

INFORME FINAL

Caracterización de las Emisiones en Dinamómetro de Chasis para los Autobuses del Distrito Federal

Presentado a:

Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal

Contrato: GDF-SMA-GEF-SC-027-04

Elaborado por:

Centro de Combustibles Alternos, Motores y Emisiones

Departamento de Ingeniería Mecánica y Aeroespacial

Universidad de Virginia del Oeste

31 de Marzo de 2005



West Virginia University
Center for Alternative Fuels, Engines
and Emissions
Dept. of Mechanical and Aerospace
Engineering
P.O. Box 6106
Morgantown WV 26506-6106
Web: <http://cafee.wvu.edu/>
Phone: (304) 293-3111 ext 2323
Fax: (304) 293-6689

Introducción

El objetivo de este estudio es caracterizar las emisiones de un grupo de autobuses distintos que usan control común y avanzado de motores así como tecnologías de postratamiento y combustible de baja emisión en el Distrito Federal. Se midieron las emisiones de nueve vehículos, a saber: seis con motor diesel, dos de gas natural y uno híbrido de diesel y powertrain. Las emisiones de los vehículos diesel se obtuvieron utilizando combustible diesel estándar (350 ppm de azufre) y combustible diesel con un nivel de azufre medio (50 ppm) y combustible diesel de bajo azufre (15 ppm). (Nota: Los análisis a posteriori revelaron que el combustible diesel de nivel de azufre medio (50 ppm) contenía, en realidad 150 ppm de azufre).

Previo al inicio de las pruebas, se desarrolló un recorrido representativo denominado "Ciclo de Manejo del Distrito Federal", a partir de la información obtenida del tránsito de los autobuses del Distrito Federal. El ciclo era representativo de autobuses de baja y alta velocidad y autobuses operando en condiciones de corredor. Los detalles del desarrollo de este ciclo se incluyeron en un informe aparte titulado "Development of the Mexico City Schedule for Characterization of Emissions and Performance from Transit Buses".

Durante el periodo de pruebas en cinco de los vehículos el sistema Ride Along Vehicle Emissions Measurement (RAVEM) de Engine, Fuel, and Emissions Engineering, Inc midió las emisiones junto con el laboratorio de la Universidad de West Virginia (WVU). Los datos y las conclusiones de pruebas correlacionadas pueden encontrarse aparte en un estudio titulado "Correlation between West Virginia University Engine, Fuel and Emissions Engineering, Inc.'s RAVEM Emissions Measurements from Transit Buses".

Descripción de Laboratorio

Las emisiones de los vehículos examinados fueron medidas por el West Virginia University Transportable Heavy-Duty Vehicle Emissions Laboratory (TransLab). Dicho laboratorio se construyó con el propósito de recoger datos de las emisiones de los vehículos de carga pesada en uso. Información detallada y pertinente del diseño y funcionamiento del laboratorio se puede encontrar en los informes técnicos [1, 2 y 3]. El laboratorio esta constituido por un dinamómetro de chasis de carga pesada y funcionamiento completo con una capacidad de muestreo a volumen constante (CVS) que puede ser trasladada al campo de operación de autobuses para llevar a cabo las pruebas de emisión.

Dinamómetro

El dinamómetro de chasis utilizado en la investigación se colocó sobre un semi-remolque con ruedas movibles que podían desplazarse al suelo por medio de gatos hidráulicos. El vehículo a prueba se desplazaba a los rodillos del dinamómetro por medio de rampas. En la mayoría de los dinamómetros de chasis la potencia se toma de una serie de rodillos sobre los que el vehículo se asegura y se pone en marcha. Los rodillos de gran diámetro no son prácticos para una unidad móvil. Cuando se utilizan rodillos de bajo diámetro, el deslizamiento de la llanta supone un problema, ya que corrompe los datos y los neumáticos se recalientan. El Dinamómetro de Chasis Móvil de la WVU eliminó potencia mediante el enganche directo al eje a través del árbol de transmisión conectado al adaptador instalado a la tracción de las ruedas exteriores (Figura 1). El vehículo es apoyado sobre rodillos de giro libre que sirven para enlazar las ruedas con tracción y mantener la misma velocidad en ambos lados del vehículo. Los componentes del dinamómetro, son simétricos en cada lado del vehículo, consisten en absorbentes de potencia y una serie de volantes giratorios

elegidos. Se engranaron diferentes combinaciones de ruedas volantes para permitir la simulación de las cargas inerciales representativas del peso vehicular deseado (Figura 2). Se conduce el vehículo siguiendo un gráfico velocidad-tiempo, por un conductor que recibe una señal en una pantalla mientras que la velocidad y la carga del vehículo se registraban en codificadores y transmisores de presión de carga (torque). La carga aplicada al vehículo se determinó mediante el desempeño de aceleración libre para cada vehículo. Parte de la carga aplicada se disipó a través de pérdidas parásitas de los componentes rotatorios, y la carga restante se aplicó a la unidad de absorción de corriente mediante control en circuito cerrado. Las pérdidas parásitas se determinaron mediante el uso del procedimiento de aceleración libre realizado previo al montaje del vehículo en el dinamómetro.



Figura 1: El adaptador de cubo conecta el eje del vehículo a la unidad de absorción de potencia.



Figura 2: Las ruedas volantes se utilizaron para simular la inercia del vehículo.

Equipamiento del Muestreo de Emisiones Reguladas

La mayoría de las agencias de medio ambiente a nivel mundial han identificado a las partículas (PM), óxidos de nitrógeno (NO_x), hidrocarburos (HC) y monóxido de carbono (CO) como especies que necesitan ser reguladas y cuantificadas. De manera adicional, en este programa se midió, el dióxido de carbono (CO₂) ya que esta especie es un indicador sólido del consumo de combustible del motor así como por ser éste, un gas de efecto invernadero. Los gases del vehículo a prueba se canalizaron en un dispositivo Muestreador de volumen venturi constante de flujo crítico (CFV-CVS por sus siglas en inglés) de emisión completa y se mezcló con el aire ambiental filtrado HEPA en el túnel de disolución principal. Este túnel mide 18 pulgadas (45cm) de diámetro y una longitud de 20 pies (6.1m). El ritmo del flujo de los gases diluidos se controló y midió con precisión mediante un venturi de flujo crítico (CFV por sus siglas en inglés). Las muestras de gases se extrajeron del túnel de disolución, diez diámetros corriente abajo de la zona de inyección del escape; para permitir una mezcla en la región de flujo turbulento del túnel de disolución. Los gases de escape diluidos son muestreados y analizados de acuerdo con los procedimientos mencionados en el CFR 40, parte 86, subparte N [4]. La disolución de gases de escape se analizó mediante detectores infrarrojos no dispersivos (NDIR) de CO y CO₂ y detectores quimio-luminescentes para NO_x. Las emisiones de HC se analizaron mediante un detector de ionización de flama caliente (HFID). Los datos de gases estaban disponibles como concentraciones continuas a lo largo de las pruebas, y el flujo resultante de la concentración en el túnel de disolución se integró para calcular las emisiones en gramos por milla (g/milla). En el caso del CO, el laboratorio utilizó dos analizadores distintos, calibrados para diferentes rangos. El analizador de CO de bajo rango se dispuso para tomar una muestra de las emisiones de CO bajo rango que aparecen durante la mayoría de las pruebas en los vehículos diesel, mientras que el analizador de CO de alto rango se dispuso para tomar muestra de los picos que ocurren durante la operación transitoria. Las muestras de PM se recogieron utilizando un filtro de fibra óptica cubierto de fluoruro de carbono y se determinaron gravimetricamente. La eficiencia de los combustibles fue determinada utilizando un balance de carbono, las propiedades del combustible y los datos de emisión de los gases de escape. La Figura 3 muestra el laboratorio.



Figura 3: El laboratorio Móvil de la WVU probando el autobús híbrido-eléctrico ALLISON.

Muestreo de Especies no Reguladas

En este estudio las especies no reguladas, como el óxido nitroso (N_2O) y los aldehídos, también fueron medidas. Los aldehídos se cuantificaron bajo un acuerdo por separado con Environment Canada, así que este informe presenta solamente las emisiones de (N_2O). Para cada prueba, se recolectó una bolsa de muestreo integrada por medio de un sistema de muestreo calentado y posteriormente analizado utilizando un analizador foto acústico Innova 1302. El tren de muestra del 1302 consiste en una línea de muestreo de acero inoxidable, una bomba de muestreo de cabezal precalentado, un controlador de flujo y un contenedor calentado equipado con una bolsa Tedlar[®] de muestreo de 10 litros. Tanto la línea de muestra como la bolsa de cierre se calentaron previamente a una temperatura de 150° F para prevenir la condensación. Seguidamente a la recolección, se extrajo una muestra de la bolsa Tedlar[®] a través del analizador 1302 para determinar los niveles de N_2O y CO_2 . Los datos de CO_2 obtenidos por medio del Innova 1302 se compararon con los datos de las emisiones de CO_2 obtenidas por el analizador NDIR del laboratorio para confirmar que el analizador 1302 funcionaba adecuadamente y verificar la sincronización entre el instrumental del 1302 y el laboratorio. El sistema Innova 1302 aparece en la Figura 4.



Figura 4: Analizador foto acústico Innova 1302 y el sistema de muestreo.

Vehículos y Combustible

La tabla 1 presenta la matriz de los vehículos sometidos a prueba en este estudio. El plan original de pruebas requería el examen de diez vehículos. Sin embargo, uno de los autobuses no pudo someterse a las pruebas debido al mal funcionamiento del motor que no pudo ser reparado a tiempo para realizar las pruebas. En el autobús Ankaí GNC se encontraron problemas en el sistema de control del motor que causó que el vehículo se detuviera repetidamente, imposibilitando así un resultado satisfactorio en las pruebas en ese vehículo. Los autobuses se sometieron a las pruebas con un peso representativo del 70% de la carga completa de pasajeros. En el caso del autobús híbrido ALLISON las pruebas

se llevaron a cabo con dos pesos diferentes (46,438 libras y 35,000 libras), pero solo se han incluido en este informe los datos obtenidos de las pruebas con una carga de 35,000. Las 35,000 libras representan, solamente, el 50% de la carga total de pasajeros. Los procedimientos de las pruebas de la WVU para determinar el peso para las pruebas requerían que se combinaran el peso bruto de los vehículos y la carga de pasajeros para determinar el ajuste apropiado de la rueda volante inercial. El autobús híbrido ALLISON examinado en este estudio, tenía un chasis que incluía un equipamiento adicional diseñado para el mercado de los EEUU que no podía incluirse en ninguno de los modelos del Distrito Federal. La carga de 35,000 libras se determinó estimando el peso del equipamiento adicional (ascensor de silla de ruedas) y restándolo del peso bruto previo al cálculo del peso para la prueba. No se requirió la corrección del estado de carga en este vehículo ya que el sistema de control seguía la carga y el estado de carga de la batería neto no excedía el 1% de la energía consumida en los ciclos de pruebas.

Tabla 1: Muestra de Vehículos Examinados

Nombre Ref.	Vehículo	Transmisión	Peso Bruto (libras)	Peso Neto (libras)	Capacidad de Pasajeros	Lectura del Odómetro (millas)	Motor	Control de Emisiones
ALLISON	2004 ALLISON	Hybrid	35,000	29,000	113	36,846	2002 Cummins ISB-230	
Ankai	2004 Ankai	5 Speed Auto	32,150	22,700	90	1,055	2004 Cummins B5.9-230G	
BUSSCAR	2004 BUSSCAR	7 Speed Manual	33,025	23,425	91	693	2004 Cummins BG-230	
FAW	2004 Allied Motors	4 Speed Auto	48,025	33,175	140	553	2004 Cummins CG280	
MB10	2004 Marcopolo	5 Speed Manual	26,996	17,800	87	13,749	2004 Mercedes-Benz OM924LA	None
RTP1	2002 Marcopolo	5 Speed Auto	30,070	21,100	85	100,142	2002 Mercedes-Benz OM906LA	Johnson-Matthey
RTP3	2002 Marcopolo	5 Speed Auto	30,220	21,250	85	89,333	2002 Mercedes-Benz OM906LA	None
SCANIA15	2003 SCANIA	4 Speed Auto	50,040	35,400	139	19,819	2003 SCANIA DSC9-260	Oxidation Catalyst
SCANIA18	2004 SCANIA	4 Speed Auto	57,025	40,075	161	998	2004 SCANIA DC9-300	None
VOLVO12	2004 VOLVO	5 Speed Auto	32,050	22,500	91	4,282	2004 VOLVO VE D7C-300	None

Durante el periodo de pruebas se utilizaron tres combustibles diesel diferentes, incluyendo diesel comercial número 2 denominado D2, combustible diesel de bajo azufre denominado D2S50 y combustible diesel de ultra-bajo azufre denominado D2S15. Para poner a prueba los combustibles, los autobuses ya traían la toma de combustible y los tubos de salida se canalizaron a un contenedor de 55 galones externo al vehículo y una cantidad significativa de combustible se eliminó en un contenedor de desperdicios para evitar la contaminación del combustible a prueba. Las propiedades de cada combustible fueron determinadas a partir de muestras analizadas por Salbot LP (Carson, Ca).

Tabla 2: Propiedades seleccionadas de los combustibles diesel utilizados durante las pruebas

	D2S15	D2S50	D2	CNG
Poder Calorífico (BTU/libra)	18,576	18,577	18,302	22,745
% Carbono (por peso)	86.97	86.5	86.31	74.04
Número de Cetanos	41.5	57.3	49.7	n/a
Densidad (g/ml)	0.8515	0.8454	0.8376	0.7317 kg/m ³
% Aromáticos (en volumen)	29.4	14.3	25.0	n/a
% Contenido de hidrógeno (en peso)	12.93	13.83	13.44	23.70
Azufre Total (ppm)	4.3	152.8	355.3	n/a

El análisis de los combustibles diesel no se finalizó hasta el término del periodo de pruebas, cuando se descubrió que el diesel con 50ppm de azufre contenía, en realidad, 152.8 ppm de azufre. La WVU cree que el combustible pudo haberse contaminado en los contenedores en los que el combustible estaba almacenado en STE. Los contenedores habían almacenado previamente aceite lubricante que normalmente contiene altos niveles de azufre. Se realizó un análisis fraccional en el combustible GNC utilizado por los vehículos a gas natural tal y como se presenta la Tabla 3. El combustible GNC tiene un poder calorífico más bajo, 1037 BTU/scf y una densidad de 20.7 gramos por pie cúbico estándar.

Tabla 3: Análisis Fraccional del combustible de gas natural

Componente	% Fracción Molar
Metano	92.633
Etano	5.568
Propano	0.301
I-Butano	0.052
N-Butano	0.048
I-Pentano	0.021
N-Pentano	0.017
Nitrógeno	0.634
Dióxido de Carbono	0.629
Oxígeno	0.022
Hexano	0.074

Corrección al Estado de Carga

El programa de investigación permitía la corrección al estado de carga (SOC), si fuera necesaria, para el autobús híbrido ALLISON. Las pautas para la corrección SOC están establecidas por El protocolo SAE J2711 [5]. Durante la ejecución de este programa, se determinó el SOC del autobús ALLISON, gracias a una medición de amperio-hora proporcionada por los ingenieros de ALLISON y un sistema de baterías de 600 voltios. Se determinó que la corrección SOC más alta fue de un 0.25% (aproximadamente) y por lo tanto, según SAE J2711, no fue necesaria la corrección SOC.

Desarrollo del ciclo de Manejo de Autobuses

Para este programa se desarrollaron tres ciclos representativos de la operación de los autobuses de transporte en el Distrito Federal. La WVU equipó varios autobuses de diferentes recorridos con loggers del sistema de posicionamiento global (GPS) y recopiló datos sobre la velocidad-tiempo para más de 50 horas de operación. Los datos fueron filtrados para producir una serie de micro-recorridos que a su vez fueron combinados de manera aleatoria para establecer los ciclos para las pruebas. La WVU seleccionó tres ciclos, cada uno de una duración de 1,000 segundos, los cuales representan mejor las características de velocidad-tiempo de segmentos selectos de todos los datos. El segmento MX1 (Figura 5) representa la operación a baja velocidad, MX2 (Figura 6) representa la operación a velocidad mediana y MX3 representa el desempeño de los autobuses de transporte cuando utilizaban los carriles confinados para uso exclusivo de autobuses de pasajeros asociados con el Bus Rapid Transit (BRT). Los tres ciclos se combinaron para establecer el Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal (MCS por sus siglas en inglés México City Schedule -Figura 8). Para más información sobre el desarrollo del Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal (MCS), véase el informe preparado para la Secretaría de Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal titulado "Development of Mexico City Schedule for Characterization of Emissions and Performance from Transit Buses".

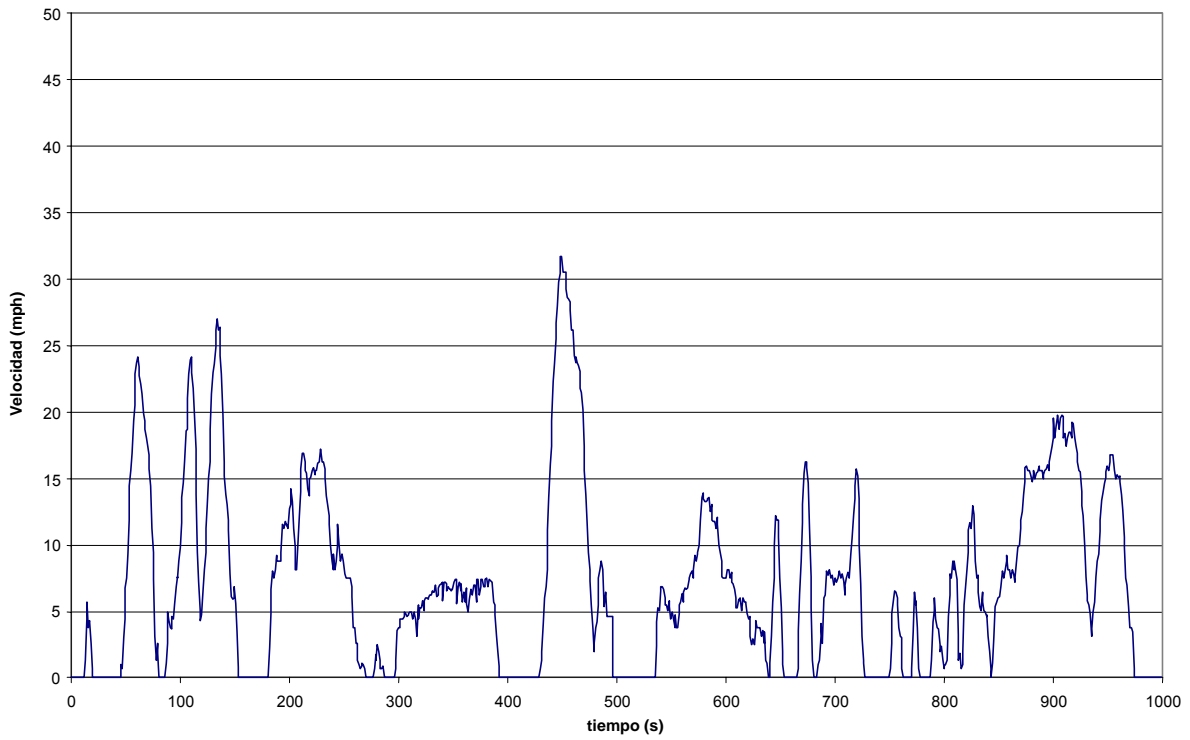


Figura 5: Segmento MX1 del Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal

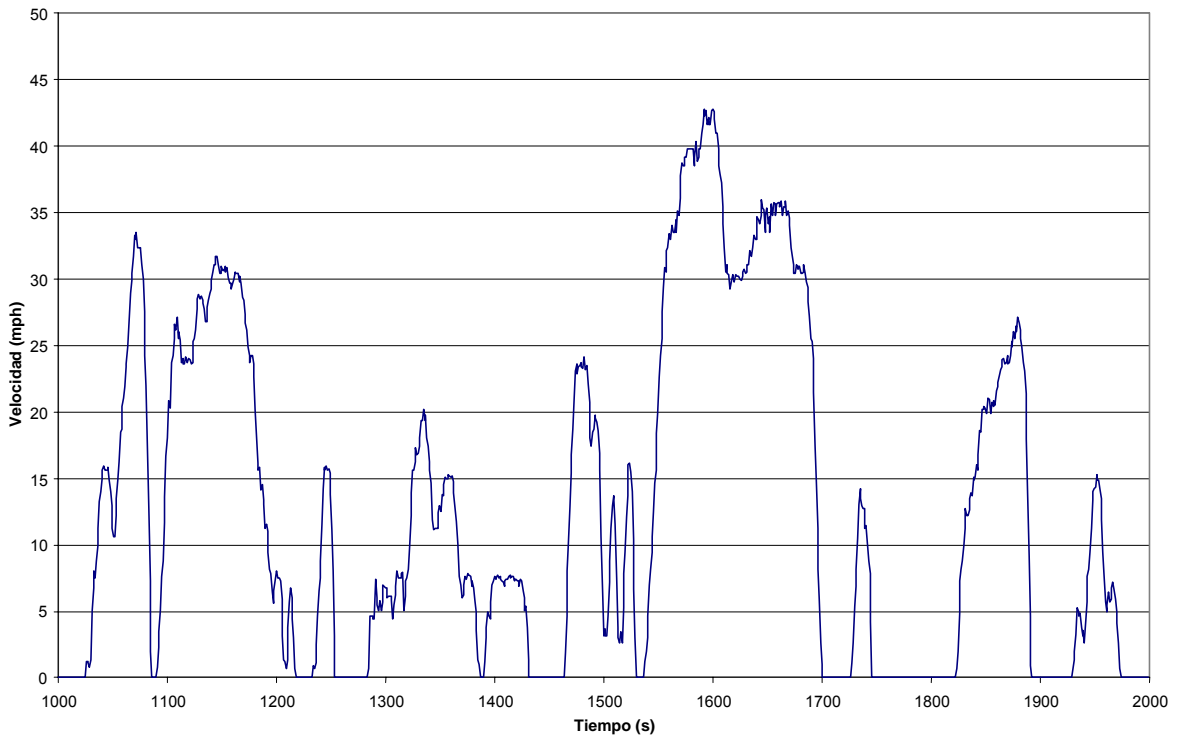


Figura 6: Segmento MX2 del Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal

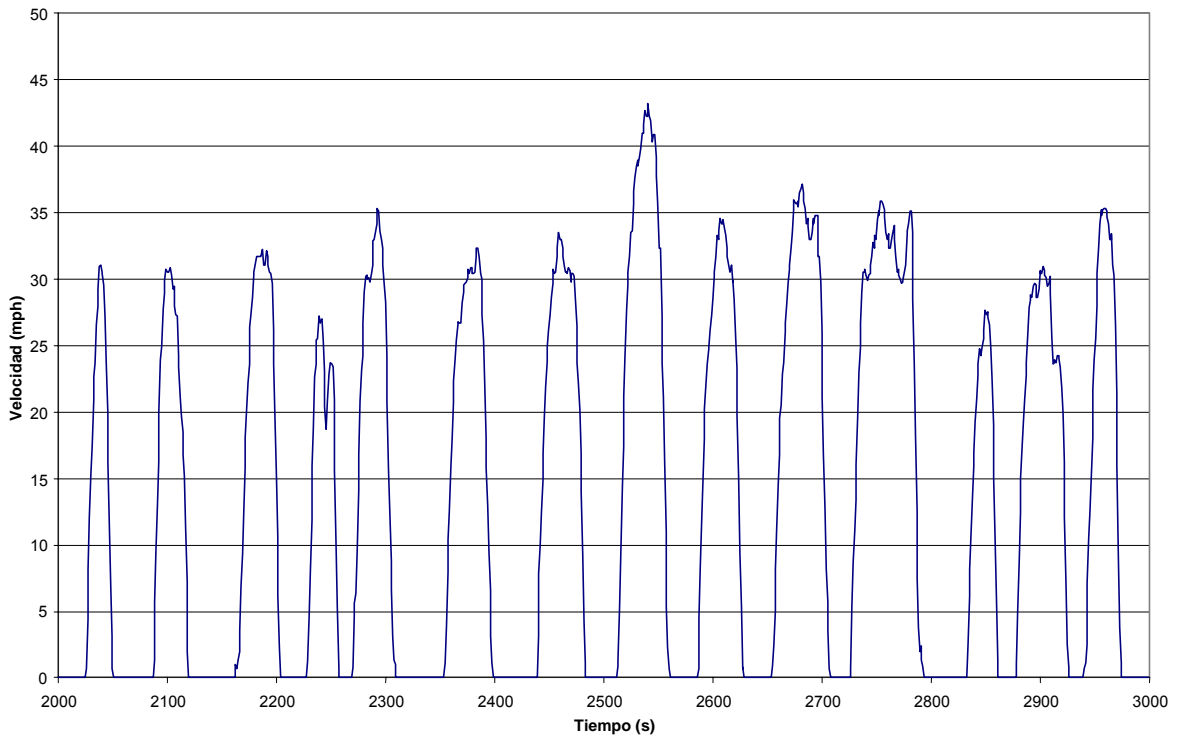


Figura 7: Segmento MX3 del Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal

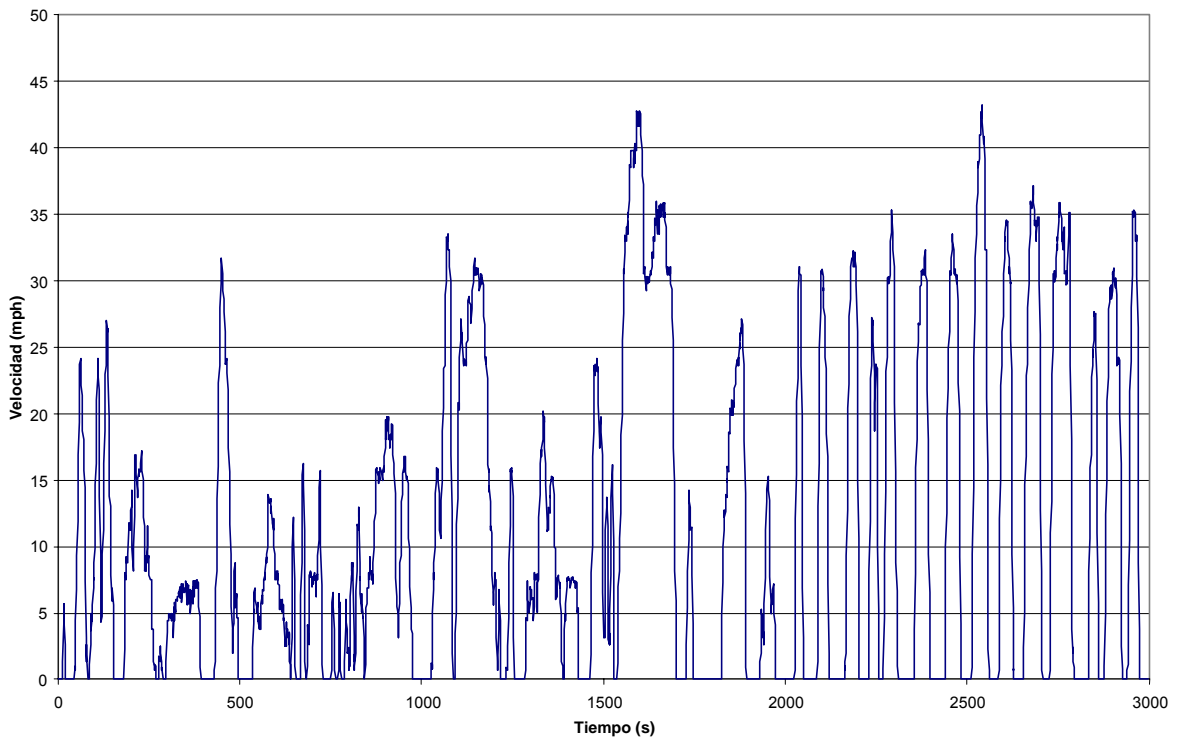


Figura 8: Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal (MCS)

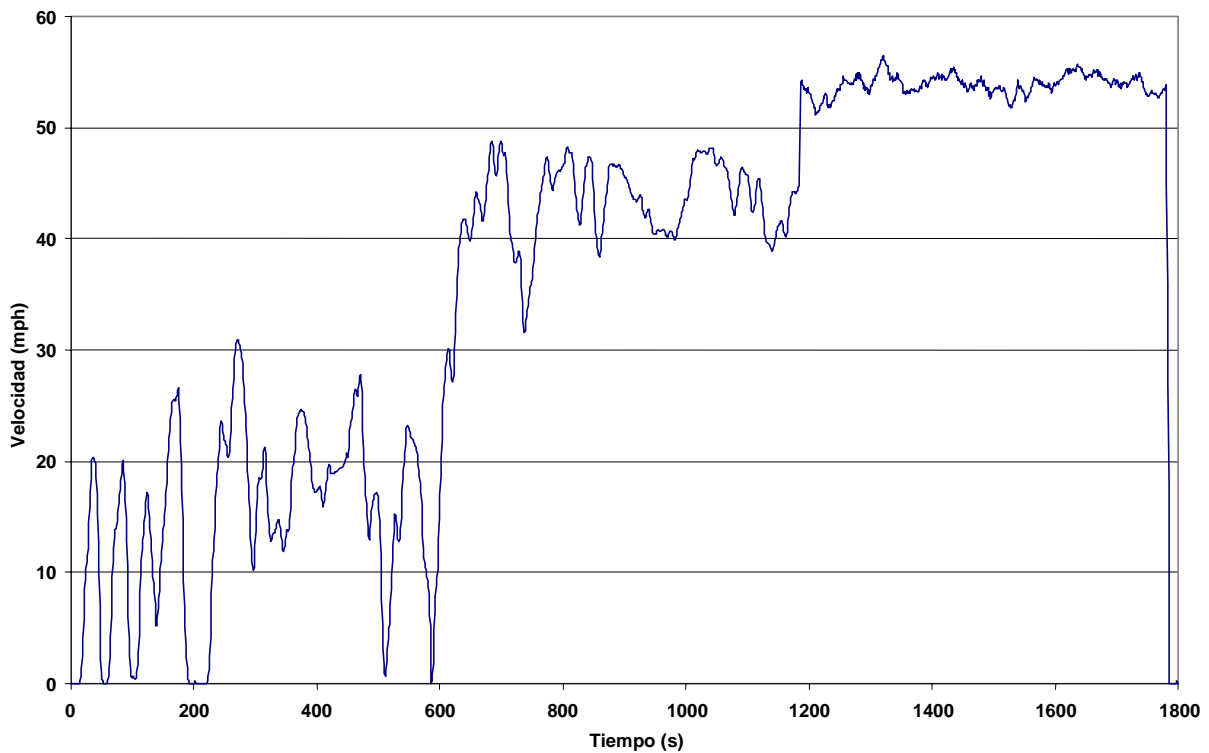


Figura 9: Ciclo Europeo en tránsito (ETC)

Se evaluó cada vehículo utilizando el Ciclo Europeo en tránsito (ETC por sus siglas en inglés), el cual representa las condiciones de conducción urbanas, rurales y de carretera y tiene una duración total de 1,800 segundos (600 segundos por segmento). El segmento urbano contiene frecuentes partidas, paradas y altos en punto muerto y una velocidad máxima de 49.6 km/h (31 millas/hora). El segmento rural contiene aceleración rápida y una velocidad media de 71.36 km/h (41.6 millas/hora), mientras que el segmento de carretera tiene una velocidad media de 87.2 km/h (54.5 millas/hora). En la Figura 9 tenemos la representación grafica del ciclo ETC.

