

Influencia de la altitud fuera de los límites de un ciclo RDE sobre las emisiones de nanopartículas de un vehículo TSI E6

Tawfiq Al-Wasif-Ruiz¹, José Alberto Sánchez-Martín², Carmen Cecilia Barrios-Sánchez³

¹Grupo de emisiones de vehículos, Unidad de emisiones contaminantes, CIEMAT, España. Email: tawfiq.alwasif@ciemat.es

²Grupo de emisiones de vehículos, Unidad de emisiones contaminantes, CIEMAT, España. Email: josealberto.sanchez@ciemat.es

³Grupo de emisiones de vehículos, Unidad emisiones contaminantes, CIEMAT, España. Email: carmen.barrios@ciemat.es

Resumen

El objetivo de este trabajo es estudiar la influencia de la altitud fuera de los límites establecidos por el ciclo RDE estándar sobre las emisiones de partículas y NO_x, en un motor de gasolina de mezcla estratificada Euro 6. En los ensayos realizados fuera de los límites de altura se emiten en zona urbana un 70% más de partículas, en zona rural un 38% más de partículas, y más de un 17% de NO_x en todos los tramos, con respecto a sus respectivas zonas dentro de los límites. Este trabajo refleja la necesidad de ampliar los límites del ciclo RDE, dado que los límites actuales no consideran condiciones de operación comunes en la labor normal del transporte. Así pues, de acuerdo con los resultados obtenidos, sería recomendable realizar una revisión de los límites de emisiones fijados por el ciclo RDE estándar, al menos respecto a los márgenes de altura considerados.

Palabras clave: RDE; altitud; emisiones de vehículos; Euro 6.

Abstract

The present work investigates the influence of altitude beyond the boundary conditions established by the standard RDE cycle on particulate and oxide nitrogen emissions, utilising a blend gasoline engine stratified with Euro 6 regulations. In both urban and rural areas, 70% and 38% more total particles are emitted, respectively, and more than 17% of NO_x in every area, as compared to the tests carried out within the limits of altitude. Our results indicate the need to revise and expand the altitude limits of the RDE cycle since, in the current legislation, operating conditions that are quite common in normal transport work are not considered. Thus, a review of the emission limits set by the standard RDE cycle, at least with respect to the height margins considered, should be the subject of further research.

Keywords: RDE; altitude; vehicle emissions; Euro 6.

1. Introducción

La contaminación atmosférica protagoniza uno de los mayores riesgos para la salud de las personas. La polución no tiene fronteras, no tiene límites, afecta a todas las regiones [1].

El transporte es una de las actividades humanas de mayor impacto en la contaminación atmosférica, lo cual repercute, entre otras cosas, en el calentamiento global. A pesar de los esfuerzos que realizan las instituciones gubernamentales de los diferentes países, en relación con el desarrollo de nuevas tecnologías en

los motores de combustión, este calentamiento global va en aumento debido, en gran parte, a los gases producidos por el transporte, tales como el NO_x [2]. Para ser más exactos, alrededor del 45% de emisiones de NO_x en Europa proviene del transporte, siendo el transporte rodado el que más contribuye [3].

Para llevar a cabo el propósito de proteger la calidad del aire y disminuir la emisión de gases de efecto invernadero, surgen las normativas EURO, las cuales limitan la emisión de contaminantes en los vehículos. A partir de 1992 comienza la primera regulación europea de emisiones, la normativa Euro 1, la cual se

ha ido desarrollando hasta alcanzar la normativa Euro 6 en 2015, vigente actualmente.

La actual normativa Euro 6 ha establecido límites más estrictos para vehículos de gasolina si la comparamos con normativas anteriores. Actualmente, la normativa Euro 6 ha disminuido el límite de emisión permitido de NO_x en un 60 % respecto a la permitida por la normativa Euro 1. En relación a la emisión de partículas, la mejora en el consumo de combustible en los MEP, gracias a la tecnología de inyección directa de gasolina (GDI), ha provocado que los motores de gasolina emitan partículas en número muy parecido a los motores Diésel [4]. Esto ha originado una modificación en el número y tamaño de las partículas que este tipo de motor emite, lo que ha llevado a establecer un límite al número de partículas emitidas.

Hasta ahora, para realizar el estudio de emisiones, los vehículos ligeros se prueban en un laboratorio mediante un chasis dinamométrico bajo un ciclo de conducción predefinido. Este ciclo de conducción se denomina nuevo ciclo de conducción europeo (New European Driving Cycle, NEDC), donde las emisiones se miden en g/km [5]. Sin embargo, para fortalecer la eficacia de las pruebas de emisiones, la Comisión Europea ha establecido un nuevo proceso de homologación, el procedimiento WLTP (World harmonized Light-duty vehicle Test Procedure). Las principales diferencias entre WLTP y NEDC afectan al consumo de combustible, definición de la masa del vehículo, determinación de la carga en carretera, la temperatura y el preacondicionamiento del chasis dinamométrico [6].

