diesel, al requerir menos energía específica (Figura 4(b)). Al comparar entre altitudes, se observa un consumo específico de energía similar, demostrando que las características de los circuitos fueron similares.

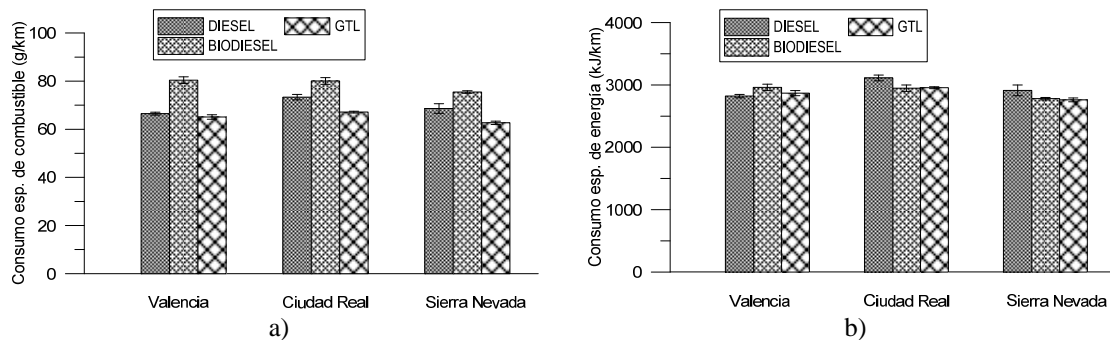


Figura 4. Consumo específico: a) combustible y b) energía.

El dosado relativo (Figura 5) indica la relación combustible-aire con respecto a dicha relación en condiciones estequiométricas para cada combustible. Se observa que el dosado relativo del diésel es ligeramente superior al de los dos combustibles alternativos. En Sierra Nevada, los niveles de dosado relativo son menores debido a la ausencia de recirculación de gases de escape lo cual produce un exceso de aire mayor, a pesar de la menor densidad de éste.

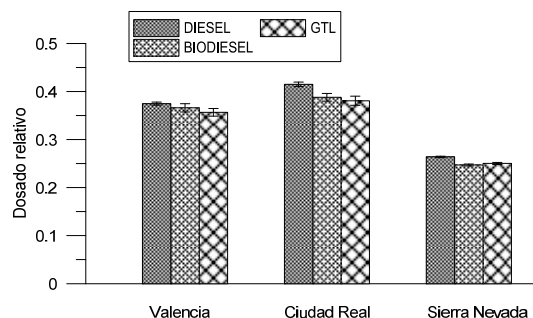


Figura 5. Dosado relativo.

En la Figura 6 se muestra los resultados del diagnóstico termodinámico de la combustión (no se incluyen los resultados de Ciudad Real al no disponer del equipo en esos momentos). Los valores mostrados se dividen en dos bloques:

- Relativos a la inyección. La parte inferior de la gráfica muestra dónde se produce la apertura del inyector (Ide, inicio de la energización). Este motor está configurado para poder realizar dos preinyecciones (pre1 y pre 2) y una principal. Se comprueba que en Valencia sólo necesitó realizar la preinyección 2 junto con la principal mientras que en Sierra Nevada, al tener una menor presión parcial de O_2 , requirió realizar también la preinyección más temprana para reducir el tiempo de retraso y sus implicaciones en los NO_x . Al comparar entre combustibles, se observa que mientras que no hay diferencias en la inyección principal, existe un ligero adelanto en el caso del biodiesel para las preinyecciones para mantener centrada la inyección en el mismo ángulo que el diesel y GTL considerando la mayor cantidad de combustible a inyectar.
- Relativos al desarrollo de la combustión. Se muestra el inicio, el ecuador y el final de la combustión (IdC, 50% QI y FdC, respectivamente). El inicio de la combustión se escalona con el número de cetano (mayor número de cetano lo que implica un menor tiempo de retraso) de los combustibles en Sierra Nevada, puesto que el GTL es el que antes se autoencendió seguido del biodiesel y, por último, el diesel. A pesar de esta diferencia en el comienzo de la combustión, los tres combustibles alcanzan el 50% del calor liberado y el final de la combustión alrededor del mismo ángulo, lo que indica que la velocidad de combustión con el diesel y, especialmente con el biodiesel, es ligeramente mayor que con el combustible parafínico. Sin embargo, cuando se trata de los ensayos en Valencia no se aprecia la citada correlación de número de cetano e inicio en la combustión ya que en este emplazamiento el inicio de la combustión aparece antes para el diesel que para el biodiesel, que pasa a ser el último. Esto puede ser debido a que el número de cetano de los combustibles es un parámetro que se mide con un equipo bajo ciertas condiciones de ensayo (condiciones de la cámara de combustión), sin embargo las condiciones reales del comburente en la cámara de combustión son diferentes sobre todo cuando se lleva a cabo EGR. Dicho esto, se aprecia que el combustible biodiesel, en cuanto al autoencendido, se ve afectado más negativamente por la combinación de efectos de dilución del O_2 y aumento de temperatura causados por el EGR que se da en condiciones de Valencia y que no existe en condiciones de Sierra Nevada. Con respecto al efecto de la altitud, la duración de la combustión es mayor en Sierra Nevada, en coherencia con otros estudios [12].

En la Figura 7 se muestran las emisiones gaseosas reguladas. No se observan diferencias apreciables ni entre circuitos ni entre combustibles en las emisiones de CO y THC (Figuras 7 a) y b), respectivamente). Cabe destacar que los valores de estas emisiones son muy bajos (mucho menores

que el límite especificado en la normativa Euro 4) debido a que las condiciones funcionamiento del motor (alta temperatura) favorece la eficiencia del catalizador de oxidación (DOC). Además, los valores de estas emisiones son muy poco reproducibles entre ensayos debido a su fuerte dependencia con el dosado relativo instantáneo, reduciéndose su emisión a instantes de muy corto periodo de tiempo donde el citado dosado alcanzó valores superiores a ~0.8. El tiempo total con condiciones de dosado por encima de ~0.8 no se da en la misma cantidad para todos los ensayos porque se origina en transitorios muy rápido y dependientes de la actuación del conductor.

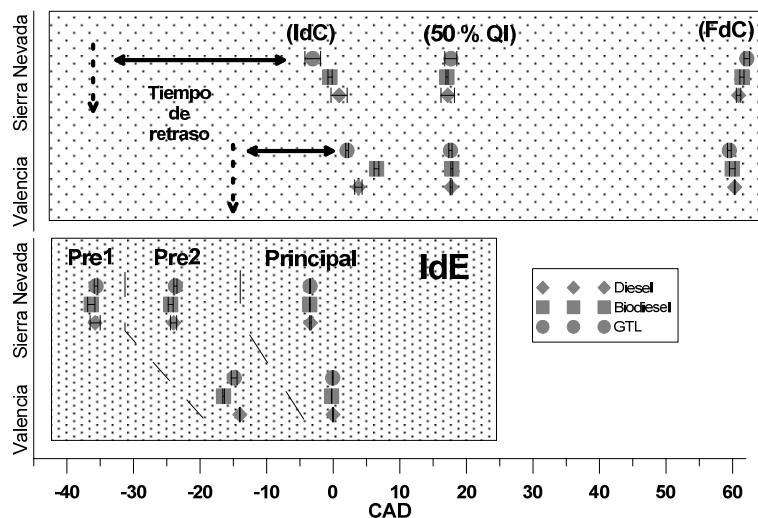


Figura 6. Diagnóstico de la combustión.