Procedimientos de Aceleración Libre (Coastdown)

Para imitar correctamente la operación de los autobuses, hay que considerar los factores que contribuyen a las pérdidas en camino, por ejemplo, resistencia del aire y pérdidas debidas a la rotación de los neumáticos. El movimiento del vehículo está regido por la siguiente ecuación de carga.

$$\frac{1}{2}mV \frac{dV}{dt} = \frac{1}{2}\rho AC_D V^3 + \mu mgV + mgV \sin \theta$$

Ecuación 1 - Ecuación de carga

Donde:

$\frac{1}{2}mV \frac{dV}{dt}$	Potencia inercial del vehículo
$\frac{1}{2}\rho AC_D V^3$	Pérdida de potencia debida a resistencia aerodinámica
μmgV	Pérdida de potencia debida a resistencia de rotación de neumáticos
$mgV \sin \theta$	Pérdida/Aumento de potencia debida (o) a cambios de elevación
m = masa vehicular V = velocidad ρ = densidad del aire A = área frontal C _D = coeficiente de resistencia μ = coeficiente de pérdida de rotación g = aceleración debida a gravedad θ = pendiente de carretera	

Puesto que el coeficiente de resistencia del vehículo y la resistencia de rotación no se pueden determinar con medidas estáticas, se empleó un método empírico para determinar estos valores. Se colocó cada vehículo del programa en un camino nivelado a aproximadamente 20 m/s y se permitió que el vehículo se acelerara libremente mientras se recopilaban los datos mediante loggers del sistema de posicionamiento global. Para poder eliminar efectos residuales de la elevación se permitió que el vehículo se acelerara en las dos direcciones. La Figura 10 presenta los datos de la aceleración del autobús SCANIA18 junto con la curva de aceleración libre derivada sobre el mismo camino.

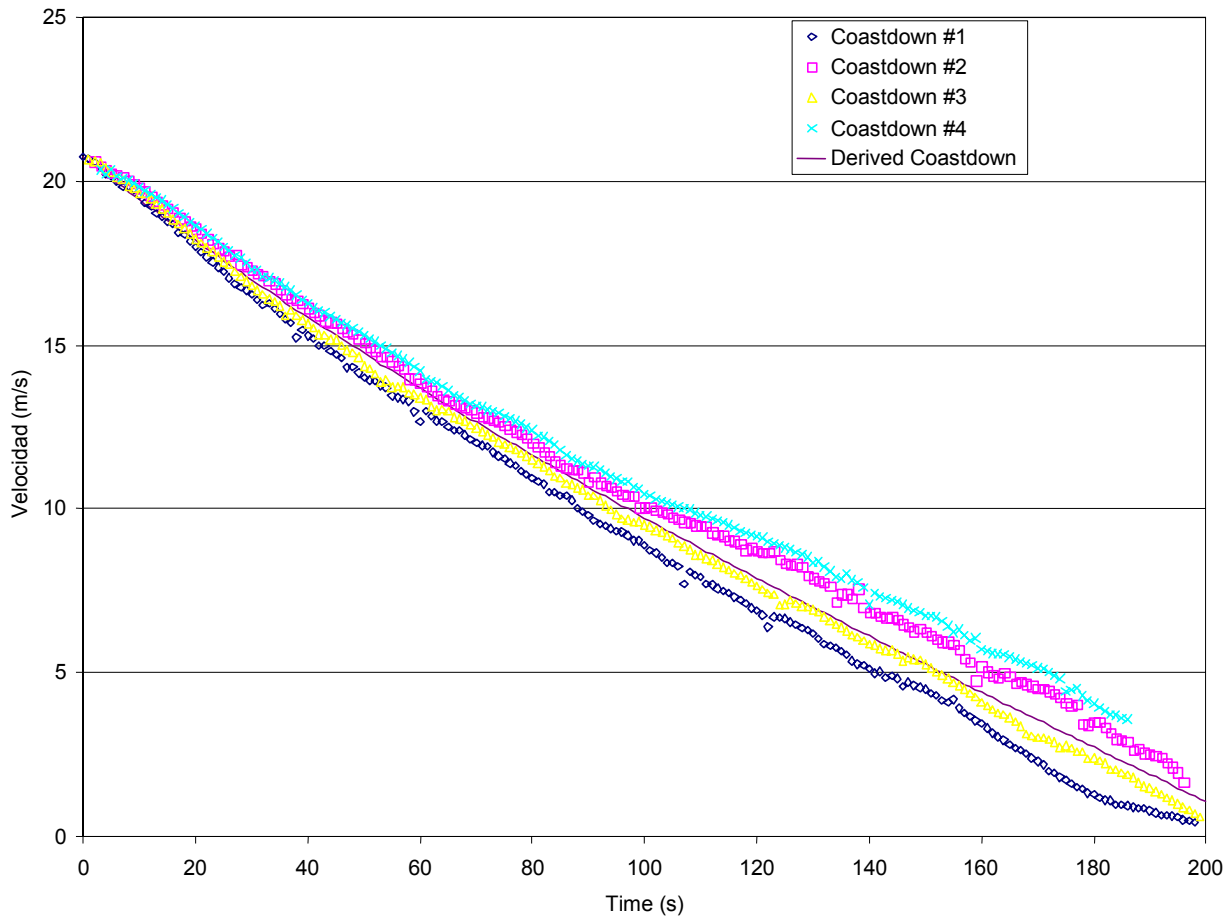


Figura 10: Datos de la aceleración libre en pista para el autobús SCANIA18

Después, se manipularon los datos de velocidad-tiempo para obtener un mapa de aceleración (dV/dt) versus la velocidad cuadrada (V^2). Para determinar la aceleración vehicular, se puede reescribir la ecuación 1 de la siguiente manera.

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\rho A C_D}{2m} V^2 + \mu g$$

Ecuación 2 - Ecuación de carga sobre pendiente cero para aceleración

donde los términos $\frac{\rho A C_D}{2m}$ y μg son las constantes C1 y C2.

Sometiendo a una regresión lineal de mínimos cuadrados los datos de la aceleración (dV/dt) versus la velocidad cuadrada (V^2), se determinaron los coeficientes C1 y C2 y éstos se utilizaron para simular las pérdidas en el dinamómetro.

La Figura 11 presenta los datos reales del dV/dt vs V^2 para el autobús SCANIA18 después de cuatro aceleraciones (2 en cada dirección). La dispersión se debe a la alta resolución de tiempo de la prueba en relación con la capacidad del sensor de posicionamiento global para determinar con precisión la velocidad. Solucionando la Ecuación 2 con las constantes derivadas empíricamente de C1 (-0.000119) y C2 (-0.082455) se obtuvo un valor para C_D

de 0.686 y para μ de 0.0084. Los valores normales C_D y μ para un vehículo de son 0.79 y 0.009, respectivamente.

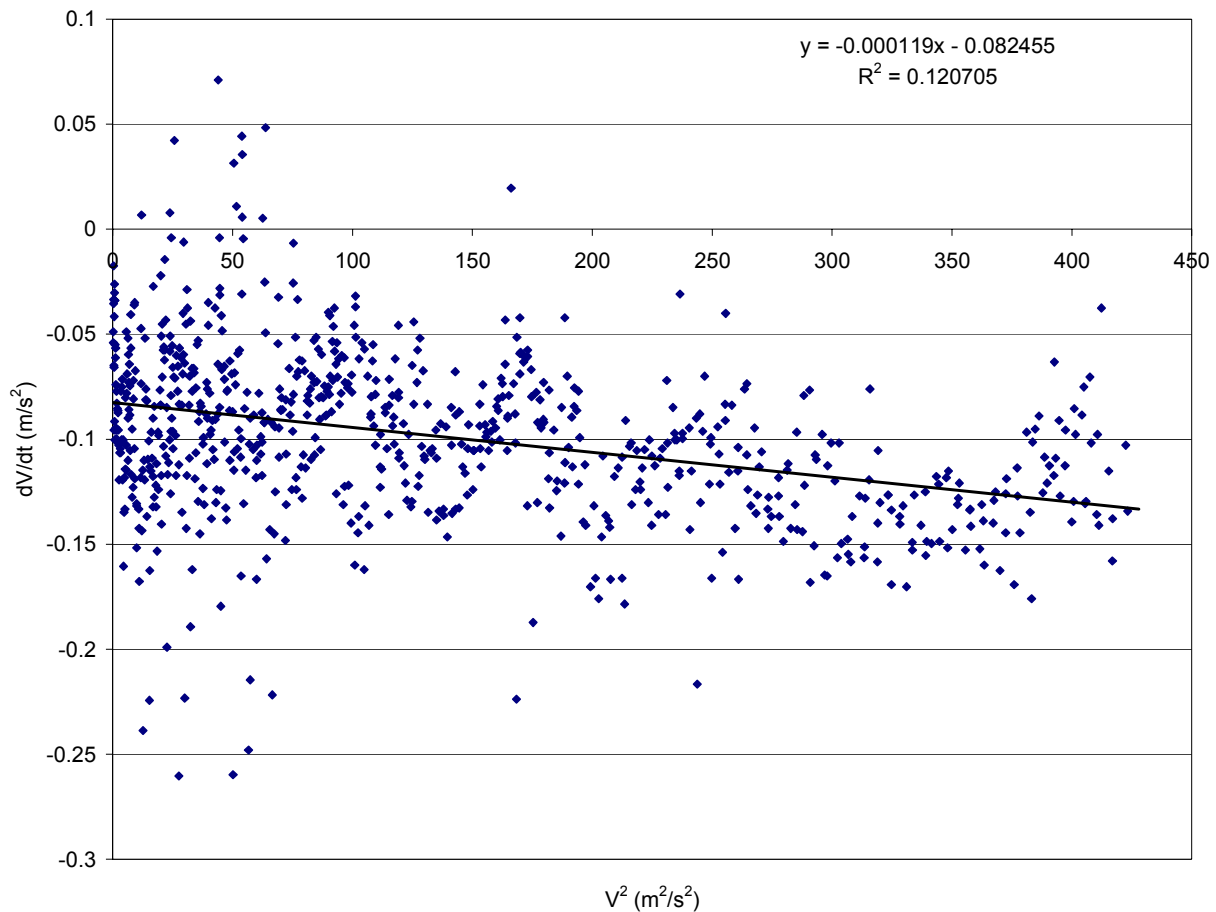


Figura 11: Tasa de deceleración para el autobús SCANIA18 (40,075 lb peso neto)

Procedimientos de pruebas

Se realizaron pruebas de fondo al comienzo y al final de las pruebas diarias. Para estas pruebas el sistema de muestreo del laboratorio funcionaba de la misma manera que durante una prueba normal, excepto que el vehículo no estaba en marcha. Esto permitió que el laboratorio determinara los niveles de fondo de partículas para la corrección de las muestras de partículas de los vehículos. En este programa, las pruebas de fondo duraron 1,800 segundos.

Una vez tomadas las muestras de fondo iniciales, se opera el vehículo a una velocidad constante para calentar el tren del dinamómetro y permitir que el diferencial de las ruedas volantes subiera a 37.78°C (100°F). Después del calentamiento del dinamómetro, se medían las emisiones mientras el vehículo pasaba por el segmento MX1 del MCS, lo cual les permitía a los técnicos asegurar que funcionaban correctamente los instrumentos del laboratorio (aunque se registraron estos datos, no se usan en las comparaciones en el presente informe). Después, se dejaron descansar tanto el vehículo como el laboratorio durante 20 minutos antes de iniciar las pruebas a ser registradas. Al terminar cada prueba, se repitió el descanso de 20 minutos. Siempre que se excedió el período de descanso, se

repitió el proceso de calentamiento/descanso antes de realizar la siguiente prueba demostrable.

Durante el proceso de pruebas, se analizaron y registraron de forma continua las muestras gaseosas del túnel de disolución. Además, se recolectó en una bolsa Tedlar una muestra de gases integrada para el análisis post-prueba. Para obtener los resultados de emisiones de la prueba, se utilizó la Ecuación 3 de la siguiente manera

$$E_{mass} = \frac{V_{mix} \times \rho_E \times [E_{conc} - E_{background} \left[1 - \frac{1}{DF}\right]]}{10^6}$$

Ecuación 3 - Cálculo de masa de emisiones

donde

E_{mass}	Masa total, en gramos, de emisiones
V_{mix}	Volumen total de gases de escape diluidos durante la prueba
ρ_E	Densidad de la emisión de interés
E_{conc}	Concentración en partes por millón (ppm) de la emisión en los gases de escape diluidos
$E_{background}$	Concentración en ppm de la emisión en el aire diluyente (de fondo)
DF	Factor de disolución

En el caso de los óxidos de nitrógeno, el resultado final se multiplica por el factor de corrección de humedad (KH). Los resultados de estos cálculos se dividieron por la distancia recorrida para obtener los resultados de emisiones en gramos por milla (g/milla). Para presentar emisiones continuas en el formato gramos por segundo, véase Apéndice C, se utiliza la Ecuación 3 para convertir la concentración instantánea de partes por millón a masa y se integra esta masa durante un período (en este caso, un segundo) para determinar el valor en gramos por segundo.

Control de Calidad

Como un elemento del Programa de Control de Calidad, los investigadores de la WVU realizaron medidas de NO_x , PM y CO_2 . En el caso de NO_x , se utilizaron dos analizadores distintos. La Figura 12 indica que había una gran similitud entre los dos analizadores. Se midieron las PM utilizando el método de filtración apropiado para la investigación así como una microbalanza oscilante de elemento cónico (TEOM por sus siglas en inglés) en aproximadamente la mitad de los recorridos.

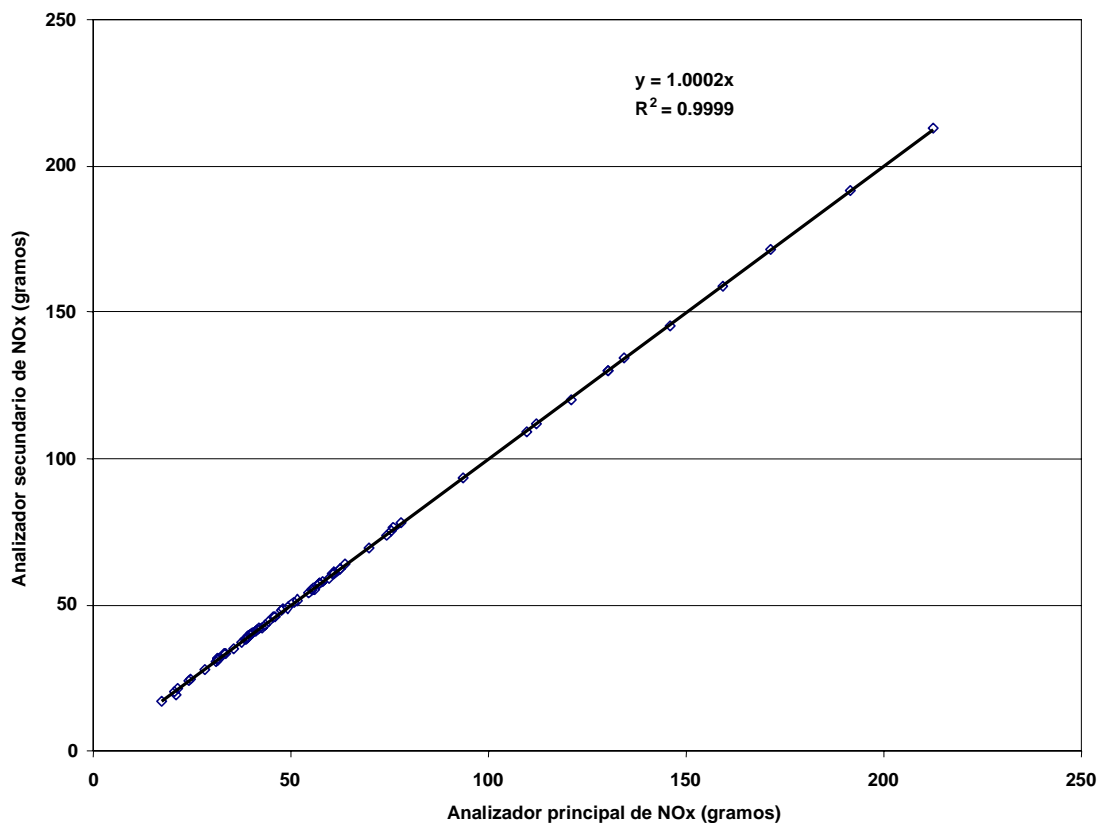


Figura 12: Comparación de las Mediciones de los Óxidos de Nitrógeno con los Analizadores Paralelos

En varios estudios anteriores se han comparado los datos de la TEOM con datos del filtro de PM. Un estudio australiano encontró que la TEOM indicaba, por lo general, menos masa en un 16% que el filtro de PM [5]. Gilbert et al. [7] examinaron la relación durante el ajuste del temperatura de muestreo y la tasa de flujo de la TEOM. Kelley y Morgan [8] encontraron que la TEOM indicaba menos masa, entre un 20% y un 25%, que el filtro. Otros investigadores, entre ellos Moosmuller et al. [9], han confirmado que las mediciones en la TEOM registran menos masa que un filtro. La Figura 13 indica que los métodos TEOM y filtro en el presente estudio exhiben mucha correlación, puesto que la TEOM produjo más o menos un 76% de la masa del filtro, lo cual se compara bien con los resultados presentados por Kelley y Morgan.

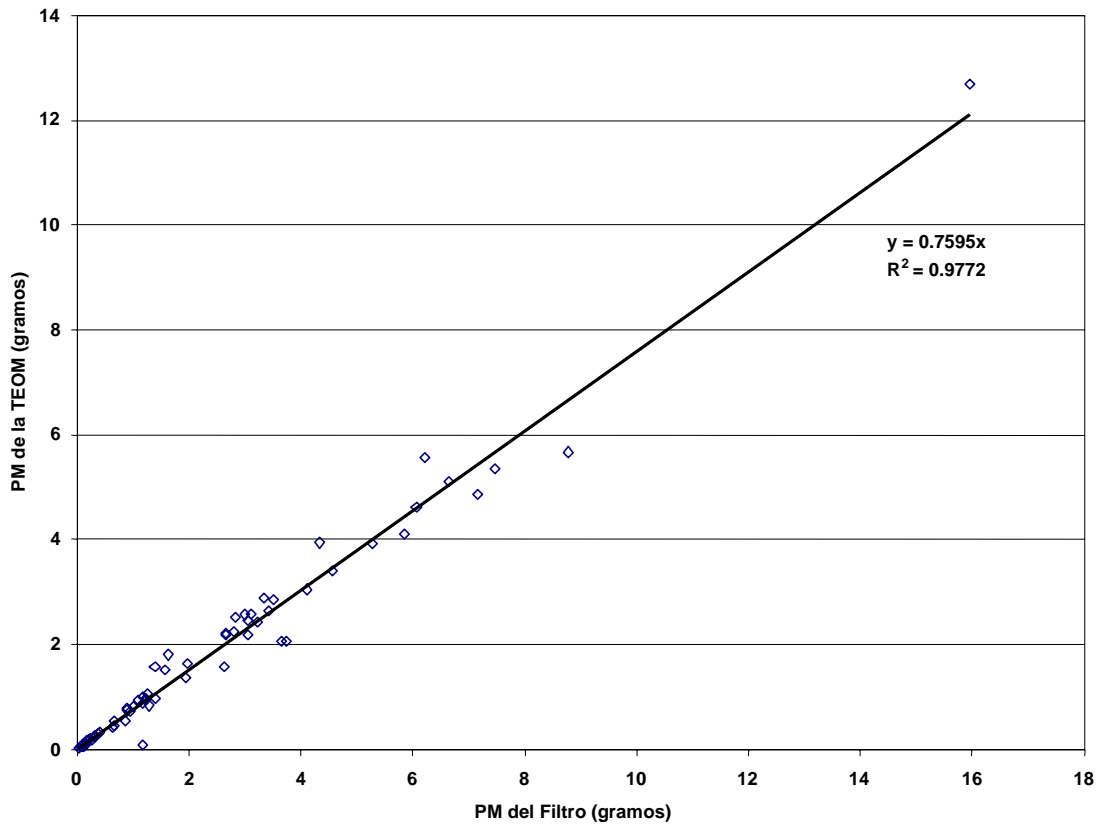


Figura 13: Comparación de emisiones de partículas medidas con filtro y dispositivos TEOM

El método principal para la medición del CO₂ utiliza un analizador infrarrojo apropiado para la investigación, y se puede determinar por la integración de datos registrados de forma continua durante la prueba mediante el análisis de muestras recolectadas en bolsas. El analizador foto acústico Innova utilizado para medir el N₂O también fue utilizado en un número significativo de los procesos de medición del CO₂. La alta correlación en los resultados del CO₂ entre el Innova y el laboratorio da mucha credibilidad a los datos del N₂O medidos con el Innova 1302.

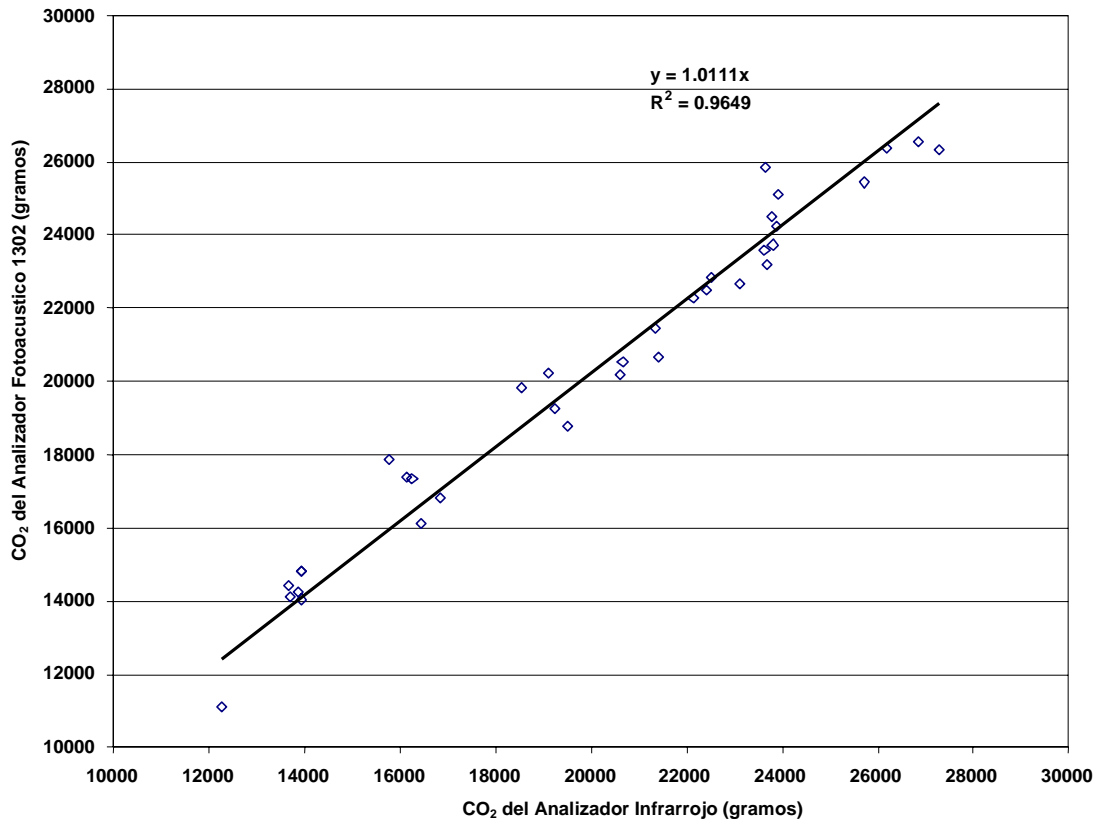


Figura 14: Comparación de emisiones de dióxido del carbono medidas con los analizadores foto acústico e infrarrojo

En otro informe titulado "Correlation between West Virginia University and Engine, Fuel, and Emissions Engineering, Inc.'s RAVEM Emissions Measurement from Transit Buses" se describen otras verificaciones de las mediciones realizadas por la WVU.

Resultados y Análisis

La Tabla 4 presenta un resumen de las pruebas realizadas durante este estudio, mientras que la Tabla 5 enlista las fechas, vehículos, pesos, ciclos de pruebas, y combustibles para dichas pruebas. La información de los vehículos y del combustible esta correlacionada con las Tablas 1 y 2 presentadas anteriormente en este informe. Las emisiones completas y los datos de la economía de combustible se encuentran en el Apéndice A. Se reconoce que la importancia estadística de los resultados y la conclusión podría haber sido reforzada si se hubieran repetido más pruebas; sin embargo, la limitación de fondos restringió el número de repeticiones que podían llevarse a cabo.

Para realizar el informe sobre las emisiones, los datos continuos integrados normalmente se utilizan junto con los datos de la bolsa integrada, como una forma de verificación. En el caso del CO, los datos de bolsa integrada se utilizan para el resultado final de CO para una combinación de factores. Durante la operación transitoria se registraron picos de CO pero en la mayoría de las pruebas, los niveles medidos son menos del 10% que los de los picos. Cuando se opera en el 5% del rango inferior, el funcionamiento de los analizadores de CO no es muy exacto, por lo cual la WVU utilizó dos analizadores que operan en dos rangos diferentes. El analizador de rango alto tiene la capacidad de medir todos los picos transitorios mientras que el analizador de rango bajo, el cual excede la escala durante operación continua, puede medir con mayor precisión los datos de la bolsa integrada.

Tabla 4 – Resumen de las pruebas realizadas durante este proyecto

Ciclo	Combustible	ALLISON	BUSSCAR	FAW	MB10	RTP1	RTP3	SCANIA 15	SCANIA 18	VOLVO 12	Total
ETC	GNC		2								2
	D2S15	2			2	2	4	2	1	2	15
ETC Total		2	2		2	2	4	2	1	2	17
MX1	GNC		4	3							7
	D2				2		2	3		5	12
	D2S15	3			3	3	4	3	3	3	22
	D2S50				3	2	2		3		10
MX1 Total		3	4	3	8	5	8	6	6	8	51
MX2	GNC		2	2							4
	D2				2		2	2		4	10
	D2S15	2			2	1	1	2	3	2	13
	D2S50				2	2	2		2		8
MX2 Total		2	2	2	6	3	5	4	5	6	35
MX3	GNC		2	2							4
	D2				2		2	2		3	9
	D2S15	2			2	1	2	2	2	2	13
	D2S50				2	2	2		2		8
MX3 Total		2	2	2	6	3	6	4	4	5	34
Gran Total		9	10	7	22	13	23	16	16	21	137

Tabla 5 - Pruebas vehiculares realizadas

Fecha	Hora	Vehículo	ID de Prueba	Peso (lb)	Ciclo	Combust.
10/30	4:30 PM	VOLVO12	4310-1	32050	MX1	D2S15
10/30	5:09 PM	VOLVO12	4311-1	32050	ETC	D2S15
10/30	5:58 PM	VOLVO12	4312-1	32050	MX1	D2S15
10/30	5:58 PM	VOLVO12	4312-2	32050	MX2	D2S15
10/30	5:58 PM	VOLVO12	4312-3	32050	MX3	D2S15
10/30	7:07 PM	VOLVO12	4313-1	32050	ETC	D2S15
10/30	9:10 PM	VOLVO12	4315-1	32050	MX1	D2S15
10/30	9:10 PM	VOLVO12	4315-2	32050	MX2	D2S15
10/30	9:10 PM	VOLVO12	4315-3	32050	MX3	D2S15
10/31	1:07 PM	VOLVO12	4318-1	32050	MX1	D2
10/31	1:45 PM	VOLVO12	4319-1	32050	MX1	D2
10/31	1:45 PM	VOLVO12	4319-2	32050	MX2	D2
10/31	2:56 PM	VOLVO12	4320-1	32050	MX1	D2
10/31	2:56 PM	VOLVO12	4320-2	32050	MX2	D2
10/31	2:56 PM	VOLVO12	4320-3	32050	MX3	D2
10/31	4:10 PM	VOLVO12	4321-1	32050	MX1	D2
10/31	4:10 PM	VOLVO12	4321-2	32050	MX2	D2
10/31	4:10 PM	VOLVO12	4321-3	32050	MX3	D2
10/31	5:20 PM	VOLVO12	4322-1	32050	MX1	D2
10/31	5:20 PM	VOLVO12	4322-2	32050	MX2	D2
10/31	5:20 PM	VOLVO12	4322-3	32050	MX3	D2
11/2	7:10 AM	SCANIA15	4328-1	50040	MX1	D2S15
11/2	7:47 AM	SCANIA15	4329-1	50040	ETC	D2S15
11/2	8:37 AM	SCANIA15	4330-1	50040	MX1	D2S15
11/2	8:37 AM	SCANIA15	4330-2	50040	MX2	D2S15
11/2	8:37 AM	SCANIA15	4330-3	50040	MX3	D2S15
11/2	9:47 AM	SCANIA15	4331-1	50040	ETC	D2S15
11/2	10:37 AM	SCANIA15	4332-1	50040	MX1	D2S15
11/2	10:37 AM	SCANIA15	4332-2	50040	MX2	D2S15
11/2	10:37 AM	SCANIA15	4332-3	50040	MX3	D2S15
11/2	12:18 PM	SCANIA15	4333-1	50040	MX1	D2
11/2	12:55 PM	SCANIA15	4334-1	50040	MX1	D2
11/2	12:55 PM	SCANIA15	4334-2	50040	MX2	D2
11/2	12:55 PM	SCANIA15	4334-3	50040	MX3	D2
11/2	2:05 PM	SCANIA15	4335-1	50040	MX1	D2
11/2	2:05 PM	SCANIA15	4335-2	50040	MX2	D2

Fecha	Hora	Vehículo	ID de Prueba	Peso (lb)	Ciclo	Combust.
11/2	2:05 PM	SCANIA15	4335-3	50040	MX3	D2
11/5	4:37 PM	RTP3	4352-1	30220	MX1	D2S15
11/5	5:14 PM	RTP3	4353-1	30220	MX1	D2S15
11/5	5:14 PM	RTP3	4353-2	30220	MX2	D2S15
11/5	5:14 PM	RTP3	4353-3	30220	MX3	D2S15
11/5	6:24 PM	RTP3	4354-1	30220	ETC	D2S15
11/5	7:14 PM	RTP3	4355-1	30220	MX1	D2S15
11/5	7:14 PM	RTP3	4355-3	30220	MX3	D2S15
11/5	8:24 PM	RTP3	4356-1	30220	ETC	D2S15
11/6	4:51 PM	RTP3	4359-1	30220	MX1	D2S15
11/6	5:27 PM	RTP3	4360-1	30220	ETC	D2S15
11/6	6:18 PM	RTP3	4361-1	30220	ETC	D2S15
11/6	7:08 PM	RTP3	4362-1	30220	MX1	D2S50
11/6	7:08 PM	RTP3	4362-2	30220	MX2	D2S50
11/6	7:08 PM	RTP3	4362-3	30220	MX3	D2S50
11/6	8:18 PM	RTP3	4363-1	30220	MX1	D2S50
11/6	8:18 PM	RTP3	4363-2	30220	MX2	D2S50
11/6	8:18 PM	RTP3	4363-3	30220	MX3	D2S50
11/6	9:28 PM	RTP3	4364-1	30220	MX1	D2
11/6	9:28 PM	RTP3	4364-2	30220	MX2	D2
11/6	9:28 PM	RTP3	4364-3	30220	MX3	D2
11/6	10:38 PM	RTP3	4365-1	30220	MX1	D2
11/6	10:38 PM	RTP3	4365-2	30220	MX2	D2
11/6	10:38 PM	RTP3	4365-3	30220	MX3	D2
11/7	5:01 PM	MB10	4368-1	26996	MX1	D2S15
11/7	6:14 PM	MB10	4369-1	26996	MX1	D2S15
11/7	6:14 PM	MB10	4369-2	26996	MX2	D2S15
11/7	6:14 PM	MB10	4369-3	26996	MX3	D2S15
11/7	7:25 PM	MB10	4370-1	26996	ETC	D2S15
11/7	8:15 PM	MB10	4371-1	26996	MX1	D2S15
11/7	8:15 PM	MB10	4371-2	26996	MX2	D2S15
11/7	8:15 PM	MB10	4371-3	26996	MX3	D2S15
11/7	9:25 PM	MB10	4372-1	26996	ETC	D2S15
11/8	11:51 AM	MB10	4375-1	26996	MX1	D2S50
11/8	12:28 PM	MB10	4376-1	26996	MX1	D2S50
11/8	12:28 PM	MB10	4376-2	26996	MX2	D2S50
11/8	12:28 PM	MB10	4376-3	26996	MX3	D2S50