No obstante, el procedimiento RDE, el cual es el objeto de estudio de este trabajo, fue aprobado en mayo de 2015 como parte de la legislación de la normativa Euro 6 [7]. Este tipo de prueba no sustituye al WLTP, sino que lo complementa. RDE surge de la necesidad de evaluar los óxidos de nitrógeno y el material particulado emitido por los vehículos durante su circulación en carretera. Sin embargo, es importante destacar que, aunque RDE representa un amplio rango de situaciones de conducción, este excluye ciertas condiciones, estableciendo así unos límites, tales como la temperatura, la conducción dinámica o la relación con la altitud [8].

Dado que el actual reglamento de análisis de las emisiones contaminantes descarta varias condiciones de operación en las que un/una conductor/a se puede encontrar, esta situación suscita un gran interés en poder conocer el comportamiento de los automóviles actuales bajo esas circunstancias, es decir, por encima de los 1200 metros de altitud. Además, en Europa se tienen varios casos en los que se supera dicho límite, como en Karakaya Hill en Turquía, Col de la Bonnette en Francia, Passo dello Stelvio en Italia, etc.

Por todo esto, este trabajo busca estudiar la influencia de la altitud fuera de los límites de un ciclo RDE sobre las emisiones de nanopartículas, tanto en su distribución de tamaño como en su concentración, en un motor de gasolina de mezcla estratificada con normativa Euro 6.

2. Método(s), metodología

Los distintos equipos más importantes utilizados en la realización del ciclo RDE son el vehículo seleccionado, el sistema de medida de partículas, el sistema de medición de emisiones portátiles (PEMS), el GPS y el VagCom.

En cuanto a la creación de las rutas se han seguido, por un lado, los requisitos para la realización de un RDE, y, por otro lado, las condiciones frontera para las pruebas RDE. Esto ha permitido tener tanto rutas urbanas, rurales y autovías dentro de los límites como fuera de las condiciones frontera, siempre en arranque en caliente. Concretamente, todas las rutas dentro de los límites de altura están por debajo de los 800 metros de altitud, mientras que todos los ensayos fuera de las condiciones frontera de altitud están por encima de los 1200 metros de altitud, llegando incluso en la ruta rural a superar los 1800 metros.

2.1. Vehículo utilizado

El vehículo usado a lo largo de todos los ensayos realizados fue el Skoda Yeti 1.2 TSI de 110 CV. Este vehículo cuenta con un motor turboalimentado con inyección directa estratificada de gasolina de 1.197 cc, formado por 4 cilindros dispuestos en línea cuya ficha técnica se recoge en las Tablas 1 y 2, donde se muestran las especificaciones técnicas del motor, y las prestaciones y consumos homologados, respectivamente.

Tabla 1. Especificaciones técnicas del motor.

Fabricante o marca del motor	Volkswagen
Tipo de combustible	M / G
Cilindrada	1.197 cc
Nº y disposición cilindros	4 / En línea
Potencia del motor	81 kW
Revoluciones potencia máx.	5.600 rpm
Par máximo	175 Nm
Revoluciones par máximo	4.000 rpm
Diámetro	71 mm
Carrera	75,6 mm
Alimentación	Iny. directa. Turbo. Intercooler

Fuente: km77.

Tabla 2. Prestaciones y consumos homologados.

Emisiones de CO ₂	128 g/km
Nivel de emisiones	EURO 6W
Velocidad máxima	179 km/h
Aceleración 0-100 km/h	10,9 s
Consumo NEDC: extraurbano	4,8 l/100km
Consumo NEDC: urbano	6,7 l/100km
Consumo NEDC: medio	5,5 l/100km
Depósito de combustible	55 l
Filtro de partículas	No
Postratamiento	TWC

Fuente: km77.

2.2. Sistema de medida de partículas

El equipo utilizado para obtener la concentración y la distribución del tamaño de las nanopartículas es el Engine Exhaust Particle Sizer (EEPS) modelo 3090, TSI Inc. Este dispositivo está diseñado específicamente para medir las partículas emitidas por motores de combustión interna, siendo capaz de medir tamaños de partículas de entre 5,6 a 560 nm, con un total de 32 canales. Además, este equipo es acompañado por un diluidor de disco giratorio modelo MD19-2E, TSI Inc.

Las partículas entran al equipo a través de un ciclón con un corte de 1 μm , lo cual permite eliminar las sustancias con un tamaño superior al del límite establecido por el EEPS, es decir, 560 nm. Tras ello, las partículas atraviesan un cargador de difusión eléctrica donde se generan iones, que se mezclarán con las partículas, haciendo que estas se carguen, proporcionándolas un nivel de carga basado en su tamaño [9].