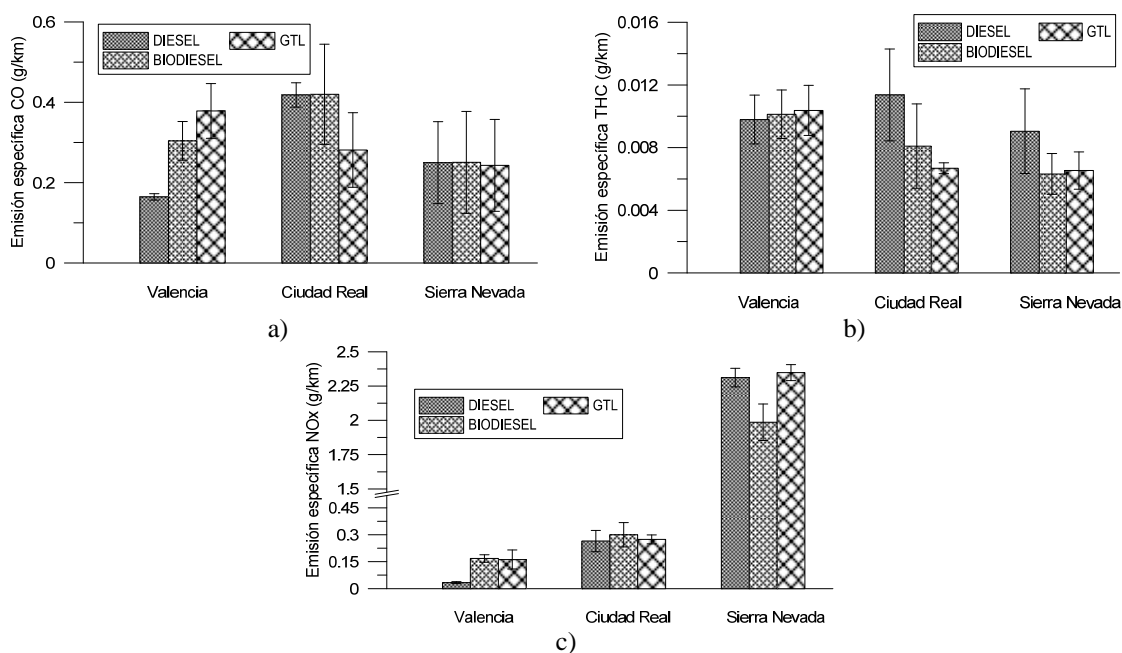


Figura 7. Emisiones gaseosas específicas: a) CO, b) THC y c) NOx.

Con respecto a los NOx (Figura 7 (c)), de nuevo no se aprecian diferencias notables entre combustibles en el caso de Ciudad Real. El efecto de la altitud se traduce en un cierre completo de la válvula de EGR en Sierra Nevada que resulta en una emisión de NO_x un orden de magnitud superior con respecto a las otras dos localizaciones. Al comparar Ciudad Real y Valencia, se aprecia también una ligera disminución cuando se trabaja a menor altitud (Valencia), en concordancia con mayor proporción de EGR en esta localización. Cabe mencionar la baja emisión conseguida por el diesel en los ensayos de

Valencia, esto se justifica por la menor velocidad media conseguida para ese ensayo que motivó una menor carga del motor y una mayor apertura de la válvula de EGR. Por otro lado, de los resultados obtenidos en Sierra Nevada se observa que, a pesar de que el combustible GTL tiene una temperatura adiabática de llama similar al biodiesel y menor que el diesel, sus emisiones son similares al diesel y superiores al biodiesel. Esto último se puede justificar por el mayor número de cetano del combustible parafínico en concordancia con los resultados expuestos en [17]. Con las características de la inyección asociadas a Sierra Nevada se produce un inicio de la combustión antes del PMS para el GTL, lo que conlleva mayores temperaturas en cámara para este combustible con respecto a las alcanzadas con el biodiesel y el diesel.

Los resultados relativos a la emisión específica de partículas, tanto en número como en masa (Figura 8 a) y b), respectivamente), muestran valores similares con los tres combustibles, salvo en el circuito de Sierra Nevada donde el biodiesel muestra una mayor emisión que los otros combustibles. El efecto del combustible queda enmascarado en cuanto a la emisión de partículas debido a que el vehículo está equipado con filtro de partículas DPF para la retención de las mismas.