Fecha	Hora	Vehículo	ID de Prueba	Peso (lb)	Ciclo	Combust.
11/8	1:38 PM	MB10	4377-1	26995.5	MX1	D2S50
11/8	1:38 PM	MB10	4377-2	26995.5	MX2	D2S50
11/8	1:38 PM	MB10	4377-3	26995.5	MX3	D2S50
11/8	2:48 PM	MB10	4378-1	26995.5	MX1	D2
11/8	2:48 PM	MB10	4378-2	26995.5	MX2	D2
11/8	2:48 PM	MB10	4378-3	26995.5	MX3	D2
11/8	3:58 PM	MB10	4379-1	26995.5	MX1	D2
11/8	3:58 PM	MB10	4379-2	26995.5	MX2	D2
11/8	3:58 PM	MB10	4379-3	26995.5	MX3	D2
11/9	12:14 PM	BUSSCAR	4382-1	33025	MX1	CNG
11/9	12:50 PM	BUSSCAR	4383-1	33025	MX1	CNG
11/9	12:50 PM	BUSSCAR	4383-2	33025	MX2	CNG
11/9	12:50 PM	BUSSCAR	4383-3	33025	MX3	CNG
11/9	4:00 PM	BUSSCAR	4385-1	33025	MX1	CNG
11/9	4:37 PM	BUSSCAR	4386-1	33025	ETC	CNG
11/9	5:27 PM	BUSSCAR	4387-1	33025	MX1	CNG
11/9	5:27 PM	BUSSCAR	4387-2	33025	MX2	CNG
11/9	5:27 PM	BUSSCAR	4387-3	33025	MX3	CNG
11/9	6:38 PM	BUSSCAR	4388-1	33025	ETC	CNG
11/10	3:18 PM	FAW	4391-1	48025	MX1	CNG
11/10	4:45 PM	FAW	4393-1	48025	MX1	CNG
11/10	4:45 PM	FAW	4393-2	48025	MX2	CNG
11/10	4:45 PM	FAW	4393-3	48025	MX3	CNG
11/10	5:55 PM	FAW	4394-1	48025	MX1	CNG
11/10	5:55 PM	FAW	4394-2	48025	MX2	CNG
11/10	5:55 PM	FAW	4394-3	48025	MX3	CNG
11/11	5:18 PM	ALLISON	4398-1	35000	MX1	D2S15
11/11	6:03 PM	ALLISON	4399-1	35000	ETC	D2S15
11/11	6:53 PM	ALLISON	4400-1	35000	MX1	D2S15
11/11	6:53 PM	ALLISON	4400-2	35000	MX2	D2S15
11/11	6:53 PM	ALLISON	4400-3	35000	MX3	D2S15
11/11	8:03 PM	ALLISON	4401-1	35000	ETC	D2S15
11/11	8:54 PM	ALLISON	4402-1	35000	MX1	D2S15
11/11	8:54 PM	ALLISON	4402-2	35000	MX2	D2S15
11/11	8:54 PM	ALLISON	4402-3	35000	MX3	D2S15
11/12	3:24 PM	RTP1	4405-1	30070	MX1	D2S15
11/12	4:14 PM	RTP1	4406-1	30070	ETC	D2S15

Fecha	Hora	Vehículo	ID de Prueba	Peso (lb)	Ciclo	Combust.
11/12	6:18 PM	RTP1	4407-1	30070	MX1	D2S15
11/12	6:55 PM	RTP1	4408-1	30070	MX1	D2S15
11/12	6:55 PM	RTP1	4408-2	30070	MX2	D2S15
11/12	6:55 PM	RTP1	4408-3	30070	MX3	D2S15
11/12	8:05 PM	RTP1	4409-1	30070	ETC	D2S15
11/12	8:55 PM	RTP1	4410-1	30070	MX1	D2S50
11/12	8:55 PM	RTP1	4410-2	30070	MX2	D2S50
11/12	8:55 PM	RTP1	4410-3	30070	MX3	D2S50
11/12	10:05 PM	RTP1	4411-1	30070	MX1	D2S50
11/12	10:05 PM	RTP1	4411-2	30070	MX2	D2S50
11/12	10:05 PM	RTP1	4411-3	30070	MX3	D2S50
11/12	11:18 PM	RTP1	4412-1	30070	CBD	D2S50
11/13	12:39 PM	SCANIA18	4415-1	57025	MX1	D2S15
11/13	3:17 PM	SCANIA18	4416-1	57025	MX2	D2S15
11/13	3:53 PM	SCANIA18	4417-1	57025	ETC	D2S15
11/13	4:47 PM	SCANIA18	4418-1	57025	MX1	D2S15
11/13	4:47 PM	SCANIA18	4418-2	57025	MX2	D2S15
11/13	4:47 PM	SCANIA18	4418-3	57025	MX3	D2S15
11/13	5:57 PM	SCANIA18	4419-1	57025	MX1	D2S15
11/13	5:57 PM	SCANIA18	4419-2	57025	MX2	D2S15
11/13	5:57 PM	SCANIA18	4419-3	57025	MX3	D2S15
11/13	7:32 PM	SCANIA18	4420-1	57025	MX1	D2S50
11/13	8:09 PM	SCANIA18	4421-1	57025	MX1	D2S50
11/13	8:09 PM	SCANIA18	4421-2	57025	MX2	D2S50
11/13	8:09 PM	SCANIA18	4421-3	57025	MX3	D2S50
11/13	9:19 PM	SCANIA18	4422-1	57025	MX1	D2S50
11/13	9:19 PM	SCANIA18	4422-2	57025	MX2	D2S50
11/13	9:19 PM	SCANIA18	4422-3	57025	MX3	D2S50

Economía de combustible

La economía de combustible se determinó por medio del examen de la cantidad de carbono en los gases de escape. Durante la combustión, la mayoría del carbono del combustible se convierte en monóxido y dióxido de carbono. La masa total del combustible utilizado durante las pruebas se calcula mediante la siguiente fórmula

$$M_{fuel} = \frac{\left[\frac{12.011}{12.011 + \alpha(1.008)} \right] HC_{mass} + 0.429CO_{mass} + 0.273CO_{2, mass}}{\frac{12.011}{12.011 + \alpha(1.008)}}$$

Ecuación 4: Cálculo del consumo de combustible.

donde α es la proporción atómica de hidrógeno a carbono como se determina mediante el análisis de combustible. En el caso de los vehículos a gas natural, el equivalente a un "galón" de combustible diesel se determina comparando el valor de la capacidad calorífica del gas natural (1037.7 BTU/scf), que es menor al del diesel de 50 ppm (18576 BTU/scf). Basado en estas propiedades, 124.0 scf de GNC contiene la misma energía que un galón de combustible diesel 50ppm.

La economía de combustible, calculada mediante el balance de carbono anteriormente descrito, se indica para todos los autobuses medidos con la combinación MSC Figura 15. La economía de combustible para los autobuses a gas natural se reporta en base al equivalente en energía de diesel para permitir la comparación con los autobuses a diesel. Cuando se repitieron varias de las pruebas, las barras de la Figura 15 representan el resultado promedio y las barras de error representan los máximos y los mínimos de los resultados de las pruebas individuales. Considerando los autobuses diesel convencionales probados en el MCS, el autobús MB10 alcanzó la mayor economía de combustible, seguido por el RPT1 y RPT3, el VOLVO12 y finalmente el SCANIA15. El diesel-híbrido ALLISON demostró una economía de combustible comparable a los RPT1 y RPT3. El autobús BUSSCAR a GNC fue comparable a los autobuses SCANIA y el autobús FAW a GNC obtuvieron la economía de combustible más baja en unidades de millas por galón equivalente a diesel. Las Figuras 16 y 17 presentan la economía de combustible en el MCS como una función del peso de prueba del vehículo y la proporción de la potencia vehicular al peso de prueba. Sólo se muestran los resultados del diesel con 15ppm de azufre. Existe una gran relación entre el peso de prueba y la economía de combustible, tal y como se esperaba. También hay una relación obvia entre la proporción potencia-peso y la economía de combustible, aunque se esperaba que el autobús VOLVO12 que tenía la proporción potencia-peso más alta, obtuviera la mayor economía de combustible.

La economía de combustible medida a durante el ETC se muestran en la Figura 18. La economía de combustible del equivalente a diesel se presenta para el autobús BUSSCAR a GNC. El autobús FAW no se puso a prueba en el ETC ya que no podía alcanzar la alta velocidad de operación requerida para dicho ciclo de pruebas. El ETC presenta un caso diferente para la economía de combustible. Tal y como se esperaba, la economía era bastante más alta para el ETC que para cualquier modo de los MCS o los MCS combinados (Figura 15) debido a la naturaleza más transitoria del ETC comparado con los MCS. Durante el ETC, el autobús RTP1 tuvo la mayor economía de combustible, seguido del VOLVO12 y el híbrido ALLISON, los cuales tuvieron una economía de combustible similar. Les siguieron el MB10 y el RTP3. Todos estos autobuses tuvieron economías de combustible con valores muy cercanos. En el ETC, el BUSSCAR registro una economía de combustible mayor que cualquiera de los autobuses SCANIA.

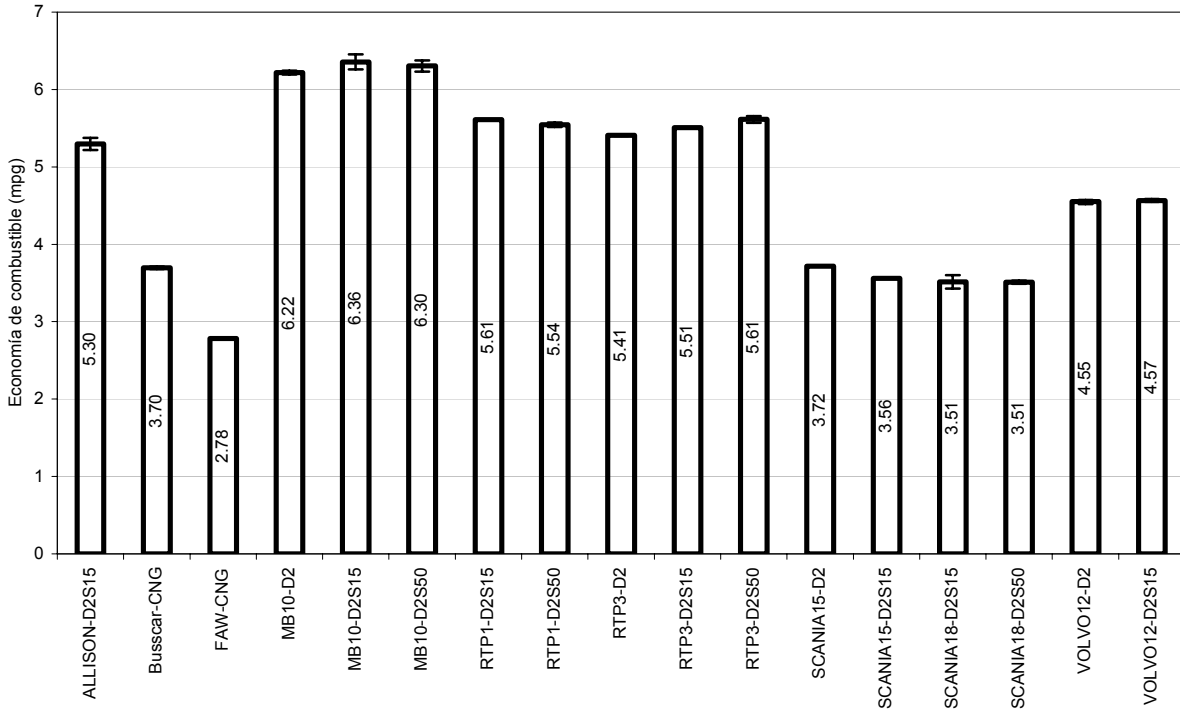


Figura 15: Economía de combustible medida en los modos combinados del MCS

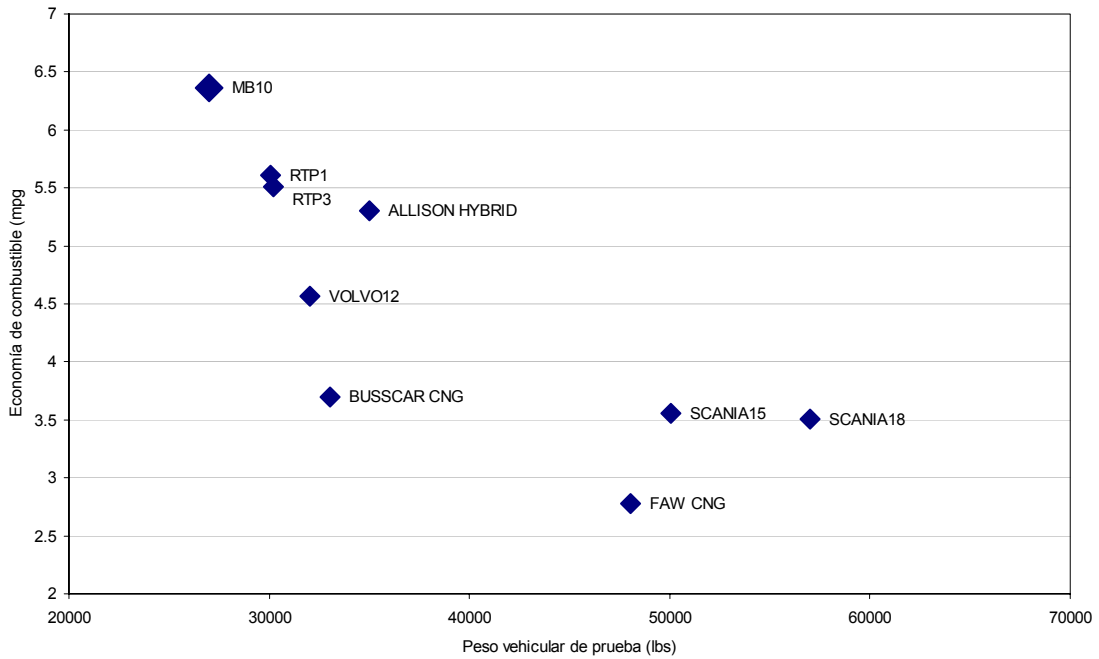


Figura 16: Economía de combustible en el MCS como función del peso de prueba.

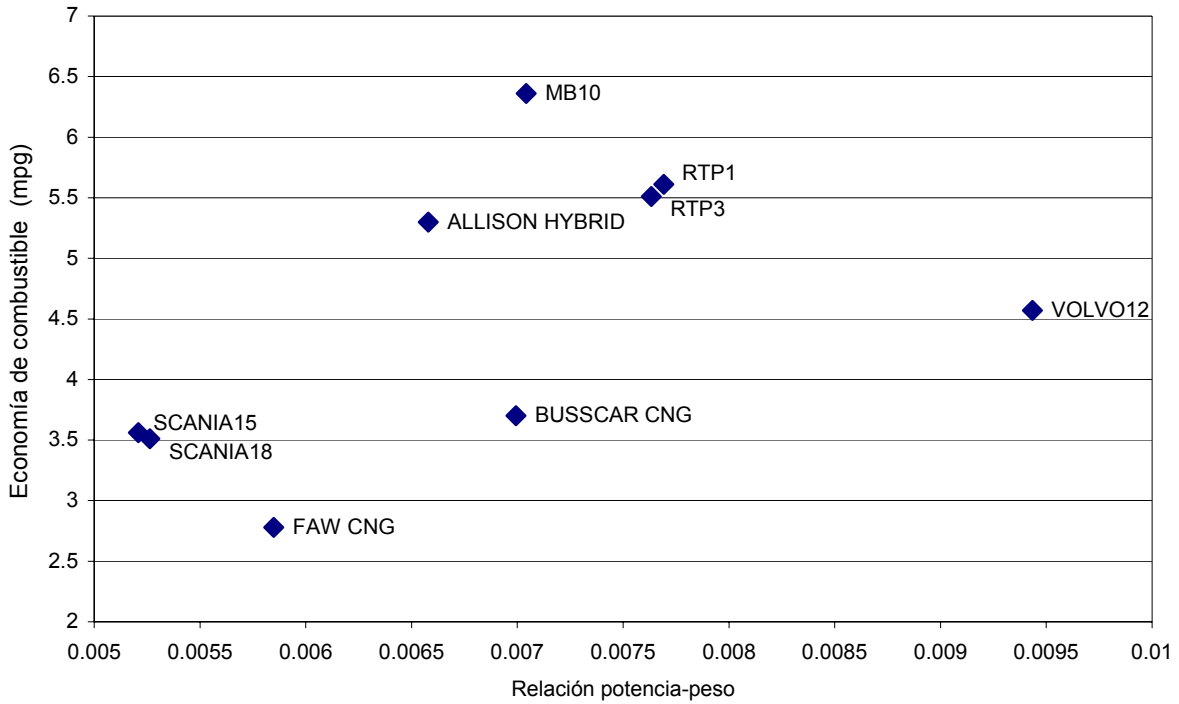


Figura 17: Economía de combustible en el MCS como función de la relación potencia-peso.

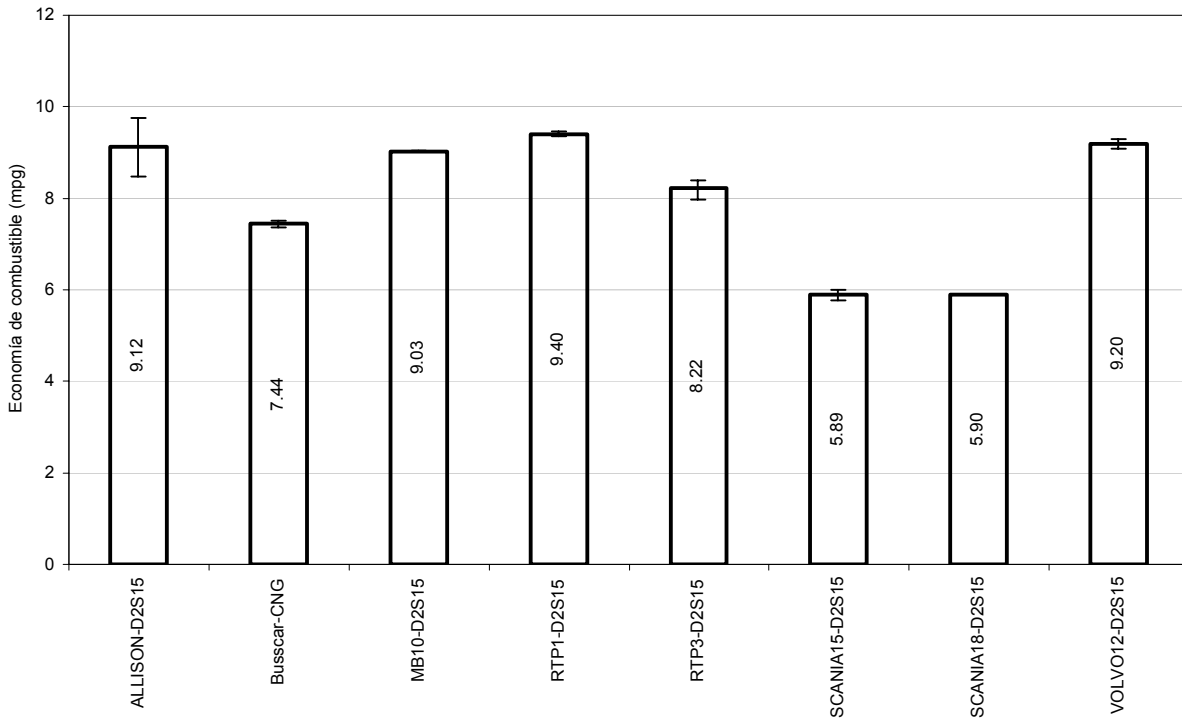


Figura 18: Economía de combustible medida sobre el ETC.

Los autobuses fueron evaluados con pesos diferentes (representativos del uso real) y teniendo varias capacidades de pasajeros asociadas con esos pesos. También es útil considerar la economía de combustible en unidades de pasajero-milla/galón, presentadas en la Figura 19 para el MCS y en Figura 20 para el ETC. En unidades de pasajero-milla por galón el autobús híbrido ALLISON exhibió la economía más alta, seguido del SCANIA. Aunque los autobuses SCANIA exhibieron una economía relativamente inferior a la de otros autobuses, puede que resulten ser más económicos de operar cuando se considera la capacidad de pasajeros. El camión MB10 también exhibió buena economía de combustible en el formato pasajero-milla por galón. Considerando los autobuses a diesel, el VOLVO12 registró la peor economía de combustible al considerar la capacidad de pasajeros y es comparable a los autobuses a CNG. En el ETC, el camión híbrido ALLISON exhibió también la economía de combustible más alta por pasajero, seguido del SCANIA18. Los autobuses MB10, RTP1, RTP3 y VOLVO12 demostraron una economía de combustible media por pasajero en el ETC, y el BUSSCAR a GNC exhibió la economía más baja por pasajero.

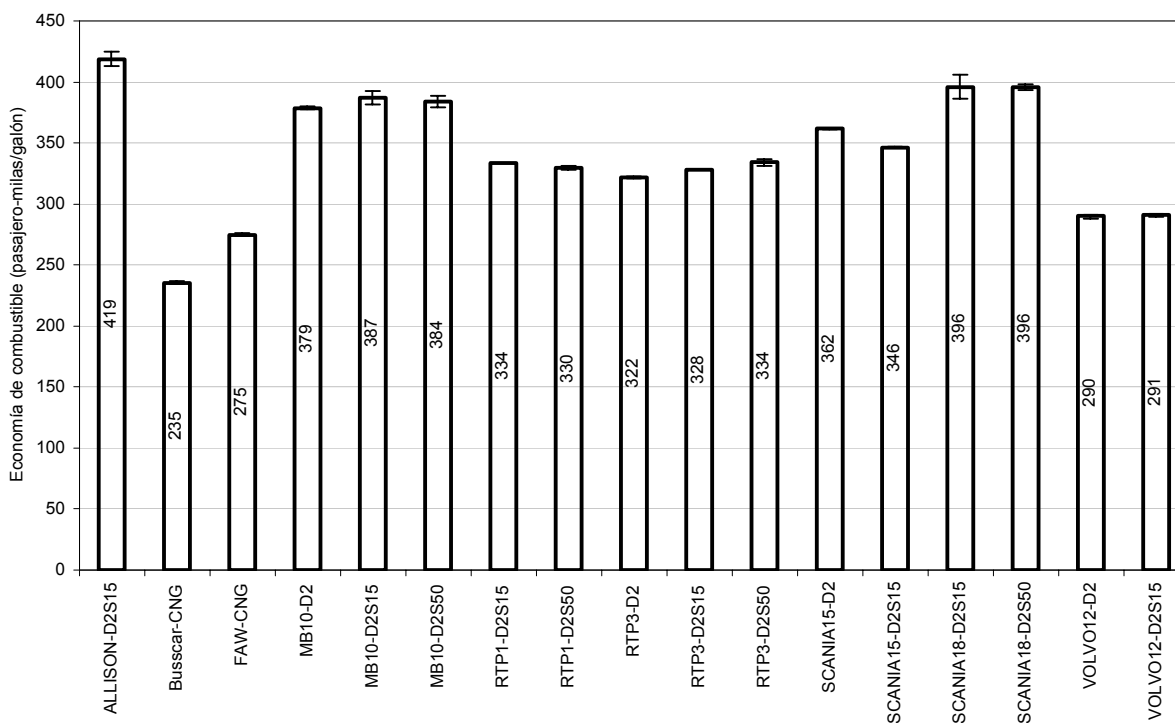


Figura 19: Economía de combustible medida en el MCS en formato pasajero-milla por galón.

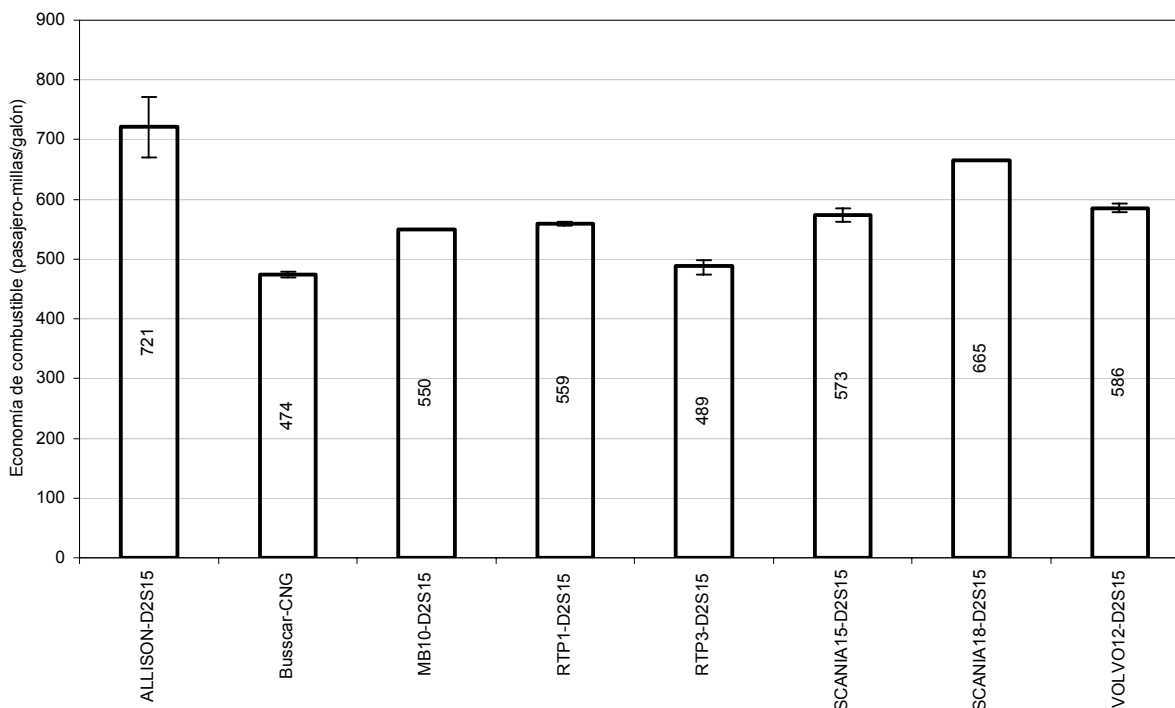


Figura 20: Economía de combustible en el ETC en unidades pasajero-milla por galón.

En el Apéndice B se presentan los resultados de la economía de combustible medidos en las modalidades individuales de MX1, MX2 y MX3. A lo largo del MX1 se observó una baja economía de combustible, en energía equivalente a diesel (en términos de unidades de distancia específica) para los dos autobuses a gas natural. El autobús FAW obtuvo la economía más baja de los dos autobuses a GNC así como de todos los autobuses estudiados. Aunque los niveles de emisiones de CO y HC fueron altos para estos autobuses (tal y como se presenta en la sección de emisiones), no fueron lo suficientemente altos como para explicar la baja economía de combustible. El autobús MB10 obtuvo la economía de combustible más alta, y había muy poca diferencia en la economía entre el combustible de 15ppm (nivel de azufre), el del 150ppm y el D2. El autobús híbrido ALLISON dio la mejor economía, después del MB10. Los autobuses RTP1 y RTP3 dieron una economía algo más baja con D2 que con los dos combustibles de bajo azufre. El VOLVO12 mostró poca influencia del tipo de combustible en la economía. Los autobuses SCANIA15 y SCANIA18 demostraron una economía comparable. La economía era la más baja de todos los autobuses diesel y era similar (en el formato de equivalencia de energía) a la economía del BUSSCAR a GNC. No obstante, los dos SCANIA eran autobuses pesados, de longitud extendida.

Los resultados de la economía de MX2 eran similares a los de MX1, salvo que el autobús ALLISON ahora obtuvo peor economía que los autobuses RTP1 y RTP3. La economía era mejor en la modalidad MX2 que en la MX1, lo cual sería de esperar en el ciclo de velocidades superiores. El autobús MB10 no mostró ventaja sobre los RTP1 y RTP3, que eran más antiguos en dos años, al comparar su economía en la modalidad MX1.

El MX3 representaba la modalidad de más velocidad en el MCS. El MX3 exhibió una economía inferior a la MX1 y la MX2 debido al carácter transitorio del MX3. Los autobuses MB10 y RTP, este último más antiguo, obtuvieron una economía similar, siendo la más alta

también. Después quedo el híbrido ALLISON, seguido del VOLVO12. Los dos autobuses SCANIA demostraron una economía similar y fue la más baja de los autobuses a diesel. El autobús BUSSCAR a GNC obtuvo una economía similar a la de los SCANIA a diesel, mientras que el FAW a GNC obtuvo la menor de todos. El FAW experimentó problemas durante las pruebas, v.g. el recalentamiento del motor y la incapacidad de seguir la dirección del conductor.

La Figura 21 presenta una imagen diferente de la economía de combustible cuando se utilizan de forma comparada las unidades de toneladas-milla por galón (aquí, una tonelada equivale a 2,000 libras). Sólo se presentan los datos del ETC en esta figura. Se observa la máxima economía en estas unidades en los autobuses SCANIA18 y el híbrido ALLISON. Hay mucha menos diferencia en la economía de combustible entre los autobuses que cuando se utilizan unidades de millas/galón.

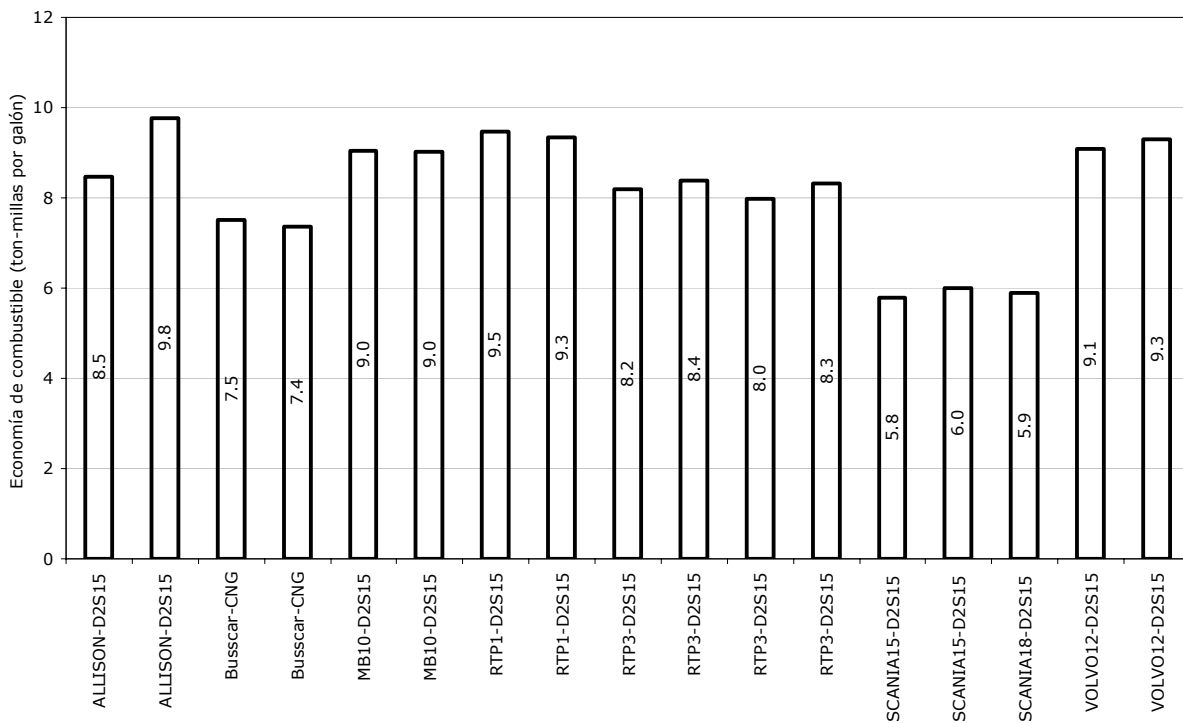


Figura 21: Economía de combustible en el ETC en unidades de toneladas-milla por galón.