Tras ser cargadas, las partículas entran en una región denominada “región de tamaño” mediante un espacio anular, donde las partículas se cruzan con una corriente de aire libre de partículas. Esta región está formada por el espacio formado por dos cilindros concéntricos. Por un lado, el cilindro exterior está construido a partir de una pila de electrodos aislados entre sí, los cuales están conectados a un electrómetro, es decir, un amplificador de carga. Por otro lado, el cilindro exterior está conectado a una fuente de alta tensión positiva, lo cual genera un electrodo de alto voltaje. Esto provoca un campo eléctrico entre los dos cilindros. Las partículas cargadas positivamente fluyen junto a la corriente de aire haciendo que estas partículas vayan a los electrodos. Una vez las partículas encuentran los electrodos, estas les transfieren su carga. La corriente generada es amplificada por los electrómetros, digitalizada y leída por un microcontrolador. La información es procesada en tiempo real, obteniendo diez distribuciones de tamaño de partículas por segundo [9].

2.3. Sistema de medición de emisiones portátiles (PEMS)

El PEMS empleado es el OBS-2000, HORIBA Ltd., el cual analiza las emisiones del vehículo en condiciones reales, todo ello mediante analizadores de gas a prueba de vibraciones, un software para el control y registro de datos, sensores y un tubo de escape con un tubo de Pitot.

Para la medición de la concentración del CO y del CO₂ que emite el vehículo se utiliza un analizador NDIR (sensor infrarrojo no dispersivo) calentado sin extracción de agua, la concentración de los THC es calculada mediante un analizador FID (detector de ionización de llama), finalmente, la cantidad de NO_x se analiza mediante un analizador CLD (detector de quimioluminiscencia). Aparte, el software también guarda datos de GPS, la emisión de los contaminantes en masa y el consumo de combustible.

2.4. Sistema GPS

El objetivo del GPS es determinar la posición actual del vehículo en cada momento del trayecto. Esto permite diferenciar las distintas alturas a las que se hacen los ensayos de este proyecto. Para llevar a cabo dicha tarea se hace uso del software CompeGPS Land y de una antena instalada dentro del vehículo.

2.5. Sistema de Diagnóstico a bordo de vehículos

El sistema EOBD (European On-Borad Diagnostics) permite supervisar el estado de todo el vehículo mediante una serie de sensores instalados en el mismo.

En este caso, el software utilizado es el VCDS (VAG-COM Diagnostic System), que permite acceder a la centralita del coche y leer los canales que se deseen. Para este proyecto se han grabado los datos de régimen de giro, temperatura del líquido refrigerante, velocidad del vehículo, par del motor, temperatura de los gases de escape, la presión de sobrealimentación, la temperatura del aire de admisión, la masa de aire, la temperatura del combustible, el consumo de combustible, la relación de equivalencia (λ) y la temperatura de los gases de escape antes del catalizador.

2.6. Rutas

En primer lugar, se va a analizar la zona urbana, la cual se divide en zona urbana de Navacerrada (Figura 1) y zona urbana de Madrid (Figura 2), siendo su gran diferencia la altitud a la que se encuentra cada recorrido.



Figura 1. Zona Urbana de Navacerrada. Fuente: elaboración propia.

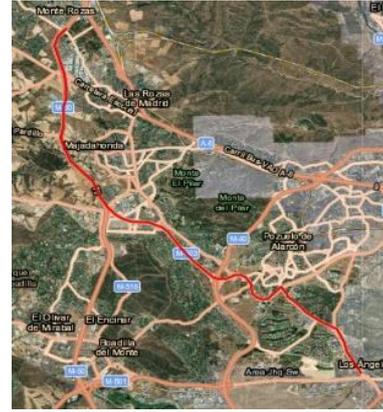


Figura 4. Zona Rural de Madrid. Fuente: elaboración propia.

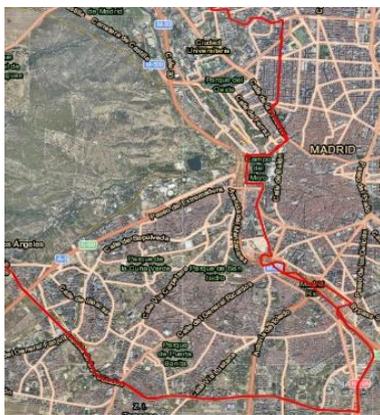


Figura 2. Zona Urbana de Madrid. Fuente: elaboración propia.

A continuación, se va a analizar la zona rural, la cual se divide en zona rural de Cotos (Figura 3) y zona rural de Madrid (Figura 4).



Figura 3. Zona Rural de Cotos. Fuente: elaboración propia.

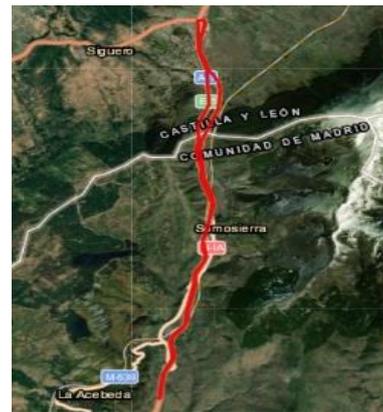


Figura 5. Zona Autovía de Robregordo. Fuente: elaboración propia.