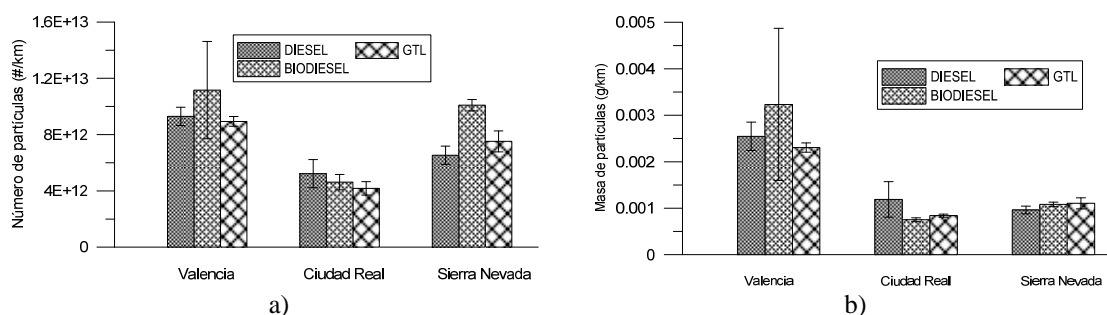


Figura 8. Emisión específica de partículas: a) Número y b) Masa.

4. Conclusiones

Las principales conclusiones tras el análisis de los resultados se dividen en dos tipos, las relativas al efecto de la altitud y las relativas a los combustibles:

- Relativas a la altitud: el efecto de la altitud.** Se comprueba de manera clara, la estrategia de control del motor. Las condiciones de poca densidad del aire en altura para los ensayos de Sierra Nevada motiva el cierre completo de la válvula de EGR para no perder prestaciones, a consta de un perjuicio muy acusado de las emisiones de NO_x (un orden de magnitud mayor con respecto a las otras dos altitudes). La estrategia de control del motor también modifica el *timing* de las inyecciones en condiciones de altura, adelantando de manera notable las mismas e introduciendo una preinyección más temprana para intentar reducir el tiempo de retraso que tiende a incrementarse en condiciones de altitud, por la ya mencionada reducción en la densidad del aire y presión parcial de oxígeno.
- Relativas a los combustibles.** Los combustibles alternativos muestran una ligera mejora en el consumo específico de energía, posiblemente motivada por el diferente desarrollo de la combustión debido a sus diferentes propiedades. No se aprecian diferencias notables en las emisiones, a pesar de que en bibliografía se han constatado diferencias entre ellos cuando el motor funciona en condiciones estacionarias. En condiciones reales de funcionamiento la variabilidad de las emisiones debida a la propia variabilidad del ensayo se hace muy notable sobre todo para las emisiones de CO y THC, las cuales dependen fuertemente del dosado relativo. El carácter de los ensayos en condiciones reales hace poco repetitivo el tiempo durante el cual se está por encima de un valor límite de dosado que favorezca dichas emisiones, enmascarando un posible efecto del tipo de combustible. En cambio, las emisiones de NO_x se muestran más repetitivas y se puede apreciar en el caso de Sierra Nevada, donde no existe EGR, el efecto de los combustibles en dicha emisión. La mayor emisión de forma global en Sierra Nevada se debe, principalmente, al cierre de la válvula de EGR en esta altitud.

5. Agradecimientos

Los autores desean agradecer el apoyo al proyecto COMBALT2 Ref. POII10-0173-0731, financiado por la Consejería de Educación y Ciencia de la Junta de Comunidades de Castilla-La Mancha así como la financiación de la beca FPI a Angel Ramos Diezma, asociada al proyecto REACTEC Ref. ENE2010-20768-C03-01. Se agradece a las empresas: Nissan Europe Technology Centre, Spain, por el apoyo logístico del vehículo cedido, a AVL Ibérica por facilitar algunos de los equipos de medida utilizados en los ensayos y a las empresas Stock del Vallés y SASOL por el suministro de biodiesel y GTL respectivamente.