Emisiones de NO_x

Las emisiones de NO_x son importantes tanto para los autobuses a gas natural como para los de diesel, puesto que las condiciones generales de mezcla pobre favorecen la formación de NO_x. En por lo menos un recorrido de cada combinación vehículo/combustible, el analizador principal de NO_x funcionaba en la "modalidad NO_x" (en la que se miden NO y NO₂) mientras que el analizador secundario de NO_x funcionaba en "modalidad sólo NO".

Los autobuses a diesel sin filtro de partículas tienden a producir mucho menos NO₂ que NO, del 3% al 15% como NO₂ dependiendo del diseño del motor y las condiciones de operación y típicamente una media del 2% al 5% en el ciclo de pruebas. Esto resulta evidente para la mayoría de los autobuses a diesel, incluido el SCANIA15 equipado con catalizador de oxidación. El autobús más viejo, el RTP-1, y el híbrido ALLISON, equipados los dos con filtros catalíticos de partículas, dieron evidencia de un alto contenido de NO₂. Los filtros pasivos de partículas para diesel recolectan y oxidan el material particulado contenido en los gases de escape. Durante la operación en punto muerto o a baja potencia, las partículas se recolectan en el filtro (wall flow) y se quema (oxida) cuando las temperaturas de los gases de escape son superiores a 250/300°C. Los filtros pasivos de partículas suelen emplear un catalizador de metal precioso antes del filtro o una capa catalizadora en el filtro mismo para reducir la temperatura necesaria para la oxidación de las partículas recolectadas. La capa permite la oxidación de NO en los gases de escape para la producción de NO₂. El NO₂ fomenta la combustión de las partículas recolectadas a una temperatura significativamente más baja (>250°C) que en el aire (>500°C), permitiendo así la regeneración continua del sistema de filtración a temperaturas típicas del escape de los motores a diesel. Las emisiones de NO_x de vehículos equipados con filtros catalíticos de partículas y otros dispositivos de postratamiento pueden contener de un 30% a un 40% de NO₂.

La Figura 22 presenta las emisiones de NO_x en relación a la distancia específica medidas con todas las modalidades del MCS junto con el promedio de emisiones de NO de los recorridos cuando el analizador NO_x funcionaba en modalidad NO. En el Apéndice B se presentan graficas de las emisiones de NO_x medidas en las modalidades individuales de los MX1, MX2 y MX3. El autobús FAW a GNC registró el promedio más alto de emisiones de NO_x, de 30 g/milla, a lo largo del MCS. El autobús MB10 produjo la emisión más baja de NO_x, aproximadamente 11 g/milla, y el promedio del autobús híbrido ALLISON fue sólo un poco más alta. En la Figura 23 se presentan las emisiones de NO_x medidas a lo largo del ETC. Los autobuses SCANIA produjeron las emisiones de NO_x más altas, mientras que los autobuses ALLISON y MB10 produjeron las más bajas. Los autobuses ALLISON y RTP1 emitieron más de un 50% de NO_x en forma de NO₂ debido a la presencia de filtros catalíticos de partículas. El autobús a gas natural BUSSCAR emitió más o menos una cuarta parte de las emisiones de NO_x en forma de NO₂, y los niveles de NO₂ representaban una pequeña fracción del total de NO_x para los demás autobuses. El autobús FAW no pudo completar la prueba de emisiones en el ETC.

En el Apéndice B se presentan graficas para las emisiones de NO_x medidas en las modalidades individuales de los MX1, MX2 y MX3. El autobús FAW a GNC exhibió las mayores emisiones de NO_x sobre una distancia específica en la modalidad MX1, con más de 35 g/milla. Los autobuses SCANIA y VOLVO entre 20 y 30 g/milla. El BUSSCAR produjo un poco menos de 20 g/milla y el ALLISON y el MB10 produjeron las emisiones de NO_x más bajas, con aproximadamente 10 g/milla. A lo largo del MX2, el autobús FAW GNC produjo las emisiones más altas sobre una distancia específica.

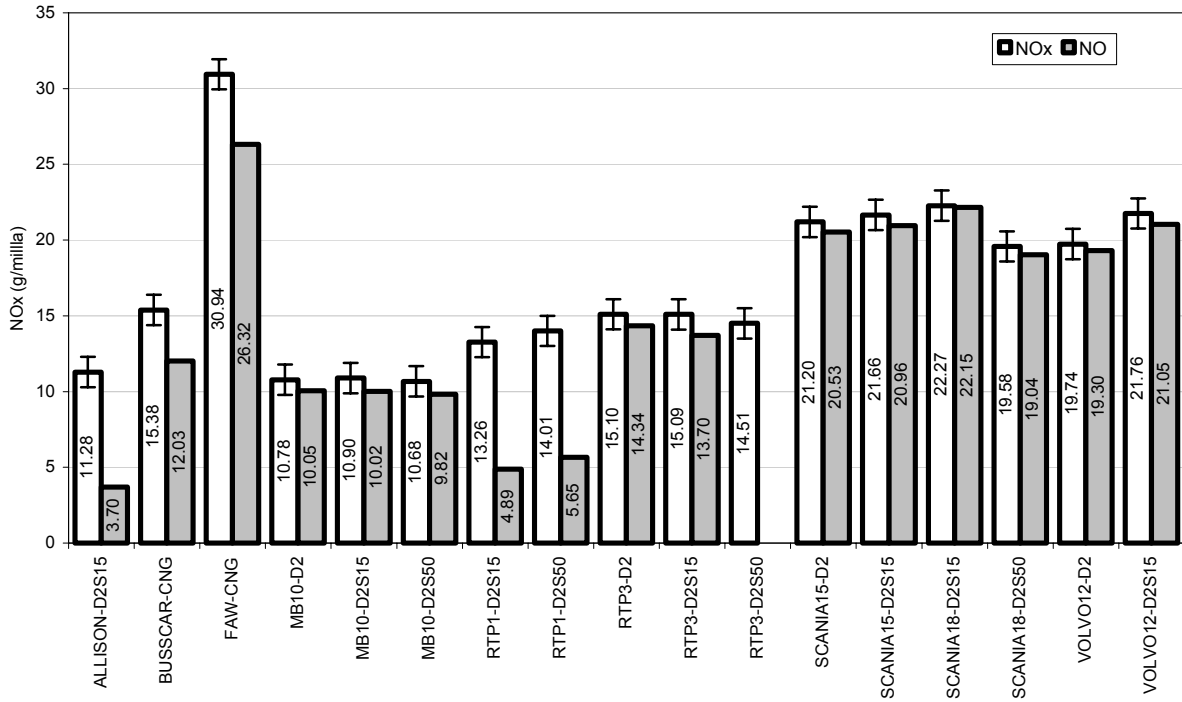


Figura 22: Emisiones de NO_x sobre distancia específica para las modalidades combinadas del MCS.

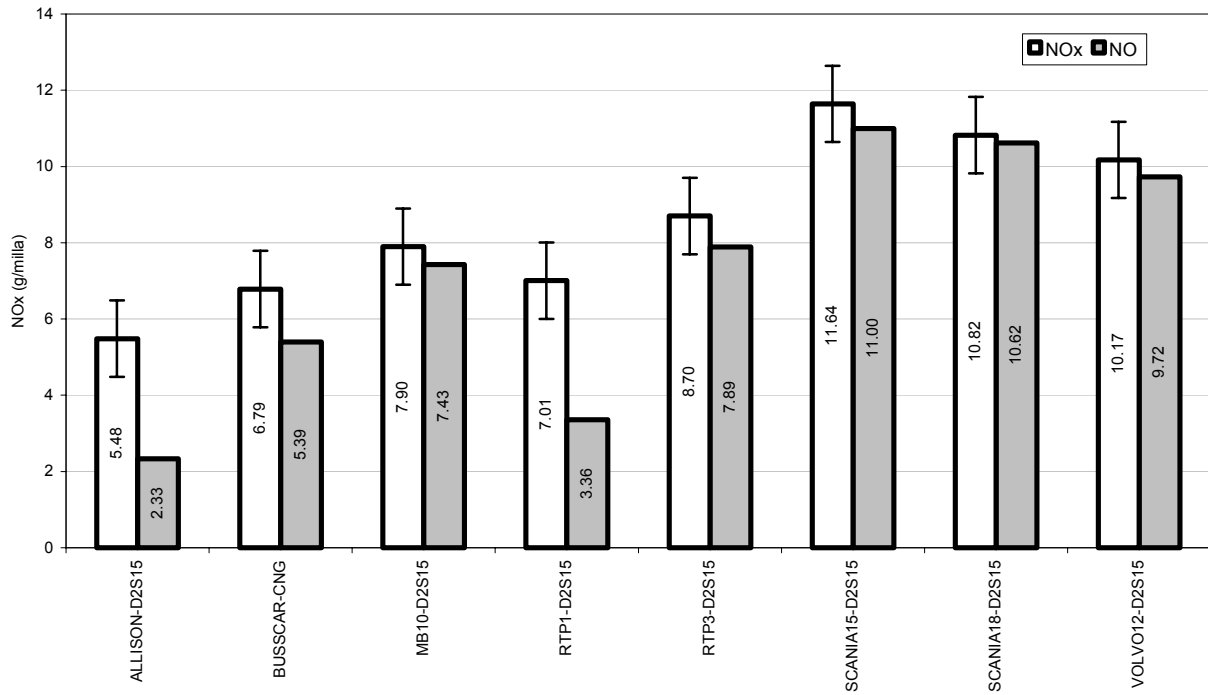


Figura 23: Emisiones de NO_x sobre distancia específica para el ETC.

Las Figuras 24 y 25 presentan las emisiones de NO_x en unidades de g/pasajero-milla para el MCS y el ETC, respectivamente. A lo largo del MCS los autobuses ALLISON, MB10 y SCANIA18 tuvieron las emisiones de NO_x más bajas. El autobús a diesel VOLVO12 y el FAW a GNC tuvieron las emisiones de NO_x más altas. Las emisiones de NO_x para los autobuses RTP1, RTP3, SCANIA15 y el BUSSCAR a GNC fueron similares entre sí y corresponden al promedio de emisiones del grupo. A lo largo del ETC, los autobuses ALLISON y SCANIA18 obtuvieron bajas emisiones de NO_x, mientras que el VOLVO12 volvió a tener las más altas. El autobús FAW no fue sometido a prueba en el ETC.

Las Figuras 26 y 27 presentan los datos de NO_x expresados en unidades alternadas de gramos/tonelada-milla sobre el MCS y el ETC. Las unidades de distancia específica favorecen a los autobuses ligeros, y los datos de peso específico favorecen a los autobuses pesados. Esto se debe a que un aumento porcentual en el peso del autobús normalmente no produce el mismo aumento porcentual en NO_x, sino al contrario un aumento porcentual más bajo. Los autobuses SCANIA grandes producen emisiones de peso específico más bajas, aunque las emisiones de distancia específica más bajas fueron producidas por el autobús ALLISON. Los autobuses MB10, VOLVO y RTP3 produjeron emisiones de NO_x similares en unidades de g/tonelada-milla.

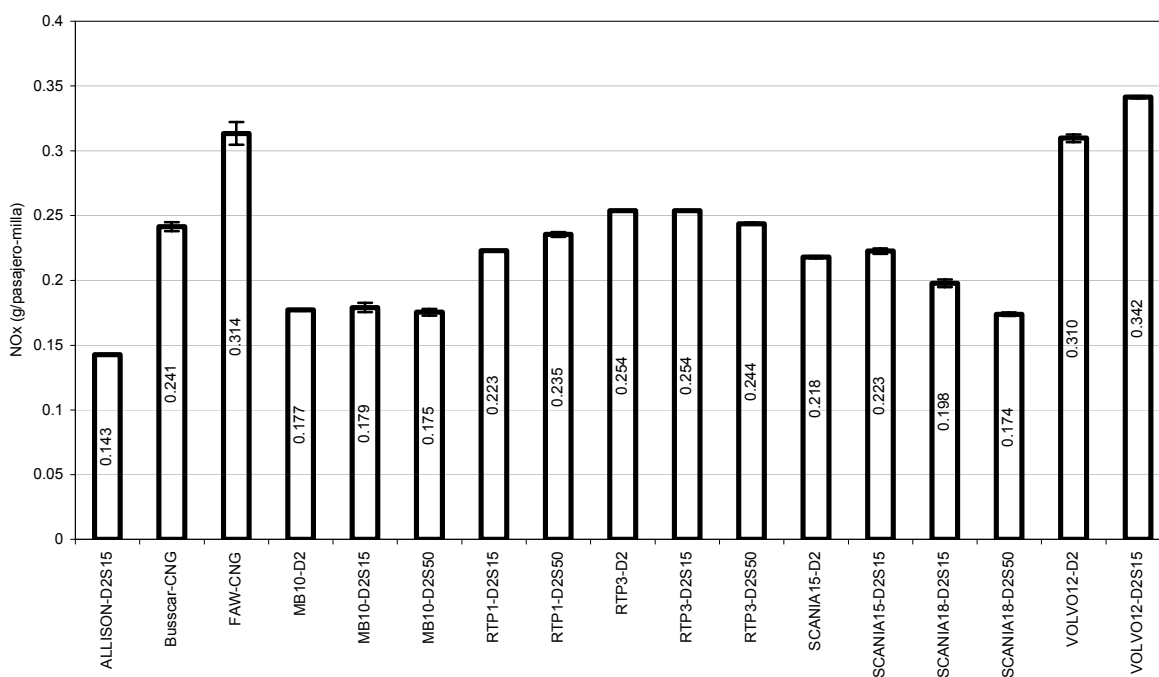


Figura 24: Emisiones de NO_x en el MCS en unidades de gramos por pasajero-milla.

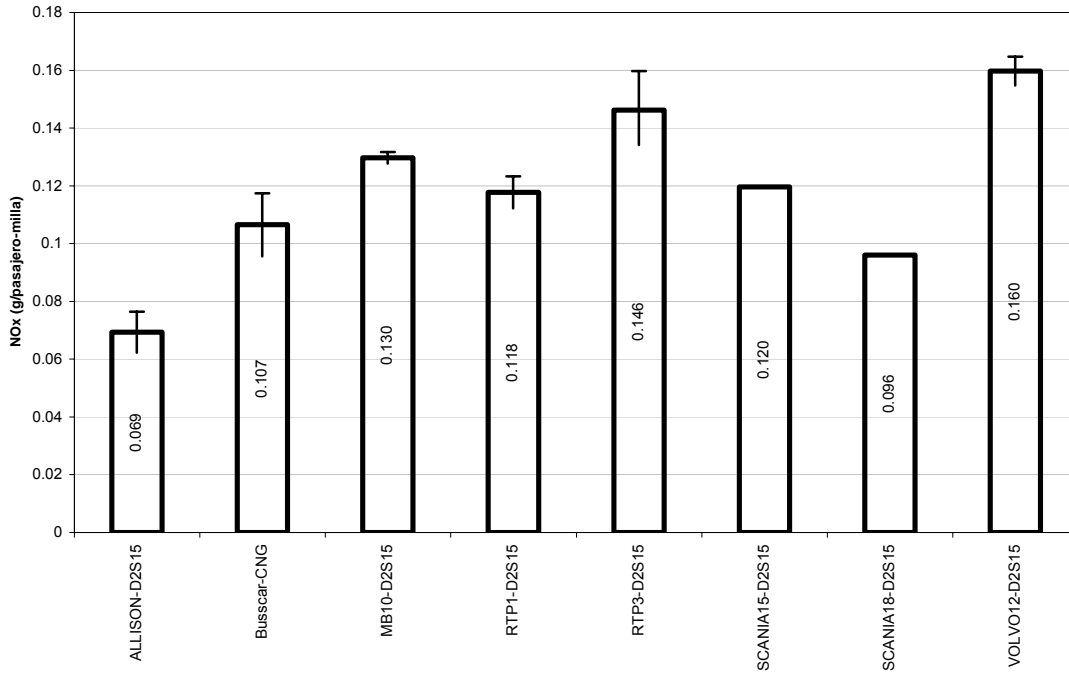


Figura 25: Emisiones de NO_x en el ETC en unidades de gramos por pasajero-milla.

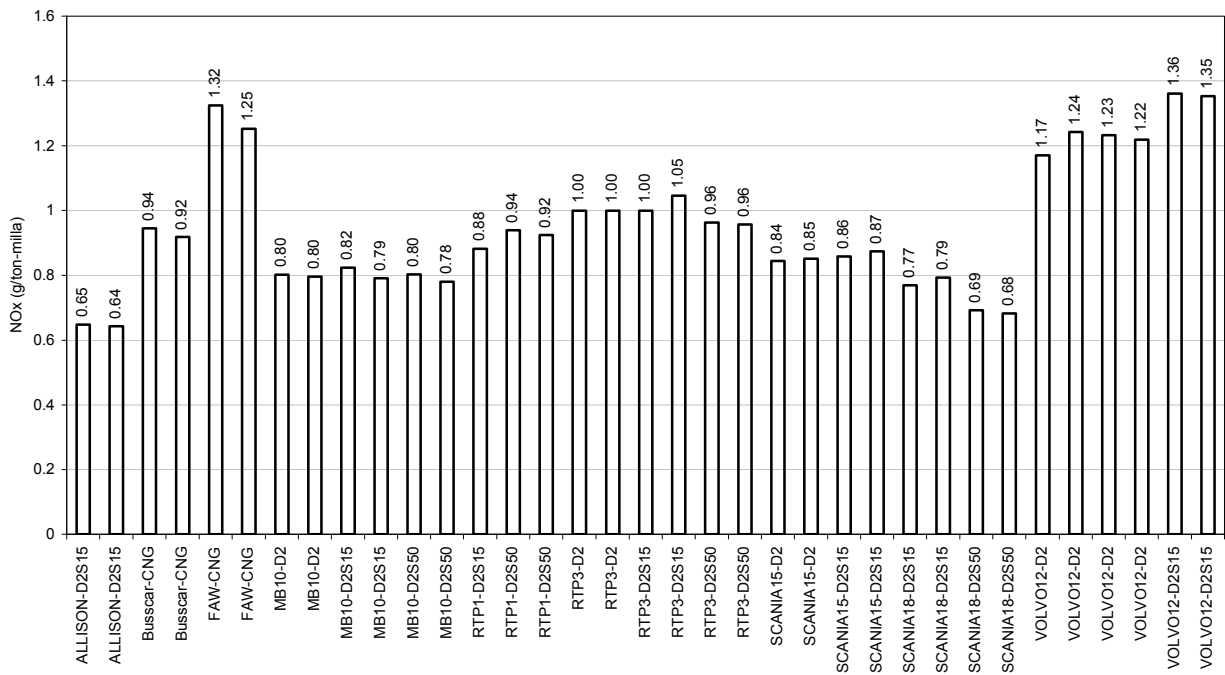


Figura 26: Emisiones de NO_x en el MCS en gramos por tonelada-milla.

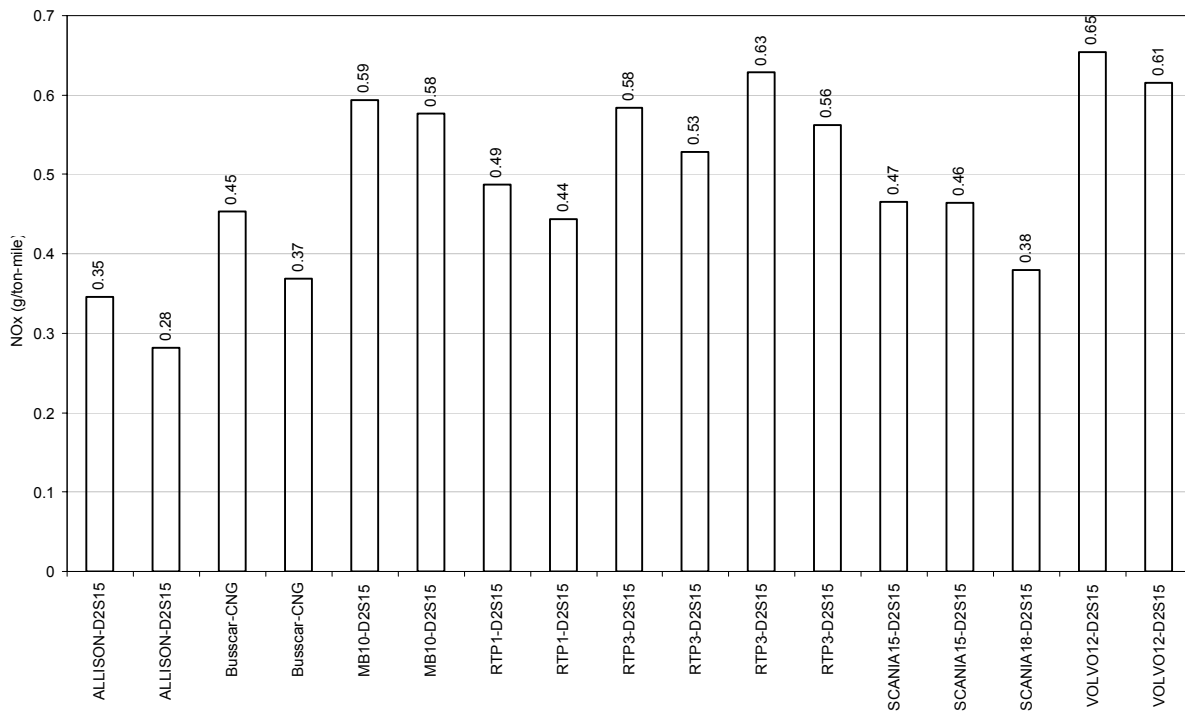


Figura 27: Emisiones de NO_x en el ETC en gramos por tonelada-milla.

Emisión de Partículas

La emisión de partículas es una gran preocupación, sobre todo en algunas regiones geográficas. La variabilidad en la medición de PM es superior a la de NO_x debido a que es difícil de determinar el peso de los filtros si la masa de las PM en el filtro es baja y si los niveles de fondo de PM varían. Además, para los vehículos a diesel, la emisión de partículas es altamente sensible a la forma de manejo, la cual puede variar ligeramente de viaje a viaje.

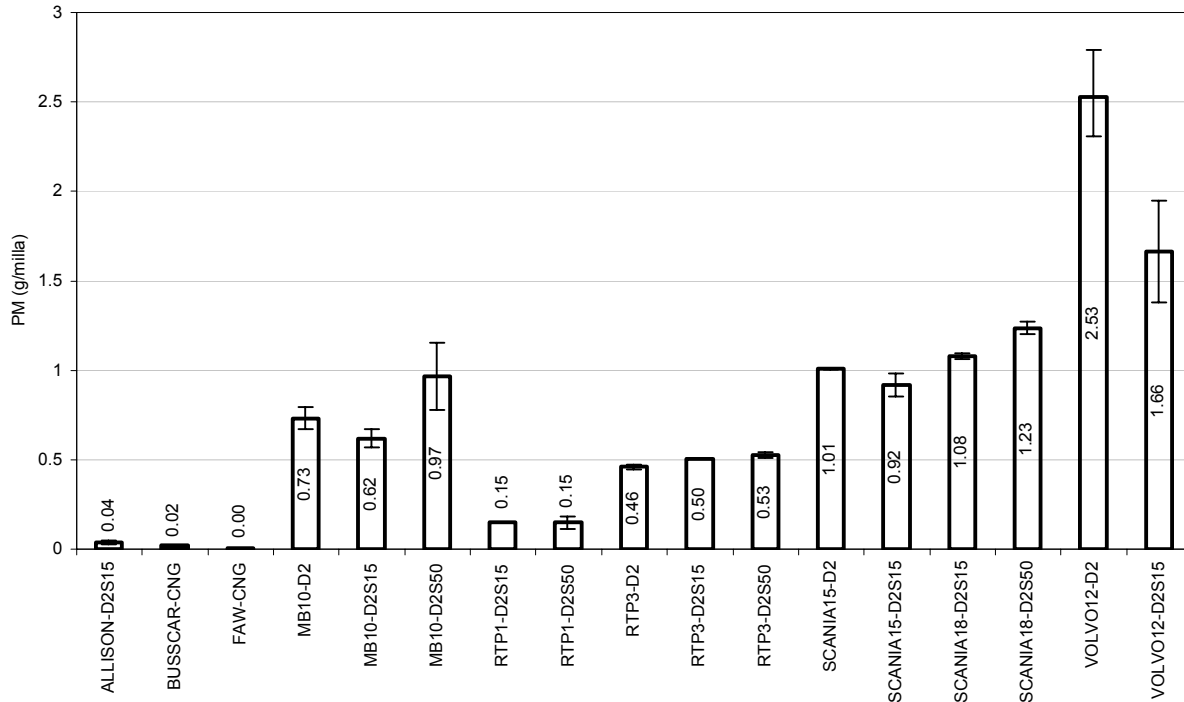


Figura 28: Emisión de Partículas medidas en el modo combinado de MCS.

En la Figura 28 se presentan las emisiones de PM promedio en el MCS en un formato de distancia específica. Como era de esperar, los autobuses a GNC tuvieron las emisiones de PM más bajas, ambos inferiores a 0.03 g/milla. El híbrido ALLISON tuvo el siguiente nivel más bajo en emisiones de PM, mientras que los RTP1 y RTP3 obtuvieron los niveles más bajos para los vehículos a diesel. Debe tenerse en cuenta que el autobús híbrido ALLISON y el RTP1 estaban equipados con filtros catalíticos de partículas. Ninguno de los otros vehículos diesel estaban equipados con estos dispositivos.

La Figura 29 presenta las emisiones promedio de PM en el ETC en un formato de distancia específica. Al igual que en el MCS, los autobuses GNC y el híbrido ALLISON obtuvieron mejores resultados en esta categoría. El autobús MB10 tuvo el mejor rendimiento en emisiones de PM de los autobuses diesel, similares a los de MCS, el autobús VOLVO tuvo el peor rendimiento. El autobús MB10 obtuvo el mejor desempeño en rendimiento durante el ETC al compararse con el MCS, las emisiones de PM disminuyeron alrededor de un 80% mientras que las emisiones de partículas en el SCANIA18 fueron un 75% más bajas.

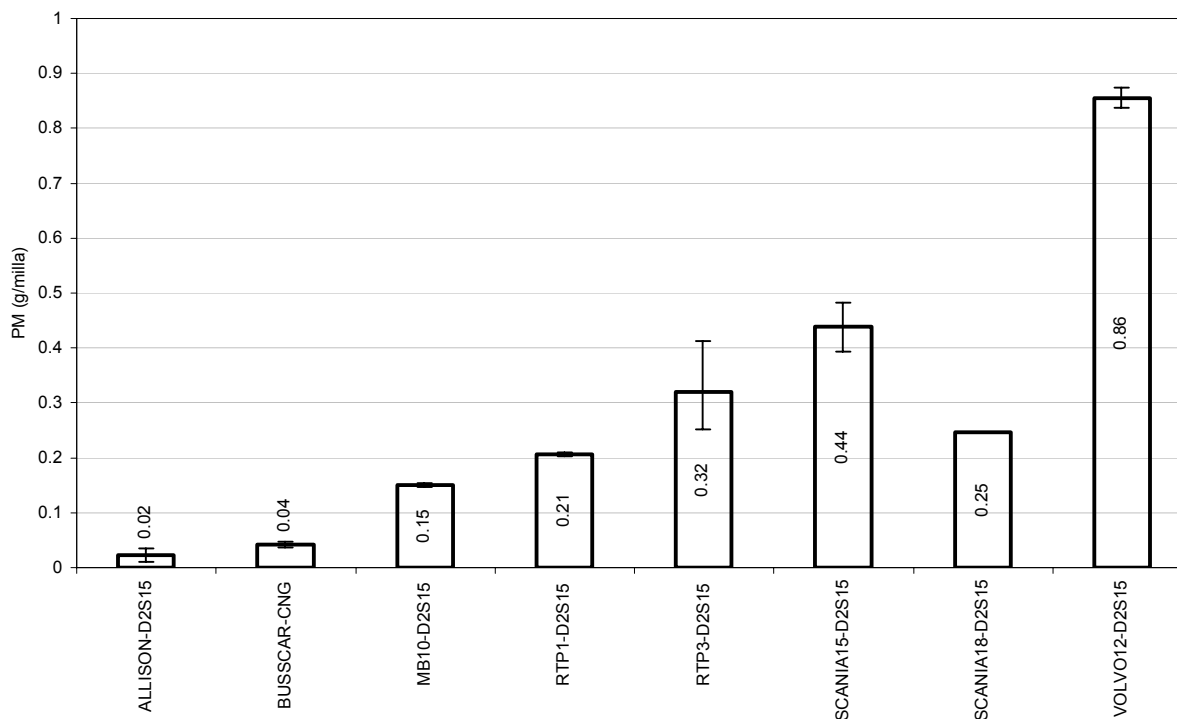


Figura 29: Emisiones de Partículas medidas en el ETC.

En la Figura 28 no se observa una tendencia clara en el efecto del combustible de bajo azufre sobre las emisiones de PM. Esta conclusión es consistente con el hecho de que sólo un pequeño porcentaje de azufre en el combustible se convierte en sulfato (que se considera masa de PM). La contribución de sulfato puede ser importante para los combustibles con un alto contenido de azufre, pero los niveles de azufre para los tres combustibles utilizados en este estudio fueron bajos en relación a los estándares históricos. El combustible diesel con bajo contenido de azufre no reduce las emisiones de PM sustancialmente. La baja concentración de azufre reduce el ácido sulfúrico (masa de sulfato en las PM), pero corresponde a una pequeña fracción de la masa de PM total. Su beneficio es permitir el uso de los filtros catalíticos de PM en los gases de escape. Esto es importante, porque estos filtros catalíticos generalmente no funcionan bien sin el diesel de bajo azufre.

Los resultados de partículas se grafican para los MX1, MX2 y MX3 del MCS en el Apéndice B. Las conclusiones en la generación de PM son sustancialmente similares para los modos MX2 y MX3. Notoriamente, el autobús RPT1 produjo emisiones de PM a distancia específica significativamente más altas en la modalidad MX3 que en la MX1 y la MX2, aunque estas emisiones estaban todavía por debajo del nivel de todos los autobuses excepto el híbrido ALLISON y los autobuses a gas natural. Curiosamente, el autobús RPT1 produjo emisiones de PM sustancialmente más altas en el modo MX3 que en los modos MX1 y MX2 (el autobús RTP1 con CRT presentó cambios en la emisión de aproximadamente el 90% del RTP3 sin CRT para los ciclos MX1 y MX2 estos cambios disminuyen aproximadamente $\frac{1}{2}$ para los ciclos MX3 y ECT.

Las Figuras 30 y 31 presentan las emisiones de PM en unidades de pasajero por milla. Tal y como se presenta en unidades de distancia específica, los autobuses a GNC y el híbrido

ALLISON obtuvieron el mejor rendimiento, mientras que el VOLVO nuevamente obtuvo el peor rendimiento. Cuando se evaluó el SCANIA, en unidades de pasajero por milla, se compara mejor con el resto de los autobuses diesel que en las emisiones de distancia específica debido a su gran capacidad de pasajeros.