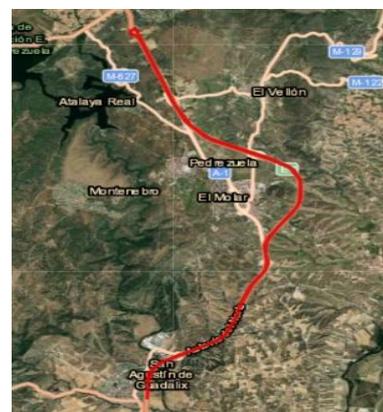


Figura 6. Zona Autovía de San Agustín de Guadalix. Fuente: elaboración propia.

Finalmente, se va a analizar la zona de autovía, la cual se divide en zona autovía de Robregordo (Figura 5) y zona autovía de San Agustín de Guadalix (Figura 6). Es importante resaltar que, en el tramo de Robregordo, la pendiente es mayor que en la zona de San Agustín de Guadalix, lo cual afecta a los resultados, que se verán más adelante en el apartado de “Resultados”.

3. Resultados

Un aspecto importante entre los ensayos es la orografía, dado que el objeto de este trabajo es estudiar la influencia de la altitud fuera de los límites de un ciclo RDE sobre las emisiones, por lo que es lógico que se le dedique un apartado en la sección de “Resultados”.

Las Figuras 7, 8 y 9 muestran la diferencia de altitud existente a lo largo de los ensayos “con altura”, es decir, aquellos que se encuentran fuera de los límites de condiciones frontera.



Figura 7. Diferencia de alturas en zona urbana. Fuente: elaboración propia.



Figura 8. Diferencia de alturas en zona rural. Fuente: elaboración propia.



Figura 9. Diferencia de alturas en zona autovía. Fuente: elaboración propia.

Como se puede observar de las Figuras 7, 8 y 9, todos los ensayos llevados a cabo con altura superan los 1.200 metros de altitud, consiguiendo de esta manera estar fuera de los límites de condiciones frontera establecidos en el reglamento para la realización de un ciclo RDE.

Debido a la diferencia de rutas escogidas dentro de cada una de las distintas zonas estudiadas (urbana, rural y autovía), conviene hacer un estudio del comportamiento del motor en las diferentes situaciones, dado que, independientemente de que se hayan eliminado varias variables, como, por ejemplo, el conductor o el tipo de combustible, el perfil orográfico puede jugar un papel importante aun habiendo seleccionado rutas con desniveles similares. Por todo ello, se van a estudiar tanto el par motor como el consumo de combustible para todas las zonas.

Para llevar a cabo dicho propósito, se va a realizar un estudio estadístico ANOVA para los ensayos realizados en zona urbana, zona rural y zona autovía, lo cual permite identificar de manera precisa la

diferencia entre cada uno de los ensayos dentro de una misma zona.

La Tabla 3 y la Tabla 4 recogen los valores obtenidos para el par motor y para el consumo de combustible, respectivamente.

Tabla 3. Par motor promedio.

Dentro de los límites de altura del ciclo RDE	
Zonas	Par motor (Nm)
Urbana	52,03 $\sigma = 31,44$
Rural	65,84 $\sigma = 39,84$
Autovía	125,59 $\sigma = 43,33$
Fuera de los límites de altura del ciclo RDE	
Zonas	Par motor (Nm)
Urbana	48,41 $\sigma = 32,18$
Rural	61,75 $\sigma = 33,71$
Autovía	147,03 $\sigma = 37,86$

Fuente: elaboración propia.

Tabla 4. Consumo de combustible promedio.

Dentro de los límites de altura del ciclo RDE	
Zonas	Consumo de combustible (l/h)
Urbana	3,07 $\sigma = 2,20$
Rural	5,06 $\sigma = 3,15$
Autovía	10,65 $\sigma = 3,48$
Fuera de los límites de altura del ciclo RDE	
Zonas	Consumo de combustible (l/h)
Urbana	2,64 $\sigma = 1,93$
Rural	4,70 $\sigma = 3,03$
Autovía	12,89 $\sigma = 3,69$

Fuente: elaboración propia.

De este primer análisis se puede indicar que, para el caso de zona urbana y para el caso de zona rural, entre los ensayos dentro de los límites y los ensayos fuera de las condiciones frontera, se tiene un par motor muy similar. Sin embargo, en la zona de autovía, se aprecia una mayor discrepancia entre ambos ensayos, debido a la existencia de grandes tramos de pendiente para el caso en que la altitud se encuentra fuera de los límites, como se puede apreciar de la Figura 5. Este comportamiento del par motor se debe tener en cuenta a la hora de visualizar los resultados de las emisiones contaminantes, ya que tiene un gran efecto en ellas a través de la relación aire-combustible. Además, y como era de esperar, la tendencia del consumo en todas las zonas es idéntica a la tendencia vista en la variable del par motor.