6. Bibliografía

- [1]. Armas, O., García-Contreras, R., Ramos, A. *Emissions of light duty vehicle tested under urban and extraurban real-world driving conditions with diesel, animal fat biodiesel and GTL fuels*. SAE paper 2013-24-0176.
- [2]. Armas, O., García-Contreras, R., Ramos, A. *Impact of animal fat biodiesel, GTL and HVO fuels on combustion, performance and pollutant emissions of a light duty diesel vehicle tested under the NEDC*. Journal of Energy Engineering. DOI: 10.1061/(ASCE)EY.1943-7897.0000237.
- [3]. Bielaczyc, P., and Szczotka, A. (2009). *The effect of pure RME and biodiesel blends with high RME content on exhaust emissions from a light duty diesel engine*. SAE Powertrains Fuels and Lubricants Meeting”, Florence, Italy
- [4]. He, Ch., Ge, Y. Ma, Ch. Tan, J., Liu, Z., Wang, Ch, Yu, L., Ding, Y. *Emission characteristics of a heavy-duty diesel engine at simulated high altitudes*. Science of the Total Environment, 2011, vol.409, pp. 3138–3143.
- [5]. Liu, S., L. Shen, et al. *Effects of altitude and fuel oxygen content on the performance of a high pressure common rail diesel engine*. Fuel, 2014, vol. 118, pp. 243-249.
- [6]. Wang, X., Y. Ge, et al. *Comparison of combustion characteristics and brake thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine fueled with diesel and biodiesel at high altitude*. Fuel, 2013, vol. 107, pp. 852-858.
- [7]. Wang, X., Y. Ge, et al. *Effects of altitude on the thermal efficiency of a heavy-duty diesel engine*. Energy, 2013, vol.59, pp. 543-548.
- [8]. Wang, X., Ge, Y., Yu, L. *Combustion and Emission Characteristics of a Heavy-Duty Diesel Engine at Idle at Various Altitudes*. SAE Technical Paper, 2013-01-1516.
- [9]. Yin, H., Y. Ge, et al. *Idle emission characteristics of a light-duty diesel van at various altitudes*. Atmospheric Environment, 2013, vol. 70, pp. 117-122.
- [10]. Wang, X., H. Yin, et al. *On-vehicle emission measurement of a light-duty diesel van at various speeds at high altitude*. Atmospheric Environment, 2014, vol. 81, pp. 263-269.
- [11]. Chaffin, C.A., Ullman, T.L. *Effects of Increased Altitude on Heavy-Duty Diesel Engine Emissions*. SAE Technical Paper 940669.
- [12]. Benjumea, P., Agudelo, J., Agudelo, A. *Effect of altitude and palm oil biodiesel fuelling on the performance and combustion characteristics of a HSDI diesel engine*. Fuel, 2009, vol. 88(4), pp. 725-731.
- [13]. Pérez, P., Boehman, A.L. *Performance of a single-cylinder diesel engine using oxygen-enriched intake air at simulated high-altitude conditions*. Aerospace Science and Technology, 2010, vol. 14, pp. 83–94.
- [14]. Yu, L., Ge, Y., Tan, J. et al. *Experimental investigation of the impact of biodiesel on the combustion and emission characteristics of a heavy duty diesel engine at various altitudes*. Fuel, 2014, vol. 115, pp. 220–226.
- [15]. Liu, S., Shen, L., Bi, Y., Lei, J. *Effects of altitude and fuel oxygen content on the performance of a high pressure common rail diesel engine*. Fuel, 2014, vol. 118, pp. 243–249.
- [16]. UNECE, 2013. Regulation No 49. Uniform provisions concerning the measures to be taken against the emission of gaseous and particulate pollutants from compression-ignition engines and positive ignition engines for use in vehicles.
- [17]. Yehliu, K., Boehman, A.L., Armas, O. *Emissions from different alternative diesel fuels operating with single and split fuel injection*. Fuel, 2010, vol. 89, pp. 423-437.