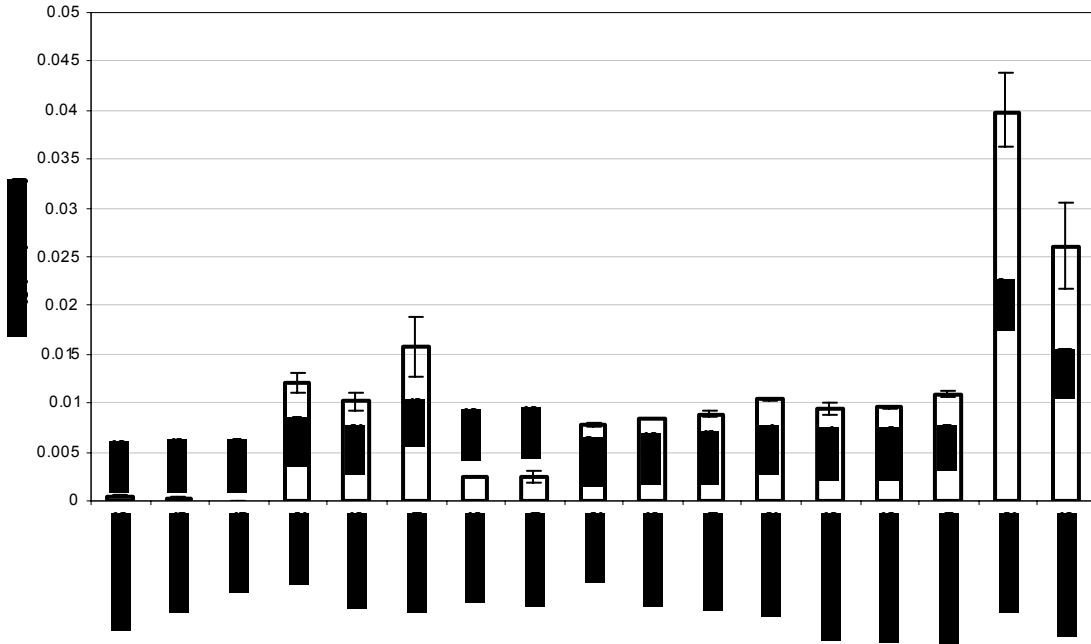


Figure 30: Emisiones de PM en el MCS en unidades de gramos por pasajero-milla.

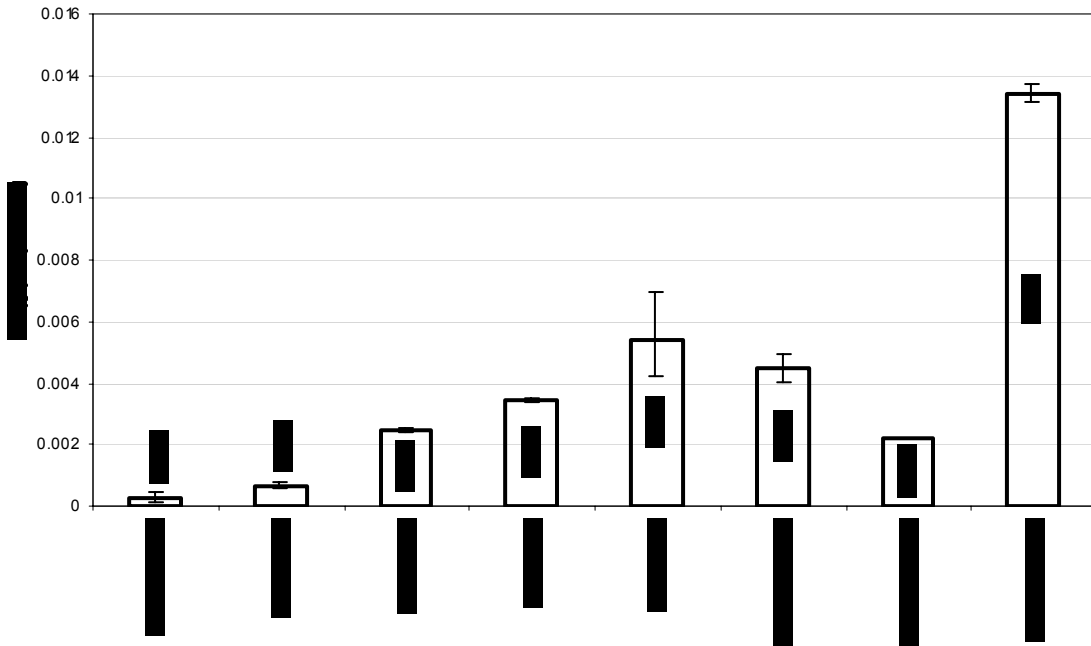


Figura 31: Emisiones de PM en el ETC en unidades de gramos por pasajero-milla.

Otro método comparativo consiste en examinar las emisiones de PM por tonelada-milla (Figuras 32 y 33). La comparación de las emisiones en este formato favorece a los autobuses más pesados (SCANIA18, SCANIA15 y FAW) puesto que éstos fueron examinados a un peso significativamente superior (~50%) al del resto de los autobuses.

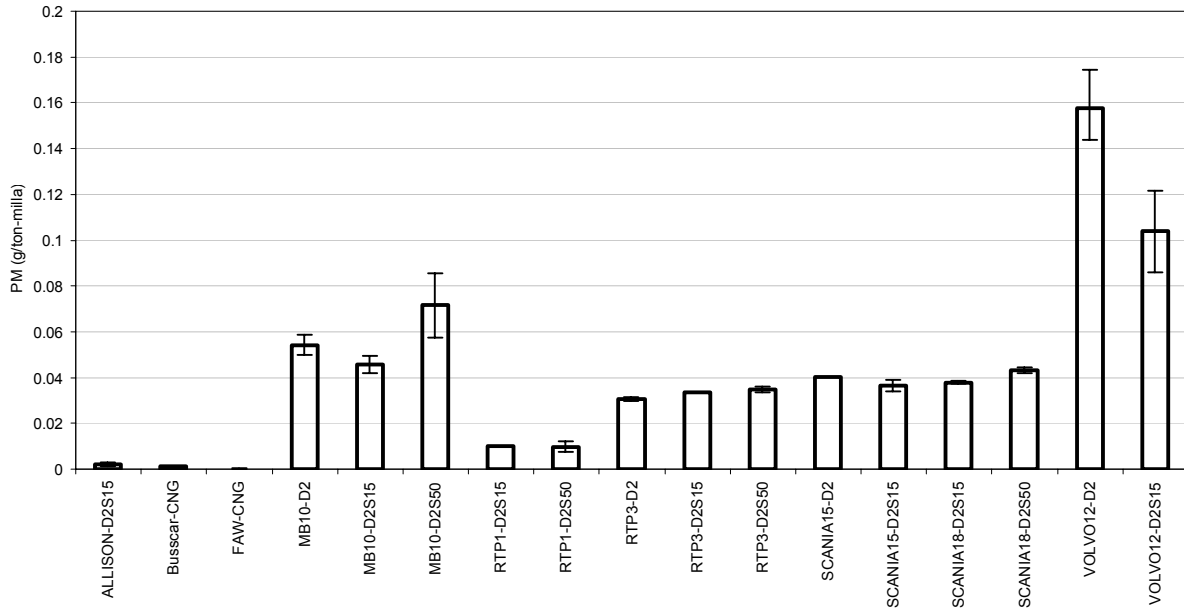


Figura 32: Emisiones de PM en el MCS en gramos por tonelada-milla.

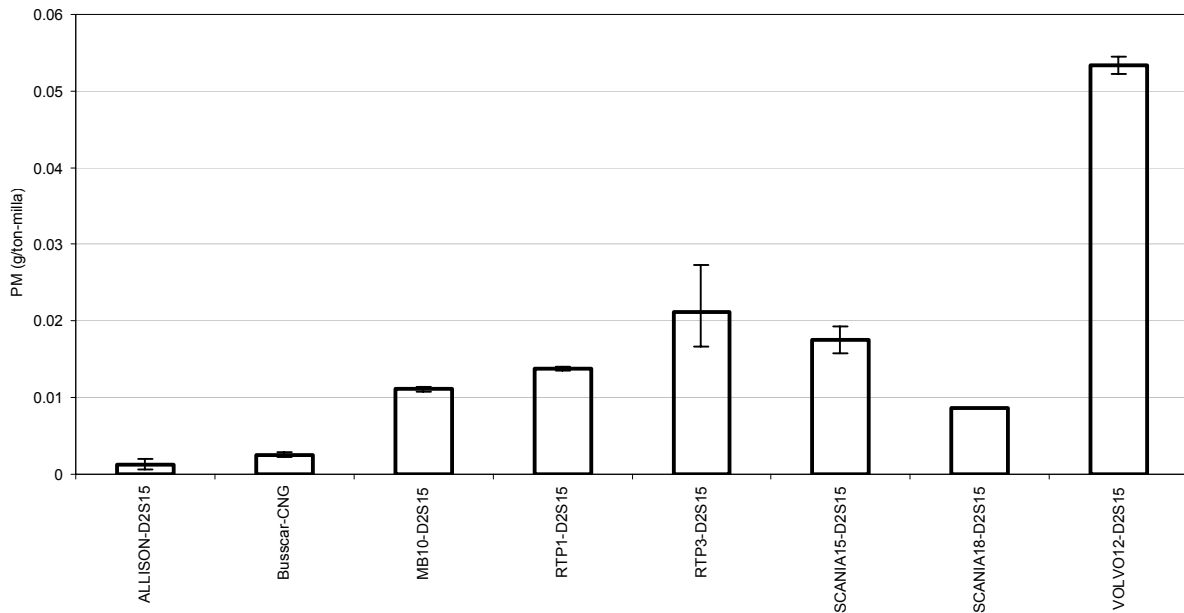


Figura 33: Emisiones de PM en el ETC en gramos por tonelada-milla.

Emisiones de Monóxido de Carbono

Las emisiones de CO de los autobuses diesel son generalmente bajas. La Figura 34 presenta las emisiones de CO de los autobuses examinados en el presente programa en el ciclo MCS mientras que la Figura 35 presenta las emisiones de CO en el ETC. Los datos indican claramente los beneficios del postratamiento de las PM en la reducción del CO para los autobuses ALLISON y RTP1 donde fue evidente la oxidación del CO. De todos los autobuses en el MCS y el ETC, el VOLVO produjo las emisiones de CO más altas.

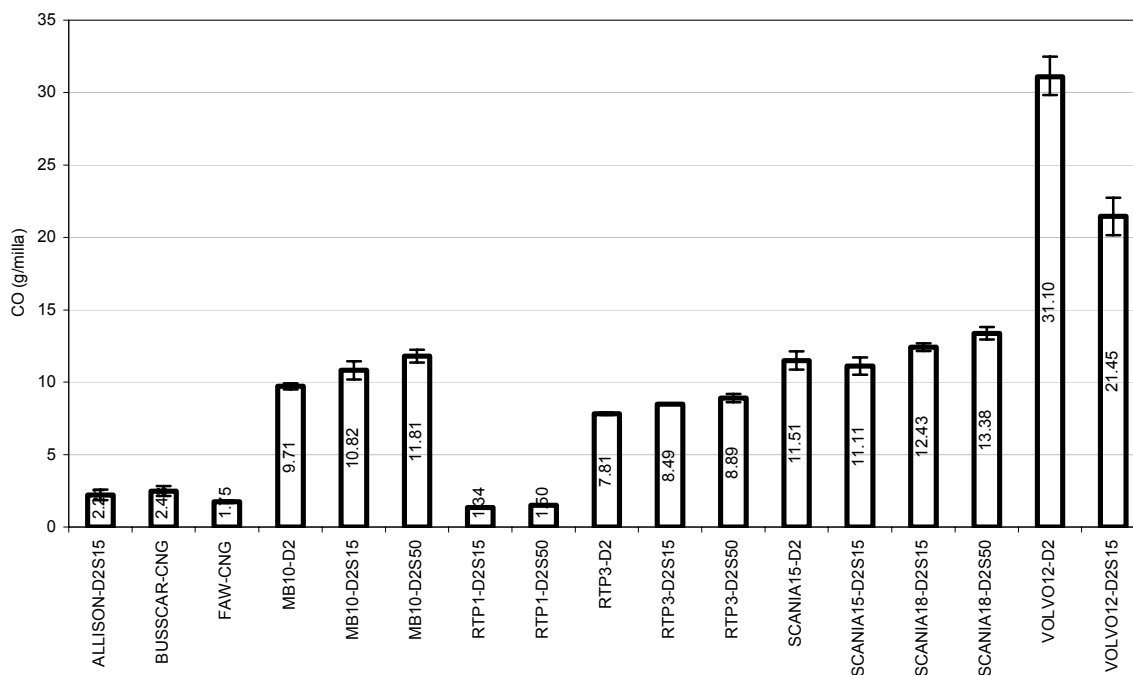


Figura 34: Emisiones de monóxido de carbono medidas en las modalidades combinadas del MCS.

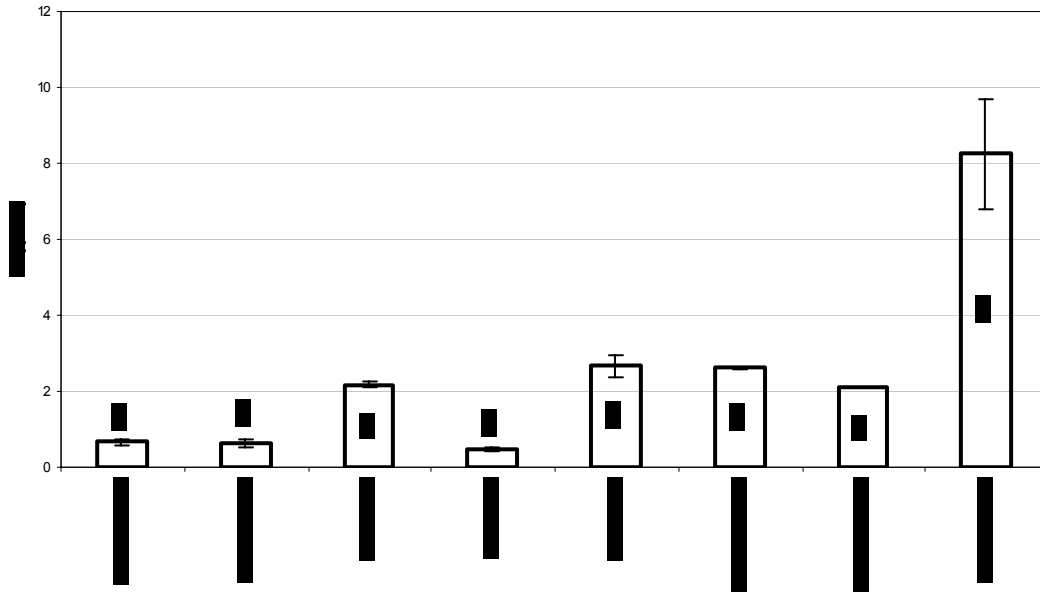


Figura 35: Emisiones de monóxido de carbono en el ETC

Las Figuras 36 y 37 muestran las emisiones de CO en unidades de pasajero-milla. De modo similar a la emisión de partículas, los autobuses a GNC y el híbrido ALLISON produjeron las emisiones de CO más bajas mientras que el RTP1 era el mejor de los autobuses a diesel y los SCANIA18 y SCANIA15 se compararon favorablemente debido a su alta capacidad.

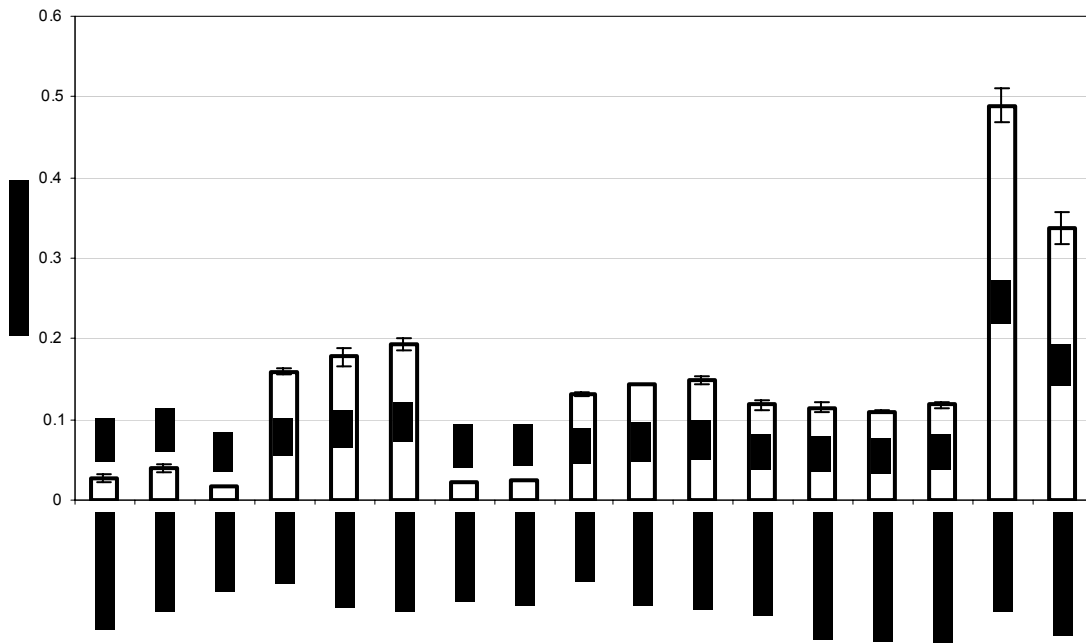


Figura 36: Emisiones de monóxido de carbono en el MCS en unidades de gramos por pasajero-milla.

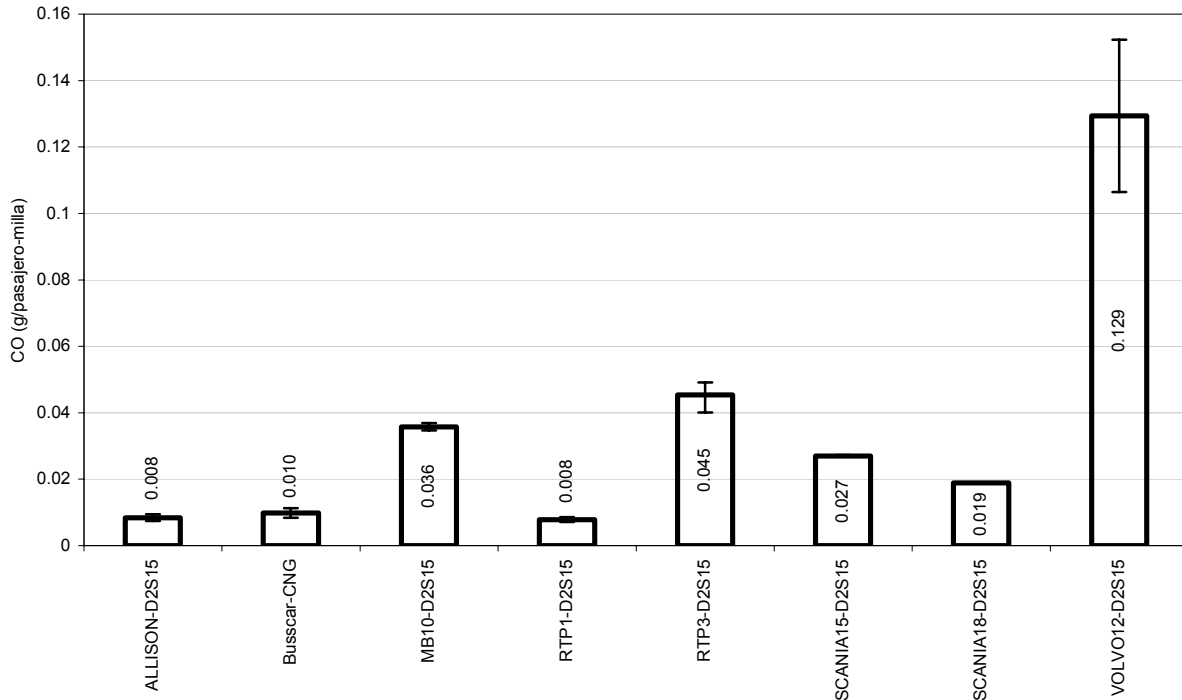


Figura 37: Emisiones de monóxido de carbono en el ETC en unidades de gramos por pasajero-milla.

Emisiones de Hidrocarburos

Los motores diesel tienen una eficiencia de combustión muy alta, y por lo tanto producen niveles de hidrocarburos muy bajos. Esto es evidente en las Figuras 38 y 39, donde sólo los autobuses a gas natural produjeron altos niveles de HC. La mayoría de los hidrocarburos de los autobuses a gas natural es combustible no quemado, en particular metano. La Figura 42 indica que las emisiones de hidrocarburos colectados en campo coincidieron mucho con los subsecuentes análisis en cromatógrafo de gases de las bolsas de muestreo, y que la mayor parte de los HC muestreados era metano. Los hidrocarburos no metánicos (NMHC) eran pocos, aproximadamente 1 g/milla, aunque en general mayores que en los vehículos diesel. Los datos en las Figuras 38 y 39 indican también que el postratamiento de PM (híbrido ALLISON, RTP1) eliminó los HC del diesel.

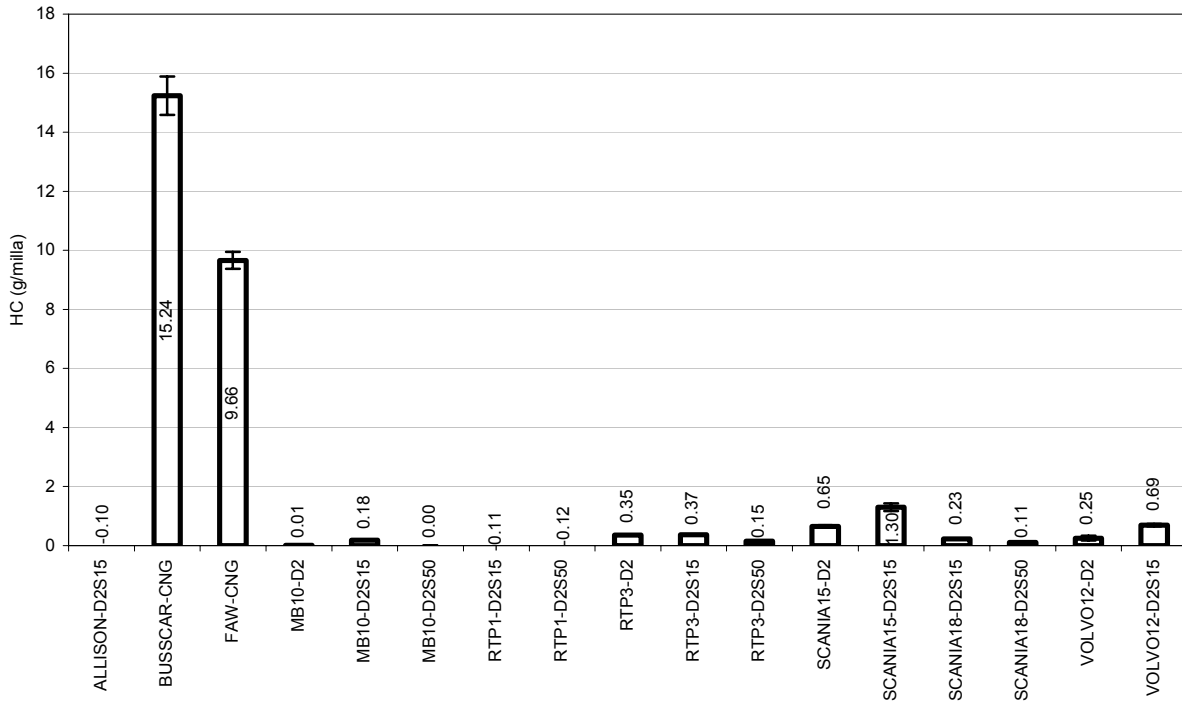


Figura 38: Emisiones de hidrocarburos medidas en las modalidades combinadas del MCS.

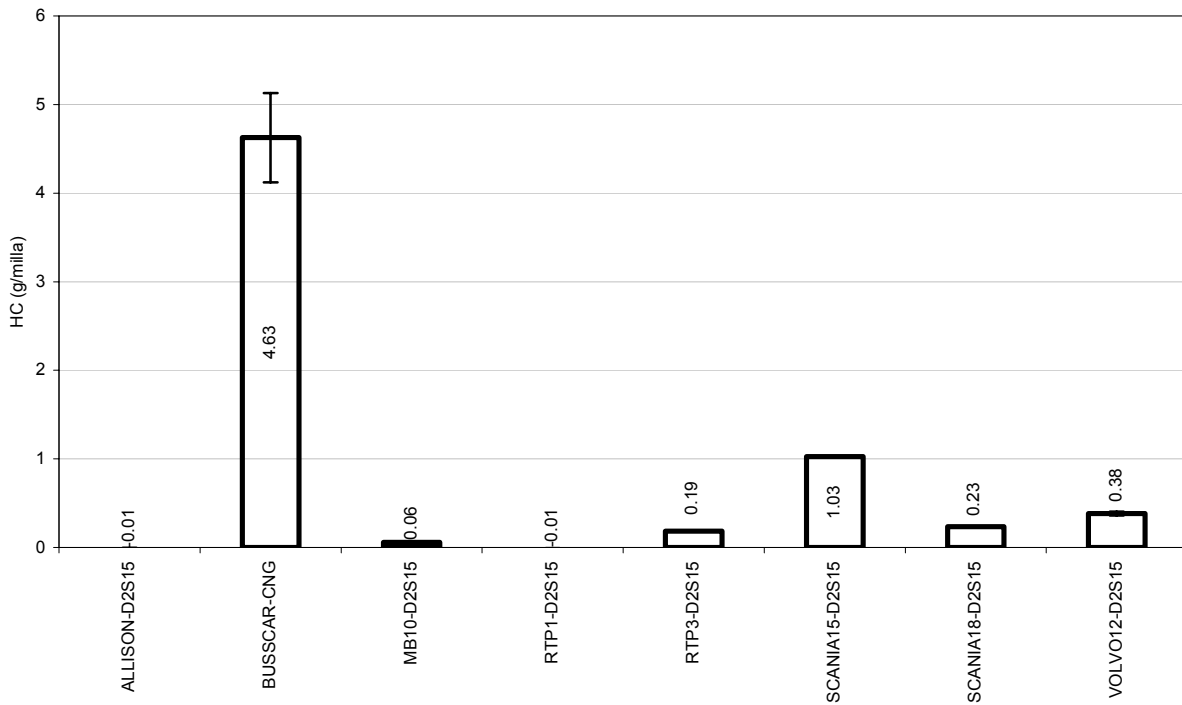


Figura 39: Emisiones de hidrocarburos en el ETC.

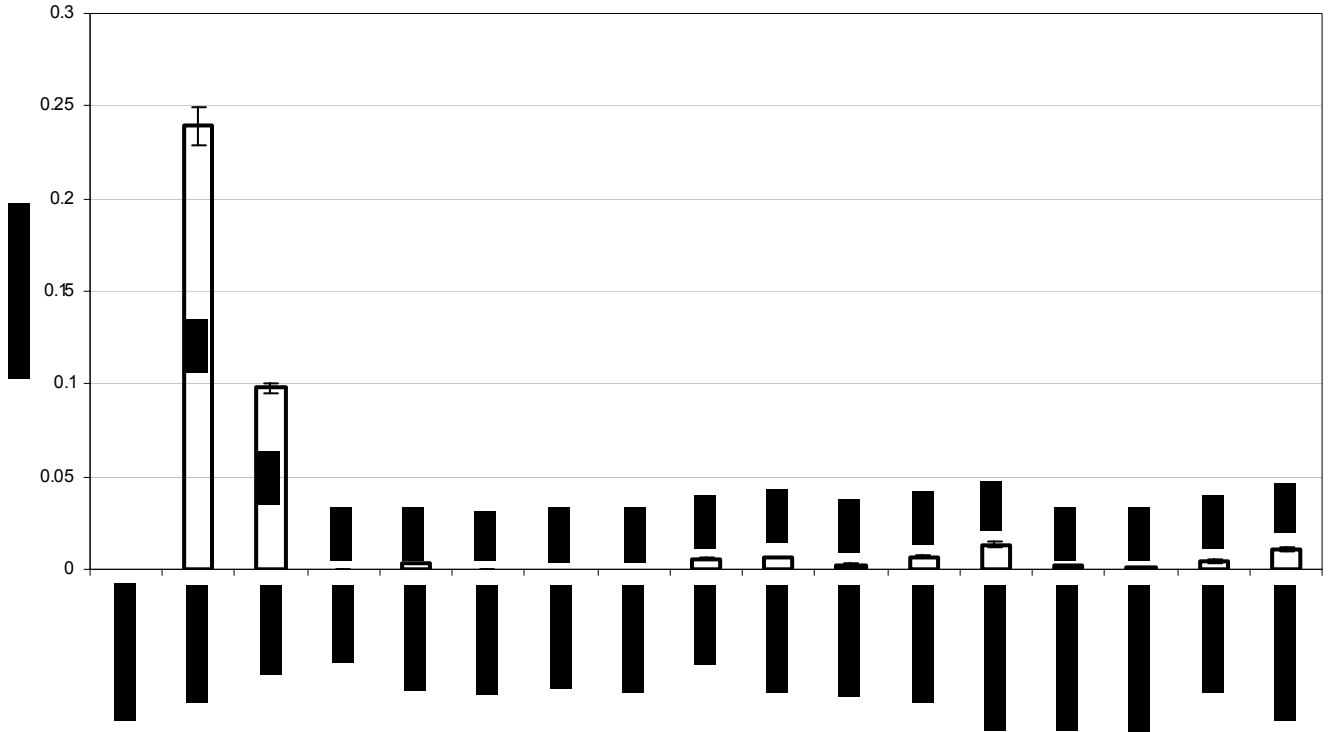


Figura 40: Emisiones de hidrocarburos en el MCS en unidades de gramos por pasajero-milla.

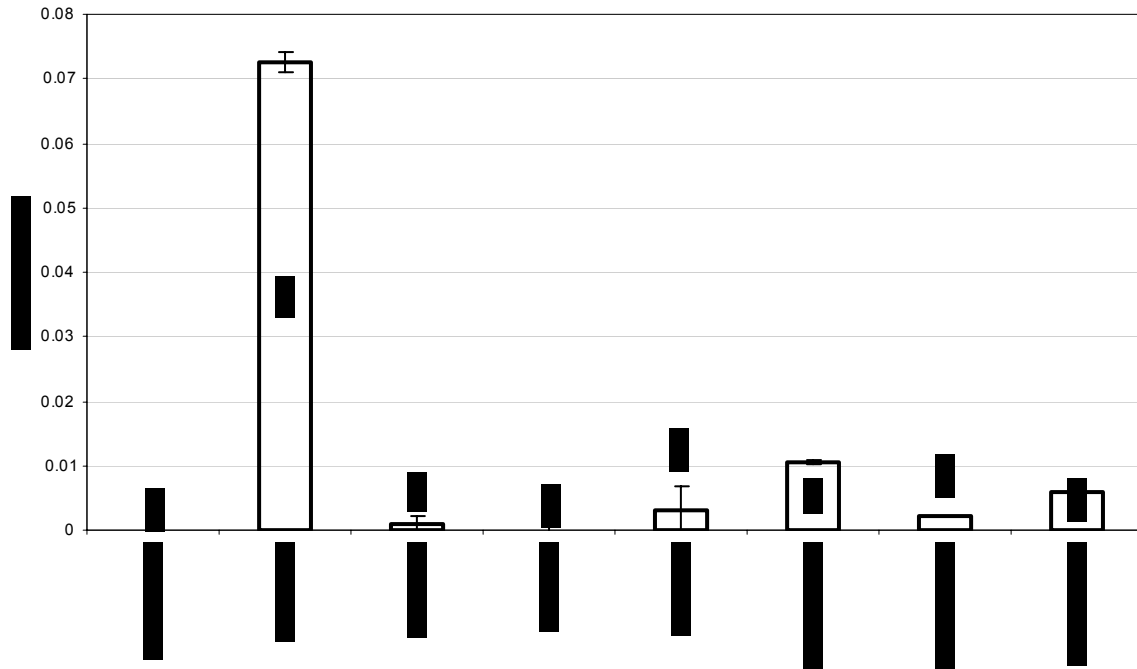


Figura 41: Emisiones de hidrocarburos en el ETC en unidades de gramos por pasajero-milla.