3.1. Emisión de partículas

Para comenzar este apartado, se va a mostrar en la Tabla 5 la emisión total de partículas para cada ensayo realizado:

Tabla 5. Emisión total promedio de partículas.

Dentro de los límites de altura del ciclo RDE	
Zonas	Emisión total (#/km)
Urbana	$8,05 \cdot 10^{13}$
Rural	$3,21 \cdot 10^{13}$
Autovía	$1,93 \cdot 10^{14}$
Fuera de los límites de altura del ciclo RDE	
Zonas	Emisión total (#/km)
Urbana	$2,67 \cdot 10^{14}$
Rural	$5,18 \cdot 10^{13}$
Autovía	$1,62 \cdot 10^{14}$

Fuente: elaboración propia.

A continuación, se va a mostrar la emisión total de partículas para cada distribución de tamaño. Para ello, se van a utilizar las Figuras 10, 11 y 12, las cuales corresponden a las partículas de la zona urbana, de la zona rural y de la zona autovía, respectivamente.

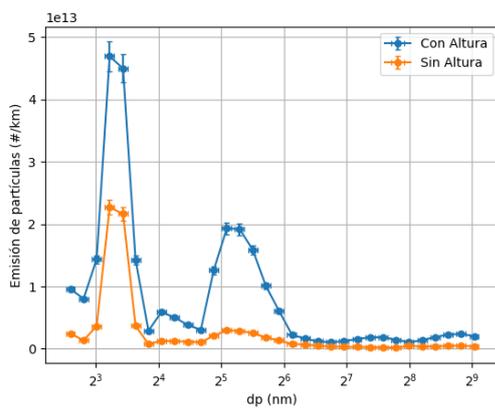


Figura 10. Emisión de partículas en función de su diámetro para la zona urbana. Fuente: elaboración propia.

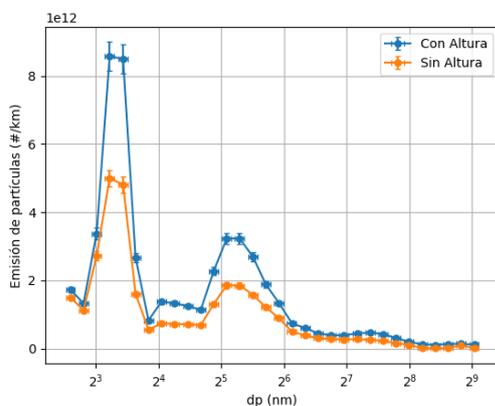


Figura 11. Emisión de partículas en función de su diámetro para la zona rural. Fuente: elaboración propia.

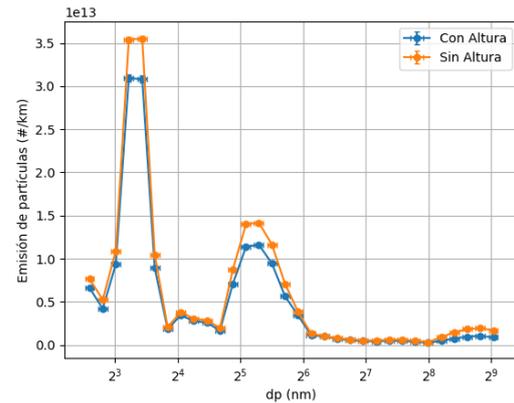


Figura 12. Emisión de partículas en función de su diámetro para la zona autovía. Fuente: elaboración propia.

En todas las zonas a excepción de la zona de autovía, la emisión de partículas es mayor en los ensayos realizados fuera de los límites de altura en comparación a los ensayos desarrollados dentro de los mismos. Esto concuerda con otros trabajos [10], donde un aumento de la altura provoca una bajada del contenido en oxígeno en el aire facilitando la creación de partículas. Este hecho puede tener su explicación en que la mezcla sea más pobre dado que la centralita detecta menos oxígeno en los gases, implicando una bajada de temperatura, lo que se traduce en que el catalizador trabaje de manera menos eficiente respecto a las partículas. Concretamente, en los ensayos realizados de este trabajo se tiene un 70% más de partículas en la zona urbana con altura y un 38% más de partículas totales en la zona rural con altura, cada uno comparado con su respectiva zona de ensayos sin altura.

La zona de autovía es la única que presenta una situación distinta, ya que en este caso el ensayo fuera de las condiciones frontera de altura da una menor concentración de partículas en comparación con el ensayo dentro de los límites de altura, siendo más exactos, la zona de autovía dentro de las condiciones tiene un 12% más de partículas. Este hecho puede deberse a la situación orográfica de la zona con altura, la cual presenta grandes pendientes a lo largo del recorrido, las cuales se pueden ver en la Figura 9. Es por este motivo por el cual el recorrido de autovía es el único de los ensayos con altura que presenta un mayor par motor y un mayor consumo de combustible frente a los resultados de la zona de autovía sin altura, hecho que corroboran las Tablas 3 y 4. Todo esto provoca que el par logre enmascarar la influencia de la altura sobre la concentración de partículas, haciendo que los resultados de emisión de las mismas en autovía sean muy semejantes. Además, cabe destacar que la temperatura del catalizador de tres vías es mayor, mejorando así su eficiencia en relación a las partículas.