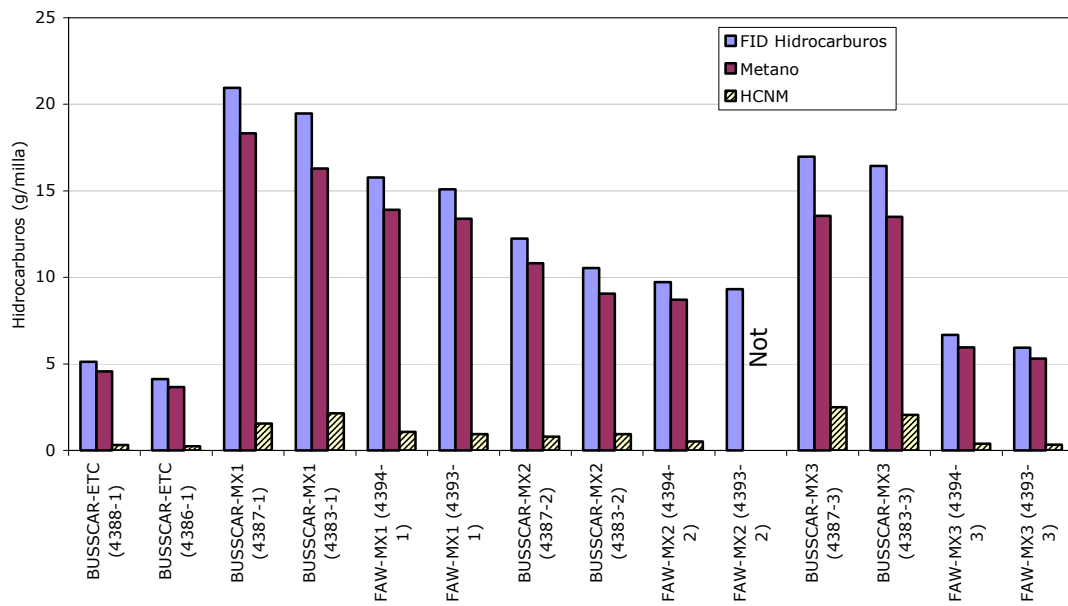


Figura 42: Comparación de mediciones de hidrocarburos con FID y cromatografía de gas.

Emisiones de Dióxido de Carbono

En las Figuras 43-46 se presentan las emisiones de CO₂, un contaminante no regulado, que corresponde bien con los datos de economía de combustible.

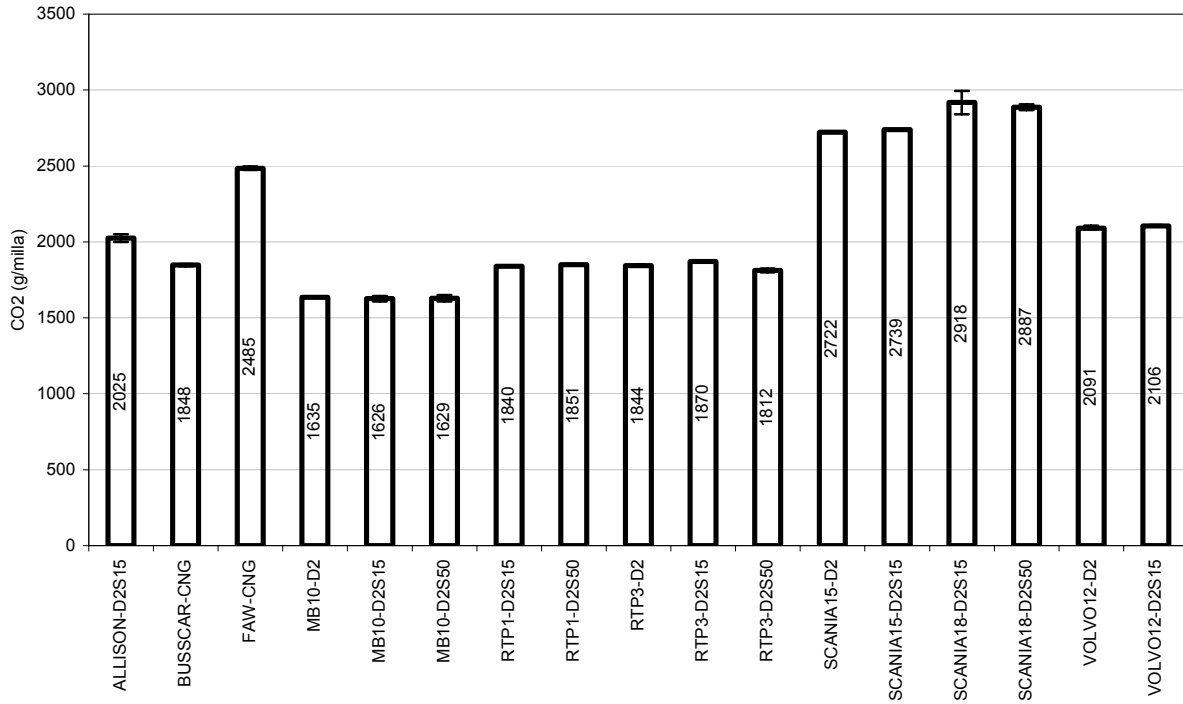


Figura 43: Emisiones de dióxido de carbono medidas en las modalidades combinadas del MCS.

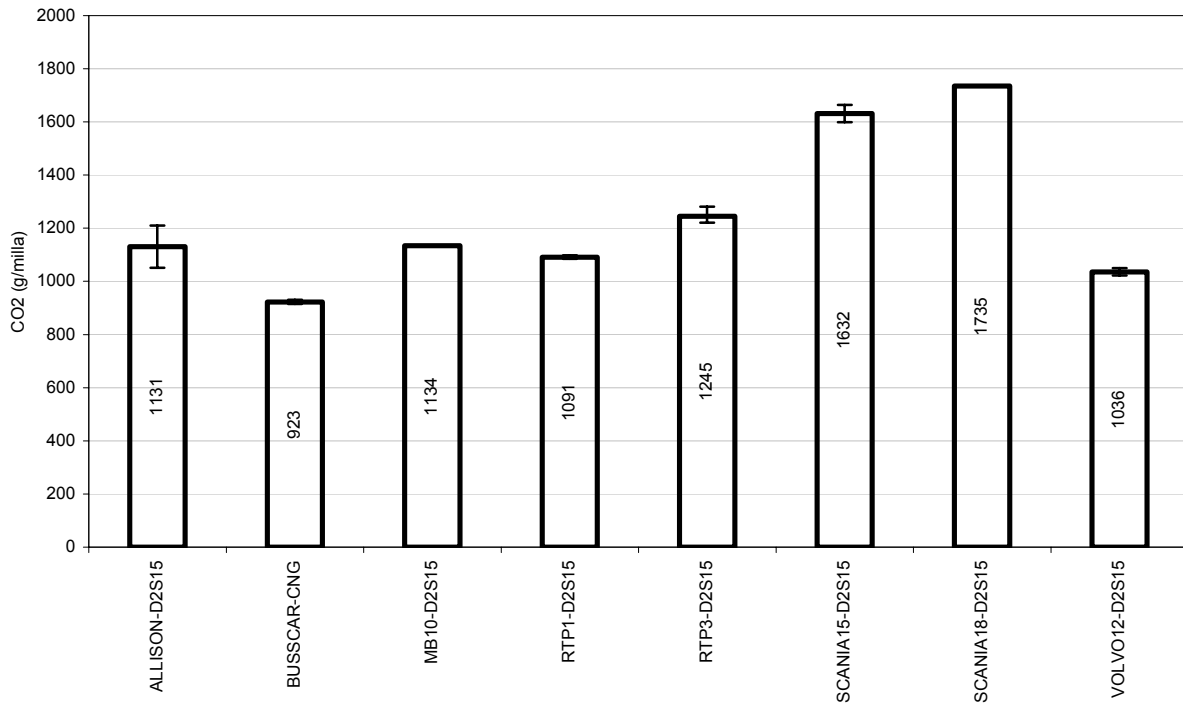


Figura 44: Emisiones de dióxido de carbono medidas en el ETC

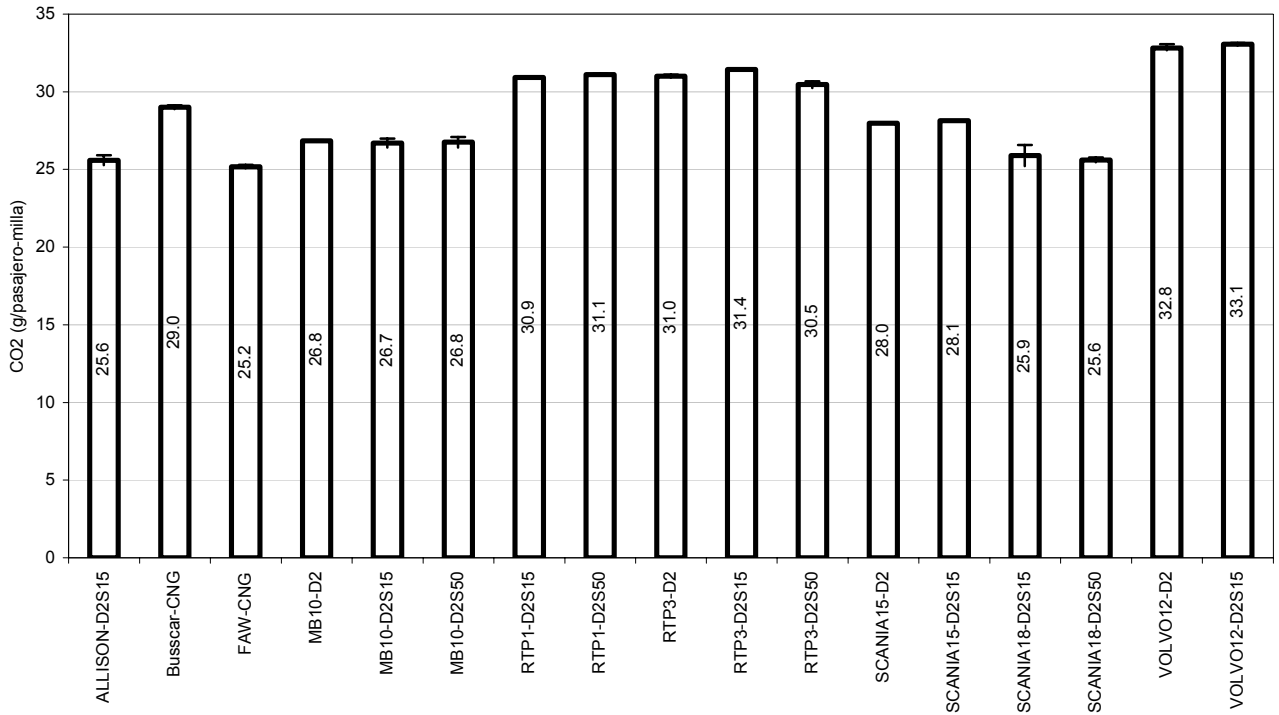


Figura 45: Emisiones de dióxido de carbono medidas en el MCS en unidades de gramos por pasajero-milla.

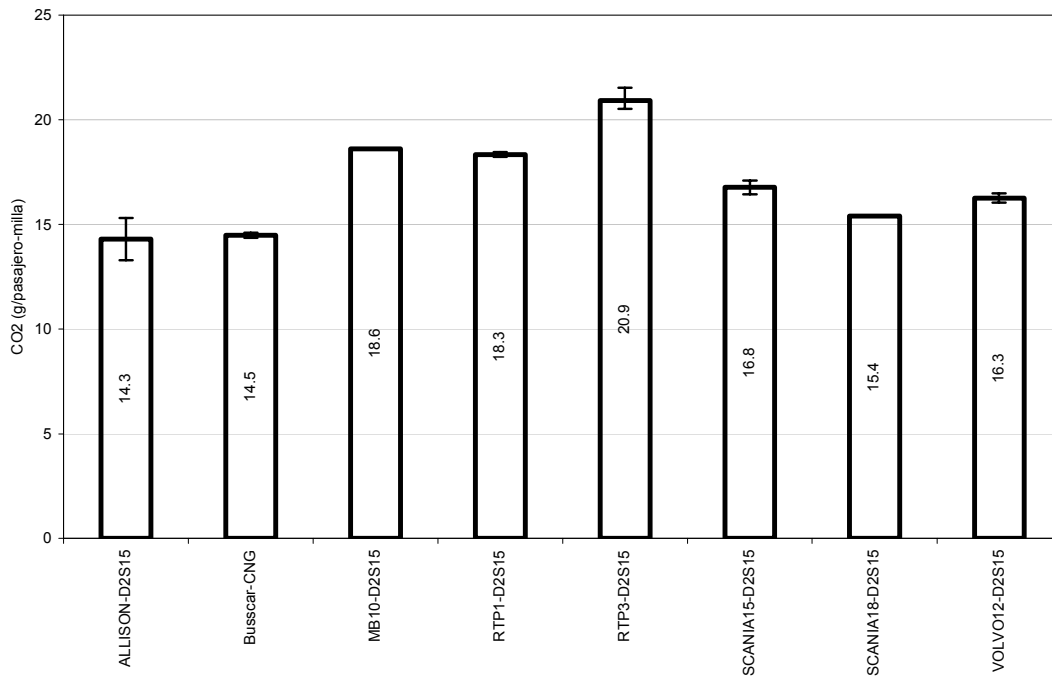


Figura 46: Emisiones de dióxido de carbono medidas en el ETC en unidades de gramos por pasajero-milla.

Hallazgos y Conclusiones

Los vehículos a GNC produjeron, tal y como se esperaba, menos emisiones de partículas que los autobuses a diesel. Sin embargo, cuando se compararon en términos de economía de combustible resultaron inferiores. Asimismo, los resultados indicaron una gran diferencia entre las emisiones de los dos vehículos a GNC. Las emisiones de los autobuses a GNC dependen en gran medida de la estrategia de control del motor. En muchos casos esto implica una disyuntiva entre altos niveles de emisión de NO_x o de metano a la par que varía la proporción aire-combustible. No es posible seleccionar la tecnología del GNC basándose tan sólo en el combustible hay que considerar la tecnología. En este caso, la tecnología básica del motor era similar, pero los dos motores funcionaban claramente con diferentes relaciones de aire/combustible. Aunque no tenemos información sobre la estrategia de control utilizado, puede que la altitud (la baja presión atmosférica) del Distrito Federal haya afectado uno de los camiones.

En casi todos los casos, las emisiones del autobús VOLVO eran superiores a las de los otros camiones. No podemos decir por qué las emisiones son superiores para un vehículo sobre otro sin realizar otro estudio sobre la tecnología de motor utilizada por cada autobús. Respecto al desempeño del autobús VOLVO, la empresa informó que el vehículo evaluado es un prototipo desarrollado para el transporte urbano y además, el motor no se ajustó para tener su mejor desempeño a la altitud de la Ciudad de México, asimismo se detectó que durante gran parte del periodo de prueba el sistema Turbo no funcionó bien, lo cual dió como resultado un aumento en las emisiones. Cabe hacer énfasis que ésta es la opinión de la empresa, no de la WVU o la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Las emisiones de PM y NO_x pueden variar enormemente entre motores similares debido a la sincronización de inyección y la tasa de llenado máxima y, puesto que es frecuente que si la emisión de PM es alta, la del CO estará alta, ya que las dos emisiones salen de zonas del cilindro que son "demasiado ricas de combustible".

El autobús híbrido ALLISON tuvo buen desempeño en las pruebas de economía de combustible y de emisiones. Sin embargo, el autobús ALLISON (examinado con una carga de pasajeros del 50%) y el autobús MB10 mostraron relaciones de pesos de prueba para carga de pasajeros que son alrededor de un 10% menor que para otros vehículos examinados en el programa. Dada la gran influencia que tiene el peso del vehículo al determinar la economía de combustible y las emisiones, autobuses más ligeros con capacidades de pasajeros similares, generalmente mostrarán un mejor desempeño.

Ref. Nombre	Peso de prueba (libras)	Peso neto (libras)	Capacidad de pasajeros	Proporción de peso de prueba- pasajeros (libras/pasajero)
ALLISON	35000	29000	113	310
Ankai	32150	22700	90	357
BUSSCAR	33025	23425	91	363
FAW	48025	33175	140	343
MB10	26996	17800	87	310
RTP1	30070	21100	85	354
RTP3	30220	21250	85	356
SCANIA15	50040	35400	139	360
SCANIA18	57025	40075	161	354
VOLVO12	32050	22500	91	352

El diesel de bajo azufre no redujo significativamente las emisiones de PM. El diesel de bajo azufre reduce el ácido sulfúrico (masa sulfato en las PM), pero esto representa una pequeña fracción de la masa total de las PM. El beneficio es permitir el uso de "trampas de PM" en el sistema de escape ya que estas trampas no suelen funcionar bien si no se utiliza diesel de bajo azufre.

Un examen de las emisiones en unidades de pasajero-milla produce una comprensión analítica de gran valor. Tradicionalmente, las emisiones vehiculares han sido registradas en base a distancias específicas, lo cual tiende a favorecer los vehículos con más potencia por peso/capacidad de pasajeros. Utilizando este análisis, la comparación de los autobuses SCANIA y ALLISON mejoró, ya que tenían mayor capacidad de pasajeros que los otros autobuses estudiados en este programa. De la misma manera, los autobuses de menor capacidad exhiben un rendimiento menos favorable. Sin embargo, se advierte que la aplicación del rendimiento en unidades de masa por pasajero-milla resultará en decisiones poco informadas.

Referencias

1. Clark, N., Gautam, M., Bata, R. and Lyons, D., "Design and Operation of a New Transportable Laboratory for Emissions Testing of Heavy-Duty Trucks and Buses," Int. Journal of Vehicle Design: Heavy Vehicle Systems, Vol. 2 Nos. 3/4., pp285-299, 1995.
2. Wang, W., Bata, R., Lyons, D., Clark, N., Palmer, M., Gautam, M., Howell, A., Rapp, B., "Transient Response in a Dynamometer Power Absorption System," SAE Paper 920252, 1992.
3. Gautam, M., Clark, N., Lyons, D., Long, T. Jr., Howell, A., Loth, J., Palmer, G.M., Wang, W., G., and Bata, R., "Design Overview of a Heavy Duty Mobile Vehicle Emissions Testing Laboratory", ASME DE – Vol. 40, Advanced Automotive Technologies, pp. 199-207, ASME Winter Annual Meeting, Atlanta, GA, Dec. 1-6, 1991.
4. US Code of Federal Regulations, Volume 40, Part 86, Subpart N.
5. SAE J2711
6. Proposed Diesel Vehicle Emissions "In-Service Emissions Performance - Phase 2: Vehicle Testing - Appendices," NEPC, November 2000
7. Gilbert, M.,S. and Clark, N., N., "Measurement of Particulate Matter from Diesel Engine Exhaust Using a Tapered Element Oscillating Microbalance," Int J Engine Research, 2001, Vol.2, No. 4, 277-287.
8. Kelly, N. A. and Morgan, C. "An Evaluation of the Tapered Element Oscillating Microbalance Method for Measuring Diesel Particulate Emissions," ISSN 1047-3289 J. Air & Waste Manage. Assoc. 52:1362-1377.
9. Moosmuller, H., Arnott, W.P., Rogers, C.F., Bowen, J.L., Gillies, J.A., Pierson, W.R., Collins, J.F., Durbin, T.D., Norbeck, J.M., "Time-Resolved 11 Characterization of Diesel Particulate Emissions. 1. Instruments for Particle Mass Measurements," Environ. Sci. Technol. 2001, 35, 781-7.

Apéndice A: Emisiones Tabuladas y Datos de Economía de Combustible

Tabla A- 1: Emisiones y economía de combustible de pruebas en el segmento MX1 del MCS

Vehículo	Identificador de Pruebas	Peso de Pruebas	CO [g/milla]	CO ₂ [g/milla]	NO _x [g/milla]	NO _{x2} [g/milla]	FIDHC ⁽¹⁾ [g/milla]	PM [g/milla]	TEOM [g/milla]	Economía de Combustible
MX-VOLVO12-D2S15-MCS	4312-1	32050	37.6	2286.1	26.6	26.7	0.71	3.06		4.11
MX-VOLVO12-D2S15-MCS	4315-1	32050	33.2	2271.0	26.1	25.0	0.88	1.82	1.41	4.15
MX-VOLVO12-D2-MCS	4319-1	32050	48.2	2399.6	23.7	23.8	0.44	3.44	2.65	3.90
MX-VOLVO12-D2-MCS	4320-1	32050	48.9	2262.6	23.2	23.3	0.31	3.26	2.92	4.13
MX-VOLVO12-D2-MCS	4321-1	32050	47.3	2266.9	23.2	22.5	0.18	3.21	2.44	4.12
MX-VOLVO12-D2-MCS	4322-1	32050	50.9	2321.9	23.1	22.4	0.08	3.52		4.02
MX-SCANIA15-D2S15-MCS	4330-1	50040	20.1	2884.2	24.7	25.0	3.04	1.58	1.14	3.30
MX-SCANIA15-D2S15-MCS	4332-1	50040	18.5	2820.8	24.7	23.5	1.77	1.39	1.15	3.38
MX-SCANIA15-D2-MCS	4334-1	50040	22.1	2828.1	23.7	23.7	0.70	1.61	1.34	3.50
MX-SCANIA15-D2-MCS	4335-1	50040	19.9	2806.2	23.6	22.7	0.63	1.58	1.35	3.53
MX-RTP3-D2S15-MCS	4353-1	30220	11.9	2011.0	17.4	17.5	0.58	0.50	0.39	5.05
MX-RTP3-D2S15-MCS	4355-1	30220	12.0	1971.1	16.5	15.5	0.50	0.61	0.05	5.16
MX-RTP3-D2S50-MCS	4362-1	30220	12.0	1936.3	16.2	16.4	0.18	0.65	0.55	5.18
MX-RTP3-D2S50-MCS	4363-1	30220	12.5	1928.2	16.3	15.4	0.17	0.62	0.52	5.20
MX-RTP3-D2-MCS	4364-1	30220	10.4	2069.2	17.8	17.9	0.57	0.47	0.42	4.80
MX-RTP3-D2-MCS	4365-1	30220	11.9	2099.4	18.6	17.4	0.54	0.65	0.54	4.73
MX-MB10-D2S15-MCS	4369-1	26996	15.3	1682.4	12.9	13.0	0.35	0.65	0.50	6.01
MX-MB10-D2S15-MCS	4371-1	26996	14.4	1601.9	11.9	11.1	0.37	0.57	0.49	6.32
MX-MB10-D2S50-MCS	4376-1	26996	15.7	1601.5	11.2	11.3	0.12	0.87	0.96	6.23
MX-MB10-D2S50-MCS	4377-1	26996	14.1	1572.2	10.8	9.9		0.82	0.78	6.36
MX-MB10-D2-MCS	4378-1	26996	12.0	1636.1	11.2	11.1	0.09	1.37	1.54	6.06
MX-MB10-D2-MCS	4379-1	26996	12.1	1588.4	10.9	10.0		0.73	0.50	6.24
MX-BUSSCAR-CNG-MCS	4383-1	33025	3.7	1972.2	19.8	19.7	16.29/2.15	0.01		3.43
MX-BUSSCAR-CNG-MCS	4387-1	33025	2.9	1954.9	19.0	12.8	18.32/1.56	0.01	0.01	3.45
MX-FAW-CNG-MCS	4393-1	48025	2.4	2678.7	36.1	36.1	13.39/0.94	0.01		2.56
MX-FAW-CNG-MCS	4394-1	48025	2.4	2682.6	35.1	28.2	13.90/1.07	0.02		2.55
MX-ALLISON-D2S15-MCS	4400-1	35000	6.7	1773.4	8.6	8.6		0.10	0.09	5.76
MX-ALLISON-D2S15-MCS	4402-1	35000	3.6	1843.7	11.5	1.9		0.04	0.03	5.55
MX-RTP1-D2S15-MCS	4408-1	30070	2.0	2005.5	15.4	5.3		0.08	0.05	5.11
MX-RTP1-D2S50-MCS	4410-1	30070	2.3	1889.7	14.9	14.8		0.15		5.36
MX-RTP1-D2S50-MCS	4411-1	30070	2.3	1927.4	14.8	5.2		0.05	0.04	5.25
MX-SCANIA18-D2S15-MCS	4418-1	57025	21.5	2963.7	28.3	28.3	0.24	1.68	1.35	3.42
MX-SCANIA18-D2S15-MCS	4419-1	57025	21.0	3075.3	28.9	28.2	0.21	1.54	1.37	3.30
MX-SCANIA18-D2S50-MCS	4421-1	57025	24.3	2968.7	23.6	23.4	0.17	1.91	1.55	3.37
MX-SCANIA18-D2S50-MCS	4422-1	57025	23.0	2973.7	23.5	22.9	0.05	1.81	1.55	3.37

Tabla A- 2: Emisiones y economía de combustible de pruebas en el segmento MX2

Núm. Referencia WVU	Identificador de Pruebas	CO [g/milla]	CO ₂ [g/milla]	NO _x [g/milla]	NO _{x2} [g/milla]	FIDHC ⁽¹⁾ [g/milla]	PM [g/milla]	Economía de combustible
MX-VOLVO12-D2S15-MCS	4312-2	19.9	1659.0	17.3	17.4	0.55	1.69	5.71
MX-VOLVO12-D2S15-MCS	4315-2	17.9	1647.7	17.2	16.7	0.63	1.26	5.76
MX-VOLVO12-D2-MCS	4319-2	30.2	1718.1	16.0	16.1	0.32	2.36	5.47
MX-VOLVO12-D2-MCS	4320-2	29.1	1667.3	15.9	15.8	0.33	2.24	5.63
MX-VOLVO12-D2-MCS	4321-2	27.7	1653.2	15.7	15.3	0.25	2.11	5.69
MX-VOLVO12-D2-MCS	4322-2	30.7	1652.9	15.3	15.0	0.17	2.42	5.67
MX-SCANIA15-D2S15-MCS	4330-2	9.6	2180.3	18.3	18.5	1.04	0.85	4.39
MX-SCANIA15-D2S15-MCS	4332-2	8.5	2178.6	18.3	17.5	0.98	0.69	4.40
MX-SCANIA15-D2-MCS	4334-2	9.5	2199.9	18.1	18.1	0.63	0.83	4.52
MX-SCANIA15-D2-MCS	4335-2	8.3	2176.6	17.8	17.1	0.57	0.81	4.57
MX-RTP3-D2S15-MCS	4353-2	7.6	1508.6	12.1	12.1	0.35	0.42	6.75
MX-RTP3-D2S50-MCS	4362-2	8.4	1490.4	11.5	11.7	0.19	0.47	6.74
MX-RTP3-D2S50-MCS	4363-2	7.7	1452.5	11.3	10.7	0.16	0.45	6.92
MX-RTP3-D2-MCS	4364-2	7.1	1480.3	11.8	11.9	0.35	0.41	6.72
MX-RTP3-D2-MCS	4365-2	7.3	1480.6	11.8	11.2	0.38	0.41	6.71
MX-MB10-D2S15-MCS	4369-2	8.9	1338.0	9.0	9.0	0.16	0.57	7.59
MX-MB10-D2S15-MCS	4371-2	7.8	1294.3	8.7	8.2	0.15	0.45	7.86
MX-MB10-D2S50-MCS	4376-2	9.5	1335.6	9.0	9.1	0.13	0.62	7.51
MX-MB10-D2S50-MCS	4377-2	9.2	1306.8	8.7	8.2		0.61	7.68
MX-MB10-D2-MCS	4378-2	7.7	1311.1	9.0	8.9	0.01	0.64	7.58
MX-MB10-D2-MCS	4379-2	8.5	1320.7	8.8	8.2	0.01	0.58	7.52
MX-BUSSCAR-CNG-MCS	4383-2	2.2	1479.8	13.0	13.0	9.06/0.94	0.02	4.61
MX-BUSSCAR-CNG-MCS	4387-2	1.7	1466.4	12.8	10.6	10.82/0.80	0.01	4.64
MX-FAW-CNG-MCS	4393-2	1.9	2054.9	26.9	26.8	n/a	0.01	3.34
MX-FAW-CNG-MCS	4394-2	1.3	2017.8	25.6	23.0	8.71/0.52	0.00	3.40
MX-ALLISON-D2S15-MCS	4400-2	1.3	1801.7	10.9	10.9		0.04	5.69
MX-ALLISON-D2S15-MCS	4402-2	1.4	1597.0	9.6	2.7		0.02	6.42
MX-RTP1-D2S15-MCS	4408-2	1.1	1482.9	10.4	3.6		0.06	6.92
MX-RTP1-D2S50-MCS	4410-2	1.3	1512.2	10.9	10.9		0.07	6.70
MX-RTP1-D2S50-MCS	4411-2	1.2	1547.2	11.2	4.3		0.05	6.55
MX-SCANIA18-D2S15-MCS	4418-2	9.2	2391.4	18.5	18.5	0.19	0.90	4.27
MX-SCANIA18-D2S15-MCS	4419-2	10.2	2478.8	18.5	18.2	0.20	0.92	4.11
MX-SCANIA18-D2S50-MCS	4421-2	10.4	2370.6	16.3	16.2	0.09	1.11	4.25
MX-SCANIA18-D2S50-MCS	4422-2	9.0	2410.1	16.1	15.8	0.09	0.98	4.18

Tabla A- 3: Emisiones y economía de combustible de pruebas en el segmento MX3 del MCS.