3.2. Emisión de óxidos de nitrógeno

Antes de entrar a explicar las tendencias de emisión de los óxidos de nitrógeno, se va a realizar un nuevo análisis. En este caso, se va a estudiar la relación aire-combustible de los distintos ensayos, para lo cual se va a utilizar la Tabla 6, donde se encuentran las relaciones A/F para todas las zonas y todas las altitudes.

Tabla 6. Relación A/F de los ensayos.

Dentro de los límites de altura del ciclo RDE		
Zonas	A/F	
Urbana	15,9	$\sigma = 5,4$
Rural	14,8	$\sigma = 4,5$
Autovía	15,5	$\sigma = 6,7$
Fuera de los límites de altura del ciclo RDE		
Zonas	A/F	
Urbana	16,1	$\sigma = 5,9$
Rural	16,4	$\sigma = 6,5$
Autovía	13,8	$\sigma = 5,5$

Fuente: elaboración propia.

De la Tabla 6 se puede concluir que, tanto en zona urbana como en zona rural, se tiene una mayor relación en los ensayos fuera de los límites de altura del ciclo RDE, lo que implica una mezcla pobre, debida probablemente a que la ECU, al observar que hay escasez de oxígeno en el tubo de escape, baja la inyección de combustible. En cambio, en la zona de autovía pasa justo lo contrario, el ensayo dentro de los límites de altura muestra una mezcla rica, porque en este recorrido se tiene un mayor par motor que en el caso fuera de las condiciones frontera de altura.

Ahora, se van a estudiar los óxidos de nitrógeno, donde, para empezar, la Tabla 7 resume los resultados obtenidos para este contaminante.

Tabla 7. Emisión promedio de óxidos de nitrógeno.

Dentro de los límites de altura del ciclo RDE		
Zonas	Emisión (g/km)	
Urbana	0,1308	$\sigma = 0,5987$
Rural	0,0291	$\sigma = 0,3406$
Autovía	0,0140	$\sigma = 0,0278$
Fuera de los límites de altura del ciclo RDE		
Zonas	Emisión (g/km)	
Urbana	0,2288	$\sigma = 1,5725$
Rural	0,0688	$\sigma = 0,5227$
Autovía	0,0198	$\sigma = 0,0490$

Fuente: elaboración propia.

Una vez más, se va a presentar el análisis ANOVA mediante las Figuras 13, 14 y 15, las cuales reflejan los resultados de la Tabla 7, pero de una manera más aclarativa para así facilitar la comparación entre los distintos ensayos.

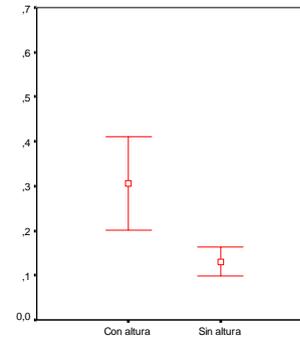


Figura 13. Emisión de NO_x en zona urbana. Fuente: elaboración propia.

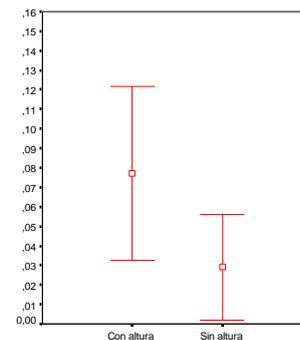


Figura 14. Emisión de NO_x en zona rural. Fuente: elaboración propia.

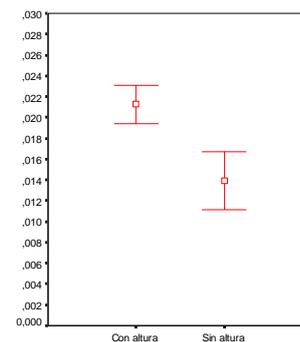


Figura 15. Emisión de NO_x en zona autovía. Fuente: elaboración propia.

En primer lugar, comentar los valores de la Tabla 7. Como se puede observar, tanto en los ensayos fuera de los límites de altura como en los ensayos dentro de los mismos, varía notablemente la concentración de óxidos de nitrógeno de manera independiente de la zona en la que se haya realizado el experimento. Por norma general, en un ciclo RDE clásico se espera que la mayor emisión de NO_x se de en la zona de autovía debido a que existe una relación directamente proporcional entre la velocidad y la formación de este tipo de contaminante, tal y como se ha observado en bibliografía [11], donde a mayor aceleración positiva relativa del vehículo, mayor es la emisión de NO_x . Sin embargo, esta tendencia no se tiene en los ensayos realizados en este trabajo debido a que cuando se llegan a las zonas de estudio, el motor ya está caliente y se está facilitando la posible formación de óxidos de nitrógeno.

Una vez comentado lo anterior, ya se puede pasar a hablar de los efectos que tiene la altitud sobre los NO_x . En todos los ensayos realizados fuera de las condiciones frontera de altura se tiene una concentración de óxidos nitrogenados mayor que en los ensayos dentro de los límites, concretamente, todos superan el 17% de emisión de este contaminante. Esta resolución concuerda con otros análisis [10] donde se observó que la concentración de NO_x incrementa con la altitud (exceptuando los ensayos con altitudes superiores a 2.990 metros).

La explicación para estos resultados reside en que, por un lado, en autovía fuera de los límites de altura se tiene una mayor temperatura en la cámara de combustión por el enriquecimiento de la mezcla, y, por otro lado, en que en urbana y en rural con altura se tiene, además de una temperatura relativamente alta, más oxígeno disponible por el empobrecimiento de la mezcla. Estos factores facilitan la formación de NO_x , dado que una alta temperatura y/o una mezcla pobre ayudan a la aparición de óxidos de nitrógeno.

Finalmente, comentar que los altos valores de desviación estándar pueden llegar a significar que, efectivamente, la ECU no está funcionando bajo las condiciones óptimas, lo cual explicaría dicha variabilidad en los resultados.

3.3. Otras emisiones

Aparte de las emisiones de partículas y óxidos de nitrógeno, también se midieron las cantidades emitidas de monóxido de carbono, dióxido de carbono, e hidrocarburos sin quemar.

3.3.1. Monóxido de carbono

En porcentajes, el CO urbano dentro de los límites de altura es 72,5% superior a los ensayos fuera de los límites, en rural este porcentaje es del 40,5% y, en autovía, el ensayo fuera de las condiciones frontera tiene un 6,2% más de CO que el dentro de las condiciones frontera de altura.

Las rutas urbana y rural, para los ensayos fuera de los límites, presentan una concentración de CO inferior a la que se obtiene en los ensayos dentro de los límites de altura, probablemente porque la mezcla es empobrecida por la ECU. En cambio, en la zona de autovía pasa justo lo contrario, teniendo más CO en el ensayo fuera de las condiciones frontera que dentro de ellas, en este caso debido a que la ECU debe estar enriqueciendo la mezcla para dar más par, haciendo que la combustión sea más incompleta.

3.3.2. Dióxido de carbono

En este caso, cabría esperar que la concentración de CO_2 fuese menor en aquellos casos en los que, en la sección 3.3.1., tuviesen una mayor cantidad de CO. Esto implicaría que en los ensayos fuera de los límites de altura de la zona urbana y la zona rural hubiese una mayor concentración de dióxido de carbono y, por el contrario, en la zona de autovía con altura existiese una menor concentración de este contaminante. Esta tendencia si sucede en el caso de urbana y en el de autovía, habiendo una diferencia de 11,0% y 36,3%, respectivamente y en comparación con sus respectivos ensayos dentro de los límites de altura, lo cual también se puede llegar a ver corroborado con los valores de la Tabla 6, es decir, con la relación aire-combustible. Sin embargo, el caso rural muestra otra tendencia, ya que en este caso la ruta dentro de las condiciones frontera de altura presenta un 6,7% más de concentración de CO_2 .

Para explicar el comportamiento del dióxido de carbono es necesario regresar a la Tabla 6, la cual muestra que en el ensayo rural fuera de los límites de altura se tiene una mezcla más pobre, es decir, se introduce menos carburante y, por tanto, se reducen las emisiones de CO_2 respecto al obtenido en el ensayo dentro de los límites de la misma zona.

3.3.3. Hidrocarburos sin quemar

Los ensayos fuera de los límites de altura muestran menos hidrocarburos sin quemar en comparación con los ensayos dentro de los límites. De manera aproximada, hay un 61% más de THC en sin altura urbana que en con altura urbana, unos 4 puntos más de THC en sin altura rural que en con altura rural, y un 15% más de THC en sin altura autovía que en con altura autovía.

Para poder explicar esta situación, es necesario hablar de la Tabla 6, la cual recoge los valores A/F de todos los experimentos. Tanto en la zona urbana como en la zona rural de los ensayos fuera de los límites de altura se tiene una mezcla más pobre que en los ensayos dentro de los límites de altura de urbana y rural, por lo que esta diferencia puede llegar a justificar que los THC sean menores en estos dos tipos de ensayos, además, en sin altura siempre se tuvo una mayor velocidad, lo cual implica una mayor inyección de combustible y, por ende, una mayor formación de THC. Cabe destacar, la notable diferencia que existe, entre la zona rural con altura y la zona rural sin altura, pero es en este ensayo donde existe una de las mayores diferencias en la relación A/F. En zona urbana se encuentra una diferencia de 0,2 puntos entre ensayos con altura y ensayos sin altura, mientras que, en zona rural, esta diferencia llega a superar los 1,5 puntos, lo cual puede justificar el comportamiento desigual que tienen esos ensayos.