Núm. Referencia WVU	Identificador de Pruebas	CO [g/milla]	CO ₂ [g/milla]	NO _x [g/milla]	NO _{x2} [g/milla]	FIDHC ⁽¹⁾ [g/milla]	PM [g/milla]	Economía de combustible
MX-VOLVO12-D2S15-MCS	4312-3	17.1	2495.3	23.9	24.0	0.72	1.58	3.82
MX-VOLVO12-D2S15-MCS	4315-3	15.0	2484.6	23.9	23.4	0.77	1.24	3.85
MX-VOLVO12-D2-MCS	4320-3	22.8	2408.9	22.3	22.2	0.35	1.83	3.95
MX-VOLVO12-D2-MCS	4321-3	22.0	2436.5	22.1	21.7	0.28	3.27	3.91
MX-VOLVO12-D2-MCS	4322-3	23.7	2462.8	21.9	21.4	0.24	1.94	3.86
MX-SCANIA15-D2S15-MCS	4330-3	9.0	3234.8	22.9	23.0	0.91	0.76	2.97
MX-SCANIA15-D2S15-MCS	4332-3	8.0	3285.2	24.0	23.1	1.02	0.72	2.93
MX-SCANIA15-D2-MCS	4334-3	9.1	3193.9	22.8	22.8	0.74	0.85	3.12
MX-SCANIA15-D2-MCS	4335-3	8.3	3261.6	23.7	22.9	0.64	0.88	3.06
MX-RTP3-D2S15-MCS	4353-3	7.5	2162.8	16.9	16.9	0.26	0.59	4.72
MX-RTP3-D2S15-MCS	4355-3	6.8	2071.4	15.4	14.7	0.17	0.53	4.93
MX-RTP3-D2S50-MCS	4362-3	8.3	2103.3	16.7	16.8	0.14	0.55	4.79
MX-RTP3-D2S50-MCS	4363-3	7.4	2080.7	16.6	15.8	0.09	0.50	4.85
MX-RTP3-D2-MCS	4364-3	6.9	2106.6	16.9	16.9	0.24	0.47	4.73
MX-RTP3-D2-MCS	4365-3	6.9	2096.0	17.0	16.3	0.24	0.47	4.76
MX-MB10-D2S15-MCS	4369-3	12.0	1964.3	12.3	12.3	0.11	0.79	5.18
MX-MB10-D2S15-MCS	4371-3	10.3	1963.7	12.1	11.5	0.08	0.70	5.18
MX-MB10-D2S50-MCS	4376-3	13.2	2024.7	12.6	12.7		0.89	4.96
MX-MB10-D2S50-MCS	4377-3	12.2	1970.6	12.4	11.7	0.12	1.98	5.09
MX-MB10-D2-MCS	4378-3	10.7	2007.0	12.8	12.7	0.02	0.77	4.95
MX-MB10-D2-MCS	4379-3	10.2	2000.9	12.8	12.1		0.75	4.97
MX-BUSSCAR-CNG-MCS	4383-3	3.1	2271.2	16.0	15.9	13.50/2.05	0.03	3.00
MX-BUSSCAR-CNG-MCS	4387-3	2.2	2239.4	15.6	13.3	13.55/2.49	0.02	3.04
MX-FAW-CNG-MCS	4393-3	1.4	2870.1	34.6	34.6	5.31/0.33	0.00	2.41
MX-FAW-CNG-MCS	4394-3	1.6	2847.1	32.0	28.8	5.95/0.38	0.00	2.43
MX-ALLISON-D2S15-MCS	4400-3	1.6	2438.9	13.2	13.2		0.03	4.21
MX-ALLISON-D2S15-MCS	4402-3	1.3	2475.0	12.7	5.6		0.02	4.15
MX-RTP1-D2S15-MCS	4408-3	1.2	2136.1	15.2	6.1		0.29	4.80
MX-RTP1-D2S50-MCS	4410-3	1.4	2172.9	17.0	16.9		0.32	4.66
MX-RTP1-D2S50-MCS	4411-3	1.2	2131.5	16.2	7.3		0.21	4.75
MX-SCANIA18-D2S15-MCS	4418-3	9.7	3282.0	21.8	21.8	0.27	0.95	3.11
MX-SCANIA18-D2S15-MCS	4419-3	10.1	3564.8	23.3	22.8	0.28	0.91	2.87
MX-SCANIA18-D2S50-MCS	4421-3	11.0	3397.0	21.3	21.1	0.13	1.05	2.97
MX-SCANIA18-D2S50-MCS	4422-3	11.0	3452.0	20.8	20.4	0.11	1.06	2.92

Tabla A- 4: Emisiones y economía de combustible de pruebas en el ETC.

WVU Ref Num	Identificador de Pruebas	CO [g/milla]	CO ₂ [g/milla]	NO _x [g/milla]	NO _{x2} [g/milla]	FIDHC ⁽¹⁾ [g/milla]	PM [g/milla]	TEOM [g/milla]	economía de Combustible
MX-VOLVO12-D2S15-ETC	4311-1	6.78	1050.07	10.5	10.5	0.41	0.87	0.69	9.09
MX-VOLVO12-D2S15-ETC	4313-1	9.70	1021.85	9.9	9.7	0.36	0.84		9.30
MX-SCANIA15-D2S15-ETC	4329-1	2.65	1663.66	11.7	11.7	1.03	0.48	0.31	5.78
MX-SCANIA15-D2S15-ETC	4331-1	2.60	1599.48	11.6	11.0	1.02	0.39	0.27	6.01
MX-RTP3-D2S15-ETC	4354-1	2.87	1247.35	8.8	8.8	0.19	0.41	0.30	8.20
MX-RTP3-D2S15-ETC	4356-1	2.39	1220.47	8.0	7.6	0.18	0.29	0.22	8.38
MX-RTP3-D2S15-ETC	4360-1	2.92	1281.33	9.5	9.5	0.19	0.32	0.23	7.98
MX-RTP3-D2S15-ETC	4361-1	2.61	1229.26	8.5	8.2	0.19	0.25	0.19	8.32
MX-MB10-D2S15-ETC	4370-1	2.24	1132.85	8.0	8.0	0.06	0.15	0.12	9.03
MX-MB10-D2S15-ETC	4372-1	2.11	1135.03	7.8	7.4	0.05	0.15	0.12	9.02
MX-BUSSCAR-CNG-ETC	4386-1	0.53	915.43	7.5	7.5	3.67/0.25	0.04	0.03	7.51
MX-BUSSCAR-CNG-ETC	4388-1	0.72	930.41	6.1	5.4	4.56/0.31	0.05	0.03	7.37
MX-ALLISON-D2S15-ETC	4399-1	0.74	1210.16	6.0	6.1	0.00	0.03	0.02	8.48
MX-ALLISON-D2S15-ETC	4401-1	0.58	1051.14	4.9	2.3		0.01	0.01	9.76
MX-RTP1-D2S15-ETC	4406-1	0.42	1084.99	7.3	7.3		0.21	0.12	9.46
MX-RTP1-D2S15-ETC	4409-1	0.51	1097.79	6.7	3.4		0.20	0.11	9.35
MX-SCANIA18-D2S15-ETC	4417-1	2.13	1735.08	10.8	10.6	0.23	0.25	0.18	5.90

Apéndice B: Figuras Adicionales

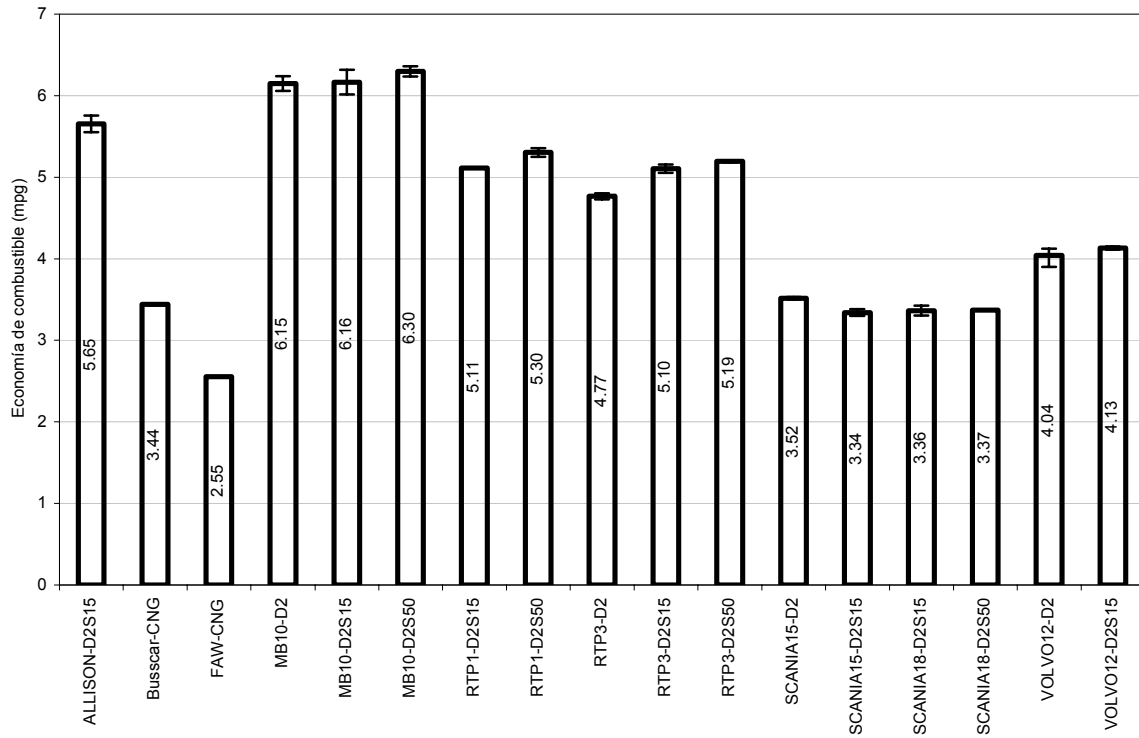


Figura B - 1: Economía de combustible en el segmento MX1 del MCS

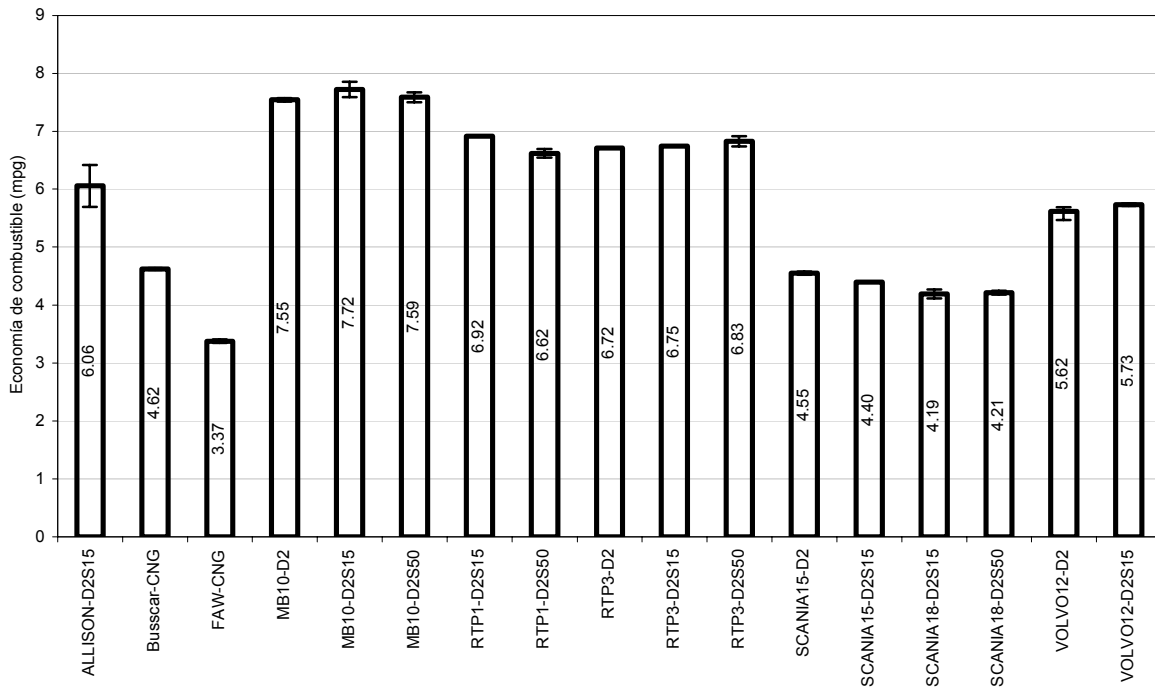


Figura B - 2: Economía de combustible en el segmento MX2 del MCS

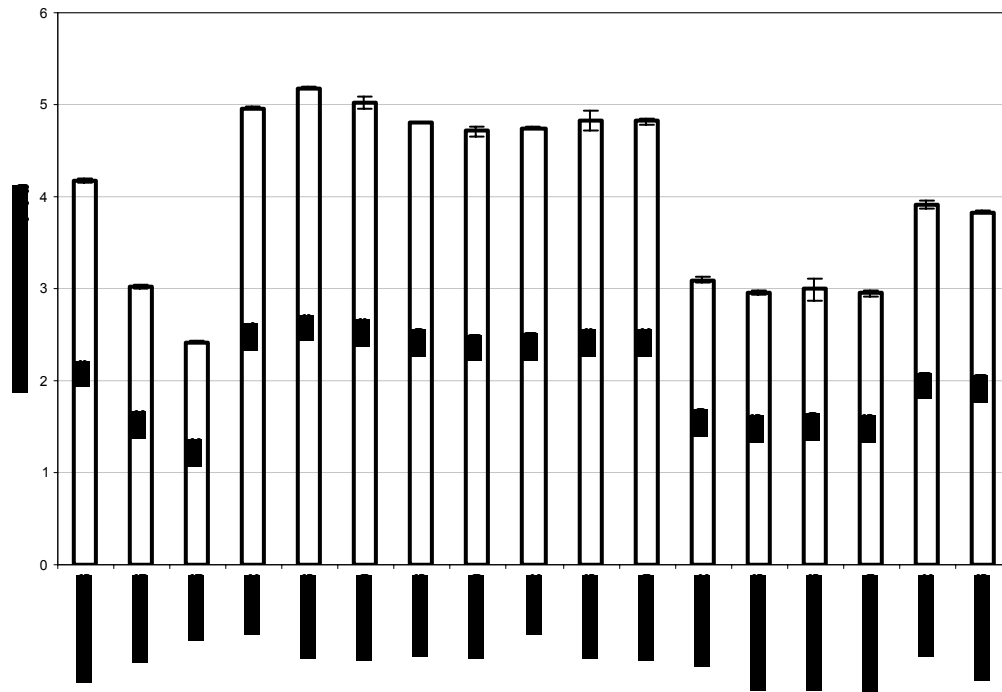


Figura B - 3: Economía de combustible en el segmento MX3 del MCS.