En cuanto a la zona de autovía, la diferencia entre los dos tipos de ensayos difiere menos de un 20 %, y esta conducta puede deberse al hecho de que, según lo reflejado en la Tabla 6, el ensayo con altura muestra una relación de 13,8, es decir, mezcla rica. Sin embargo, este valor de A/F no permite incrementar lo suficiente la concentración de THC como para superar al experimento sin altura.

4. Conclusiones

La experimentación muestra que hay un impacto en el funcionamiento del motor ensayado sobre las emisiones contaminantes de los gases de escape cuando este opera fuera de los límites de altura del ciclo RDE estándar con respecto a cuando trabaja dentro de los mismos.

Los resultados nos han permitido concluir que los límites de altura del ciclo RDE están muy restringidos y deberían ser revisados.

Cuando aumenta la altura hemos detectado que la EOBD empobrece la relación aire-combustible debido al déficit de oxígeno provocado por el aumento de la altitud, lo cual repercute en las emisiones del vehículo.

Concretamente, en los ensayos realizados fuera de los límites de altura del ciclo RDE estándar en zona urbana y zona rural, se emiten un 70% y un 38% más de partículas totales, respectivamente, en comparación con los ensayos realizados dentro de los límites. Asimismo, en el caso de los óxidos de nitrógeno, todos los ensayos realizados fuera de los límites de altura muestran una emisión de más del 17% en comparación con los experimentos realizados dentro de los límites.

Por ello, este trabajo refleja la necesidad de ampliar los límites de altura del ciclo RDE, dado que, con los límites actuales, no se consideran condiciones de operación que resultan bastante comunes en la labor normal del transporte.

En conclusión, de acuerdo con los resultados de la investigación, se recomienda realizar una revisión de los límites de emisiones fijados por el ciclo RDE estándar, al menos respecto a los márgenes de altura considerados.

5. Referencias

- [1] WHO, World Health Organization. “Ambient air pollution: A global assessment of exposure and burden of disease”. 2016. Disponible en: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/250141>
- [2] Kazancoglu, Y., Ozbiltekin-pala, M., & Ozkan-ozen, Y. D. “Prediction and evaluation of greenhouse gas emissions for sustainable road transport within Europe”. *Rev. Sustainable Cities and Society*, vol. 70, 2020. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.102924>
- [3] EEA, European Environment Agency. “EEA Signals 2020: Towards zero pollution in Europe”. 2020. Disponible en: <https://www.eea.europa.eu/signals/signals-2020/signals-2020-towards-zero-pollution>.
- [4] Martin, W., & Ray, M. “Stormwater technical Standards Manual”. *Rev. The ICCT Briefing Paper*, pp. 1–17. Disponible en: http://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Euro6- VI_briefing_jun2016.pdf
- [5] OICA, Organisation Internationale des Constructeurs d'Automobiles. “RDE boundary conditions cumulative positive altitude gain”. 2019. Disponible en: https://wiki.unece.org/download/attachments/8188732/8/20190401%20OICA%20CPAG%20Presentation%20for%204th%20RDE%20IWG_final.pdf?api=v2

[6] Tsiakmakis, S., Fontaras, G., Cubito, C., Pavlovic, J., Anagnostopoulos, K., & Ciuffo, B. “From NEDC to WLTP: effect on the type-approval CO₂ emissions of light-duty vehicles”. *Rev. In Publications Office of the European Union*. 2017. Disponible en: <https://doi.org/10.2760/93419>

[7] Giechaskiel, B., Riccobono, F., & Bonnel, P. “Feasibility study on the extension of the real driving emissions (RDE) procedure to particle number (PN): Chassis dynamometer evaluation of portable emission measurement systems (PEMS) to measure particle number (PN) concentration: Phase II”. 2015. Disponible en: <https://doi.org/10.2790/74218>

[8] Suarez-Bertoa, R, Astorga C, Franco V, Kregar Z, Valverde V, Clairotte M, Pavlovic J, & Giechaskiel B. “On-road vehicle emissions beyond RDE conditions Experimental assessment addressing EU Real-Driving Emission (RDE)”. 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.2760/003337>

[9] Instruments, P. “Model 3090 Engine Exhaust”. *Rev. Communications*. 2006. Disponible en: <https://www.kenelec.com.au/wp-content/uploads/2018/12/TSI-3090-EEPS-Engine-Exhaust-Particle-Sizer-Spectrometer-Manual.pdf>

[10] Wang, H., Ge, Y., Hao, L., Xu, X., Tan, J., Li, J., Wu, L., Yang, J., Yang, D., Peng, J., Yang, J., & Yang, R. “The real driving emission characteristics of light-duty diesel vehicle at various altitudes”. *Rev. Atmospheric Environment*, vol. 191, pp. 126–131. 2018. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2018.07.060>

[11] Kurtyka, K., & Pielecha, J. “The evaluation of exhaust emission in RDE tests including dynamic driving conditions”. *Rev. Transportation Research Procedia*, vol. 40, pp. 338–345. 2019. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.050>