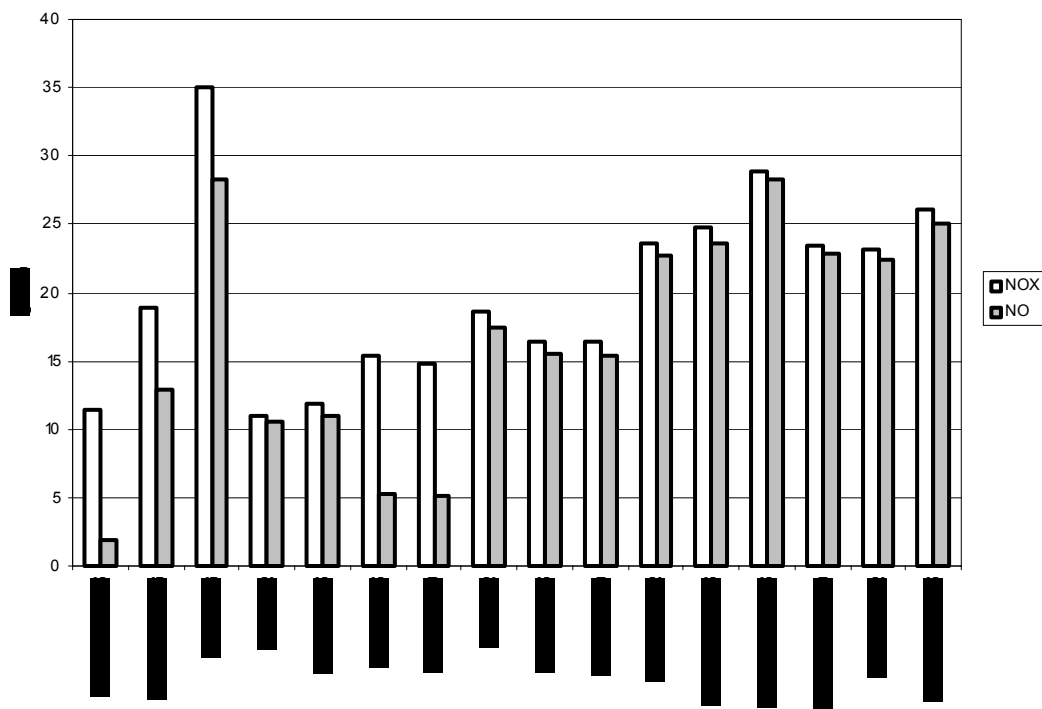


Figura B - 4: Emisiones de NO_x en el segmento MX1 del MCS

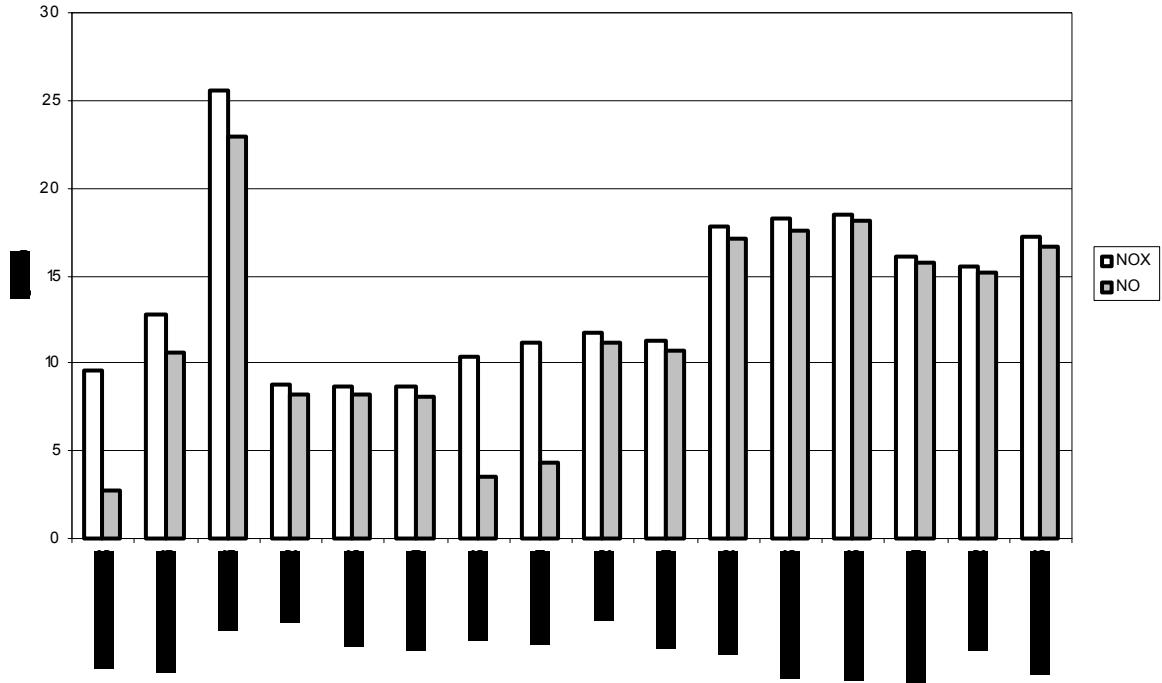


Figura B - 5: Emisiones de NO_x en el segmento MX2 del MCS

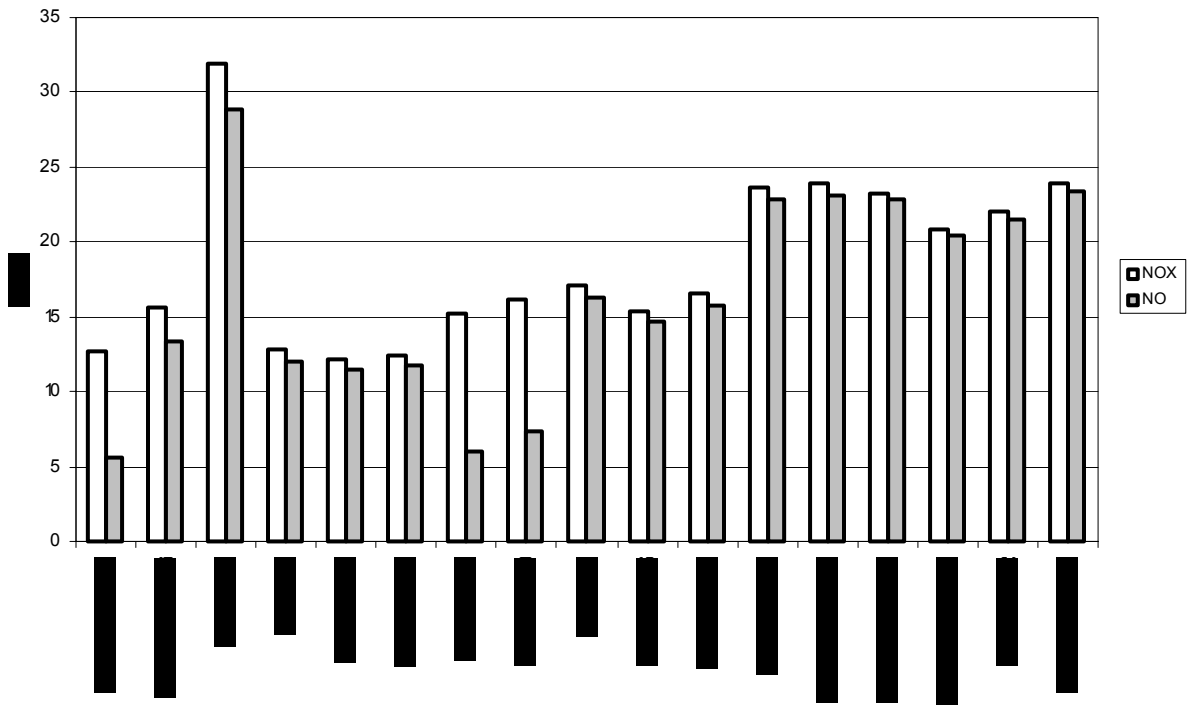


Figura B - 6: Emisiones de NO_x en el segmento MX3 del MCS

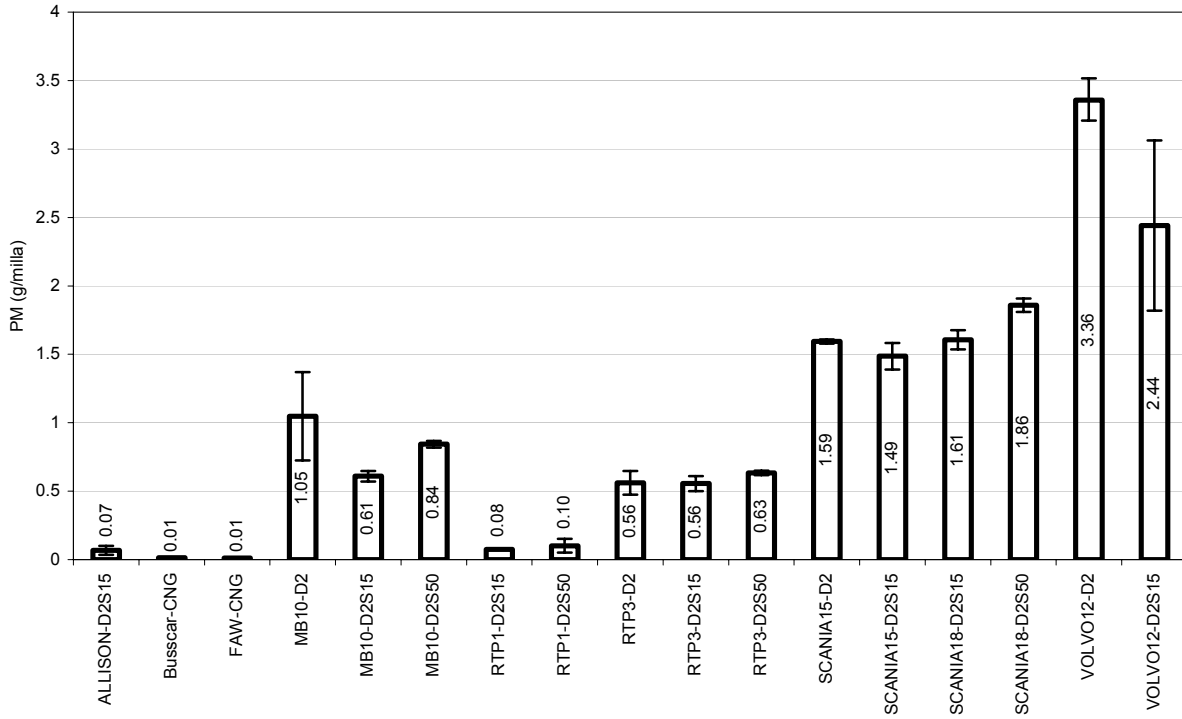


Figura B - 7: Emisiones de partículas en el segmento MX1 del MCS

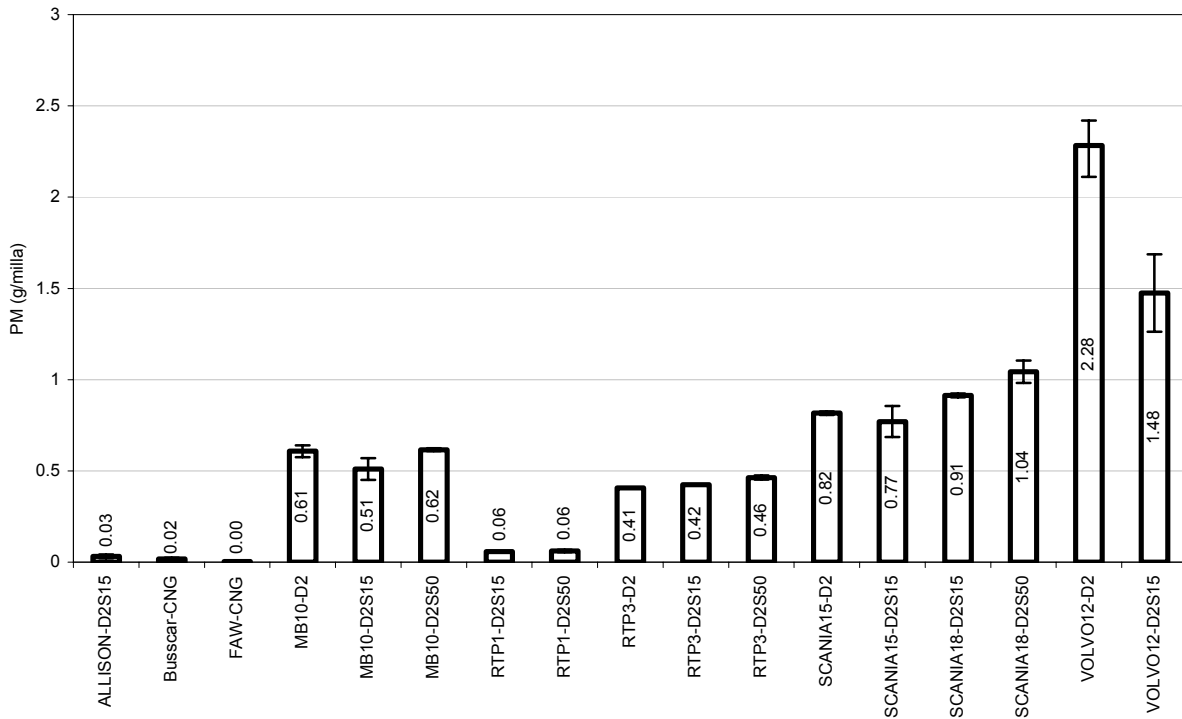


Figura B - 8: Emisiones de partículas en el segmento MX2 del MCS

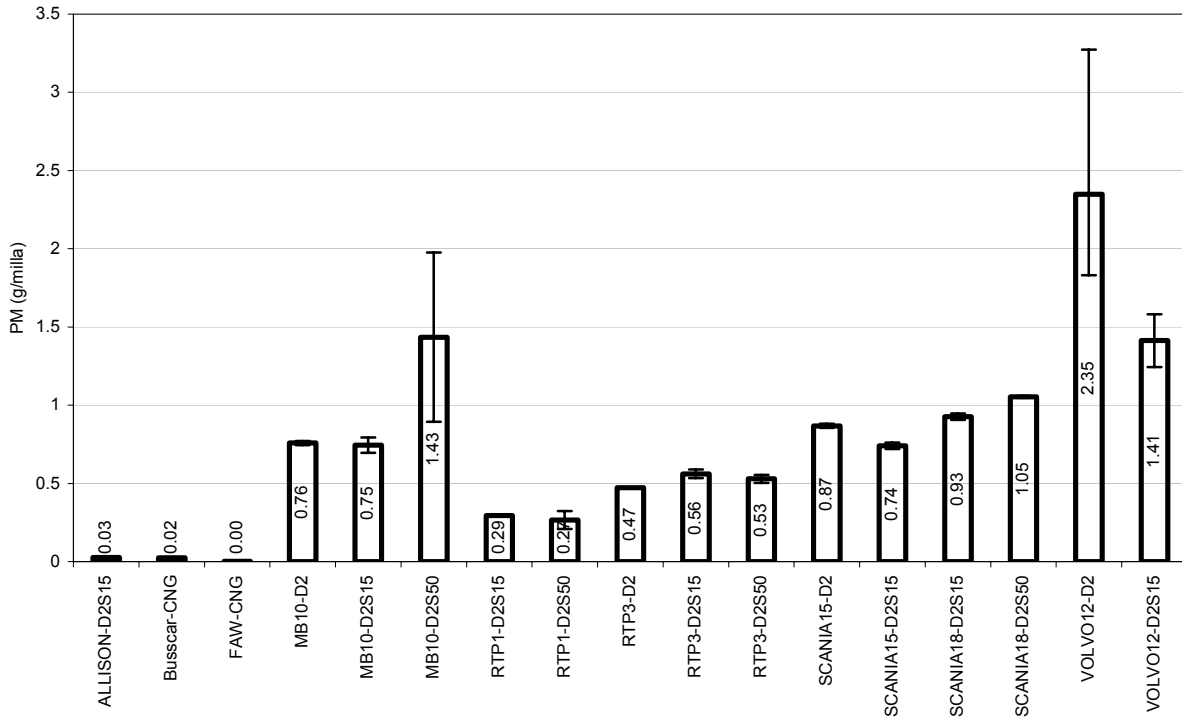


Figura B - 9: Emisiones de partículas en el segmento MX3 del MCS

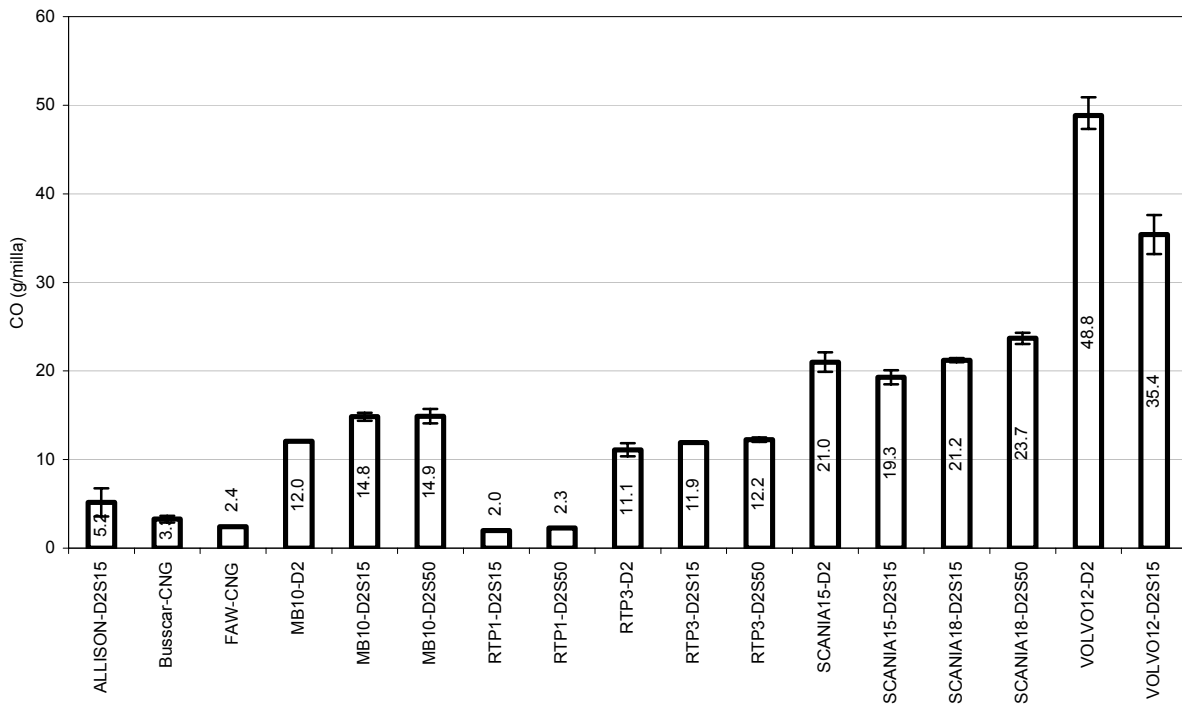


Figura B - 10: Emisiones de monóxido de carbono en el segmento MX1 del MCS

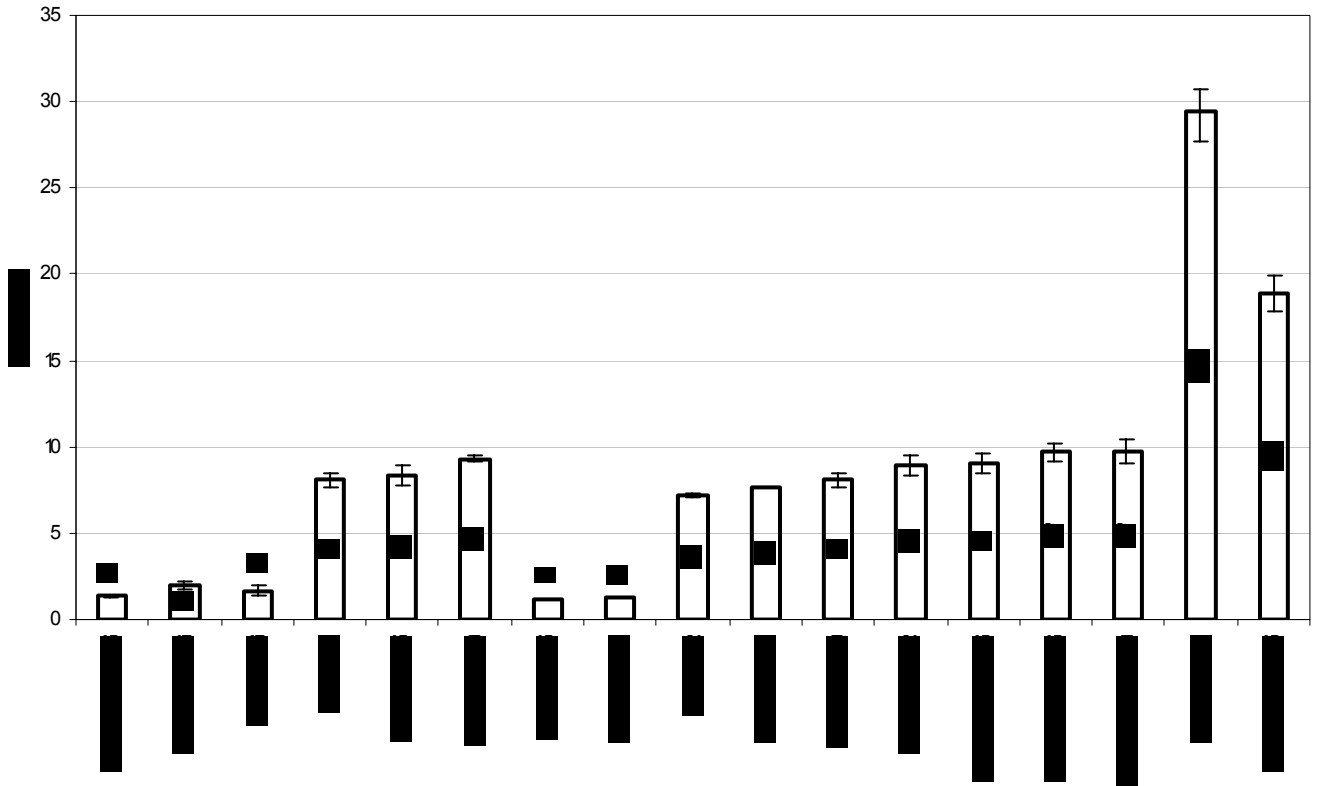


Figura B - 11: Emisiones de monóxido de carbono en el segmento MX2 del MCS

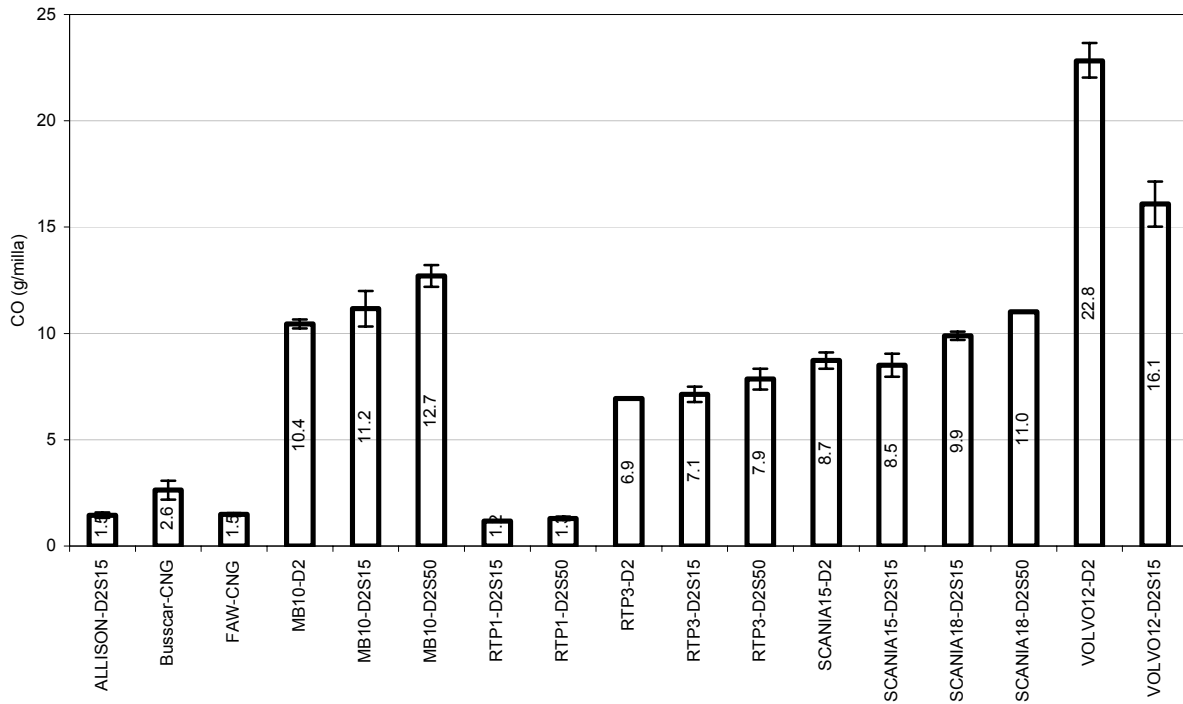


Figura B - 12: Emisiones de monóxido de carbono en el segmento MX3 del MCS

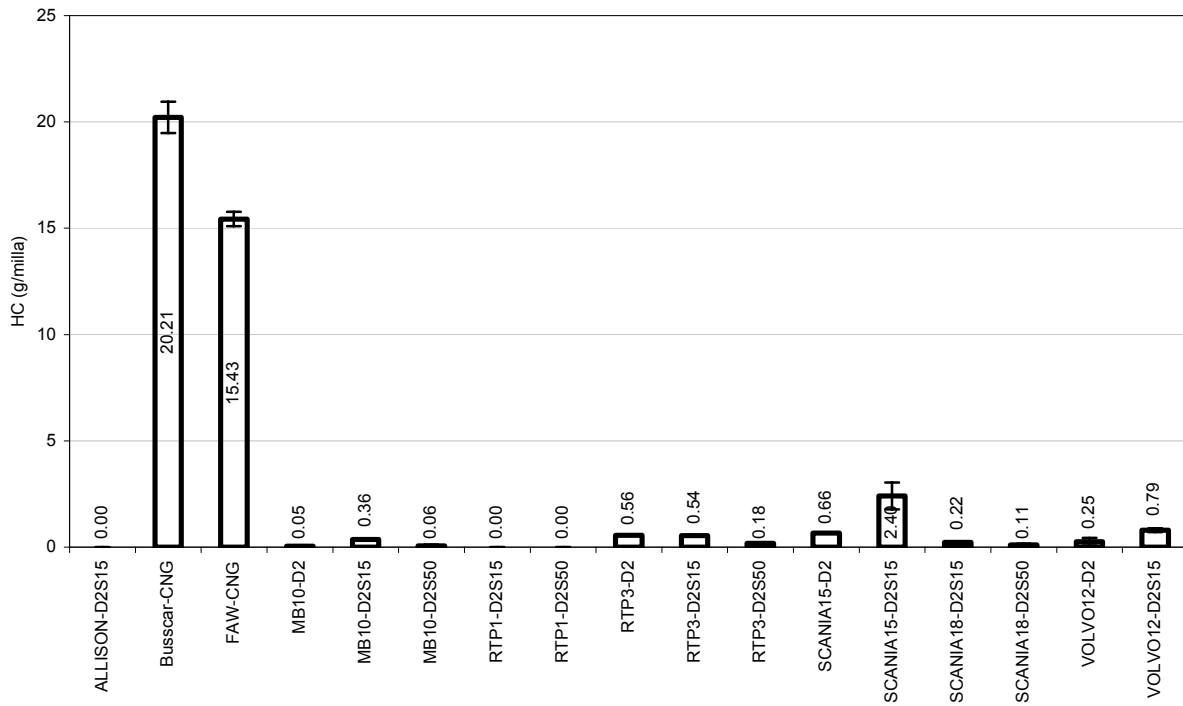


Figura B - 13: Emisiones de hidrocarburos en el segmento MX1 del MCS

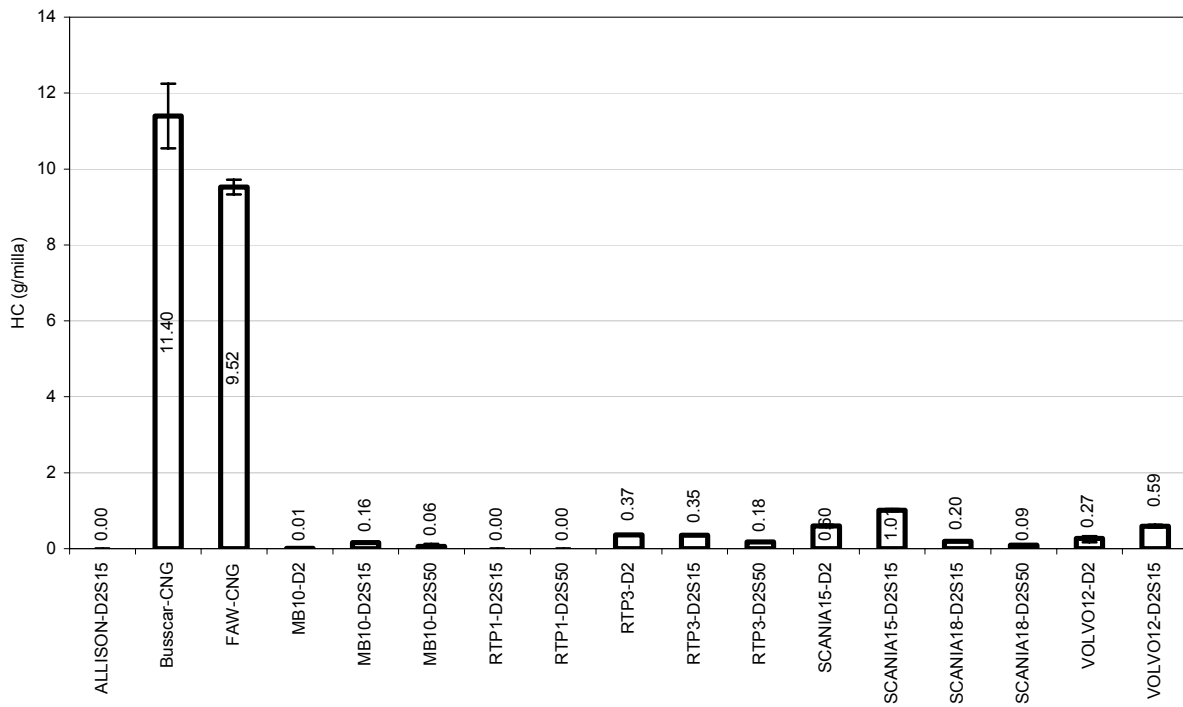


Figura B - 14: Emisiones de hidrocarburos en el segmento MX2 del MCS

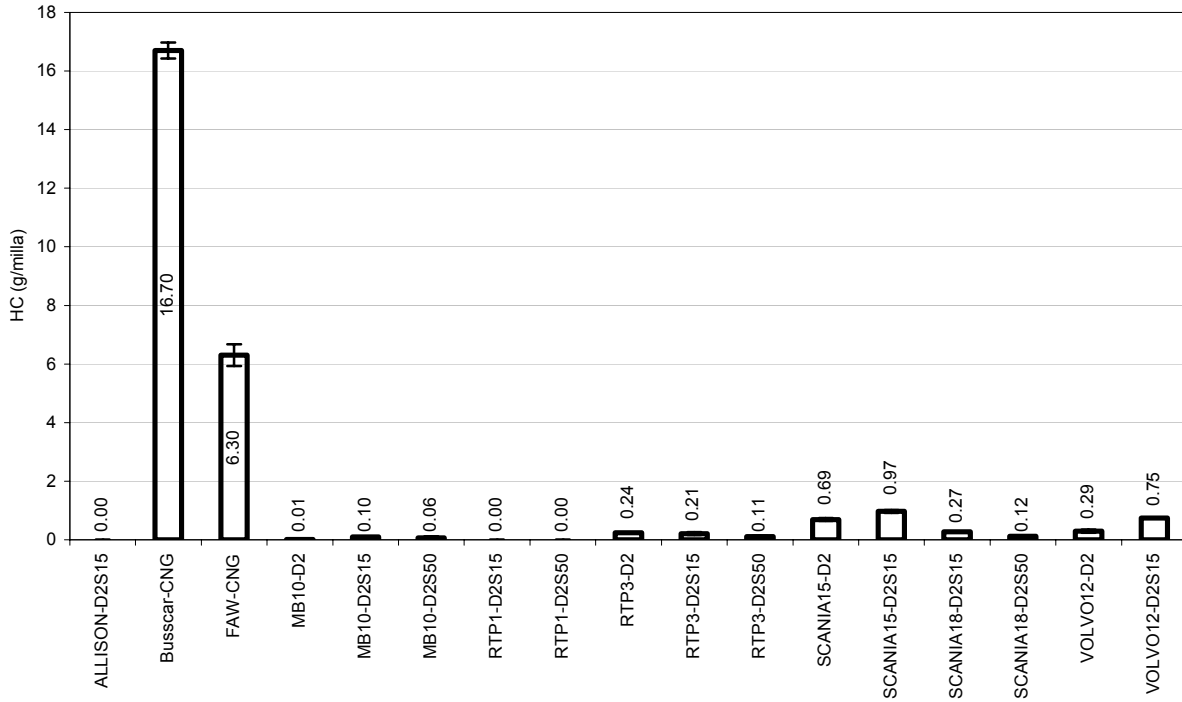


Figura B - 15: Emisiones de hidrocarburos en el segmento MX3 del MCS

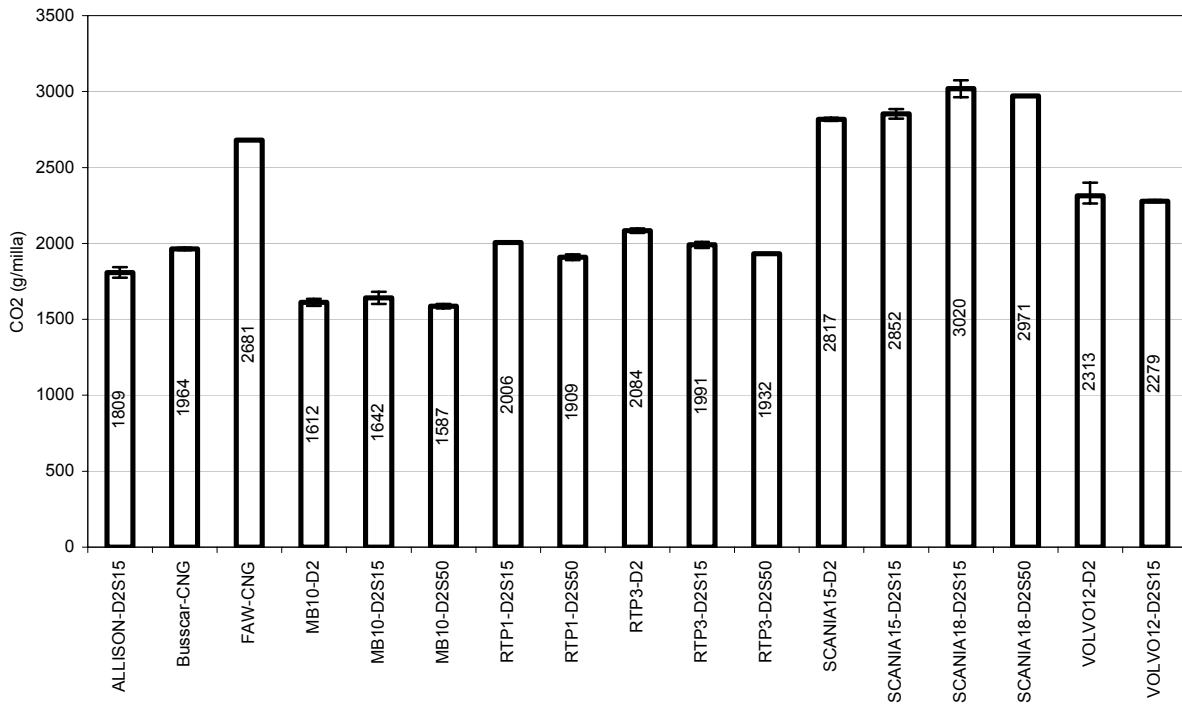


Figura B - 16: Emisiones de dióxido de carbono en el segmento MX1 del MCS

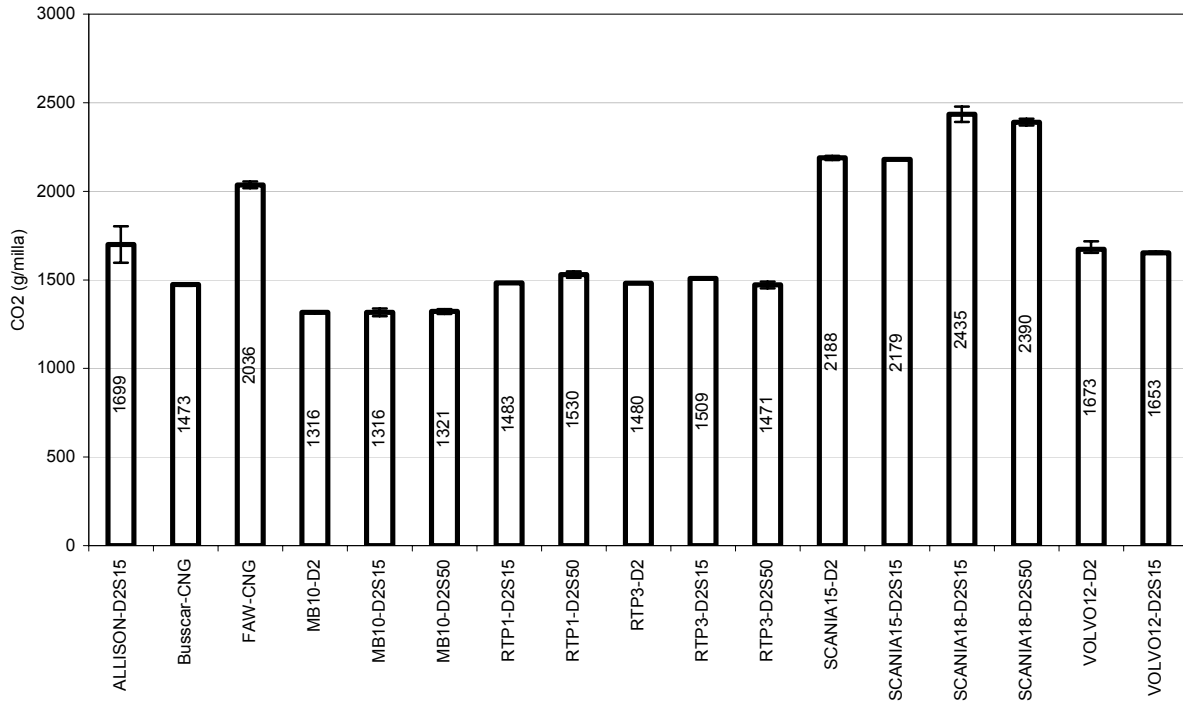


Figura B - 17: Emisiones de dióxido de carbono en el segmento MX2 del MCS

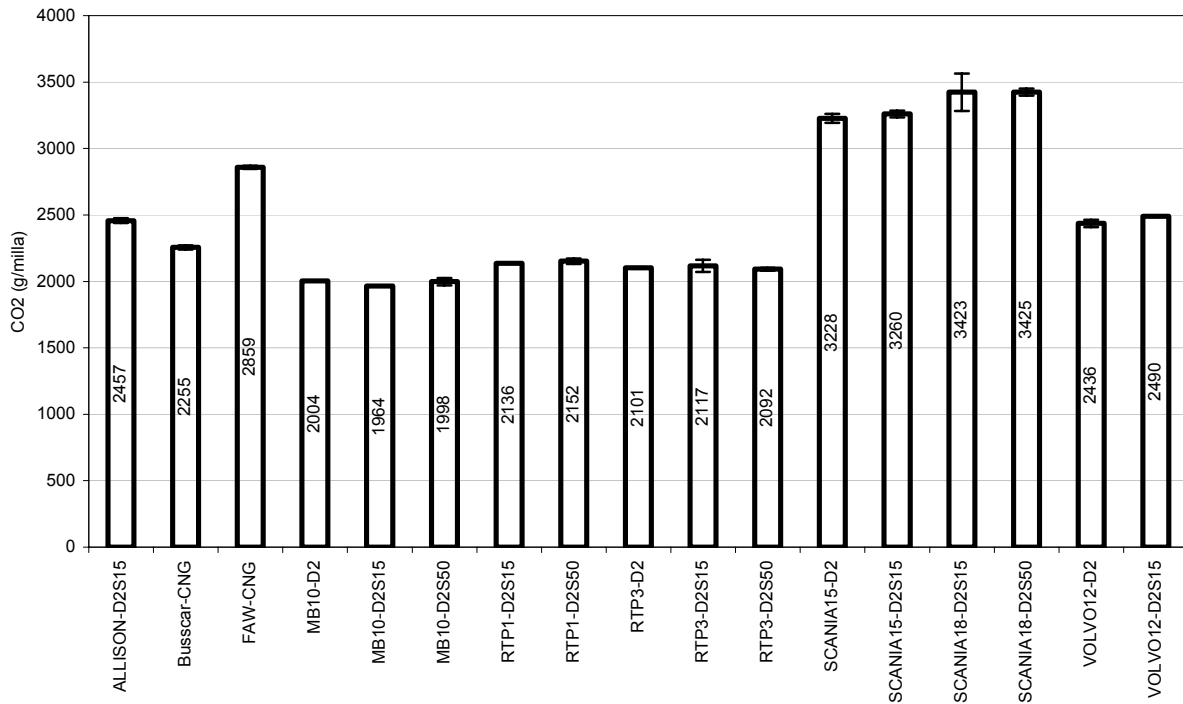


Figura B - 18: Emisiones de dióxido de carbono en el segmento MX3 del MCS

Apéndice C: Datos de Emisiones Continuas

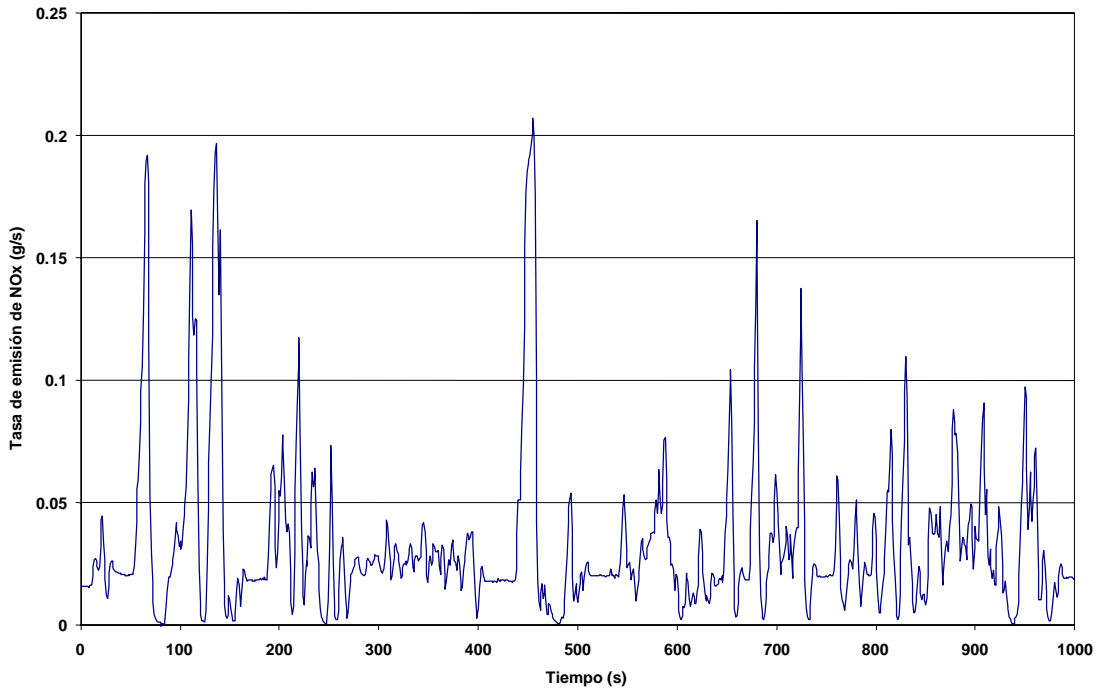


Figura C - 1: Emisiones continuas de NO_x del RTP3 en el segmento MX1 del MCS

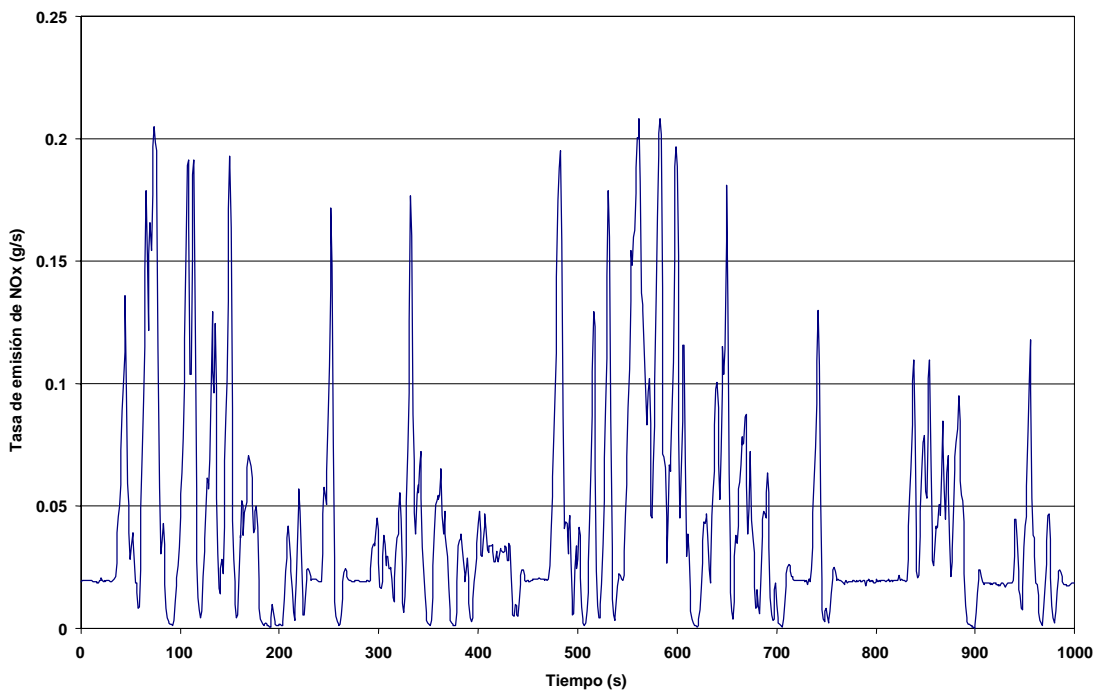


Figura C - 2: Emisiones continuas de NO_x del RTP3 en el segmento MX2 del MCS.

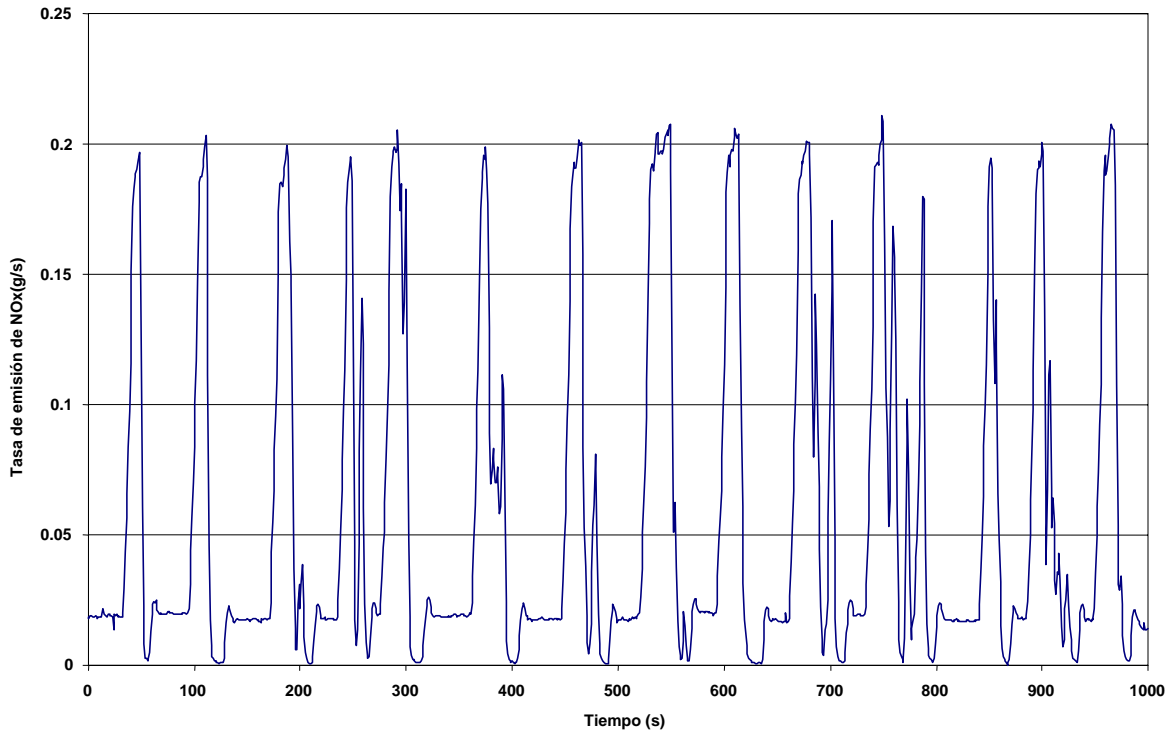


Figura C - 3: Emisiones continuas de NO_x del RTP3 en el segmento MX3 del MCS

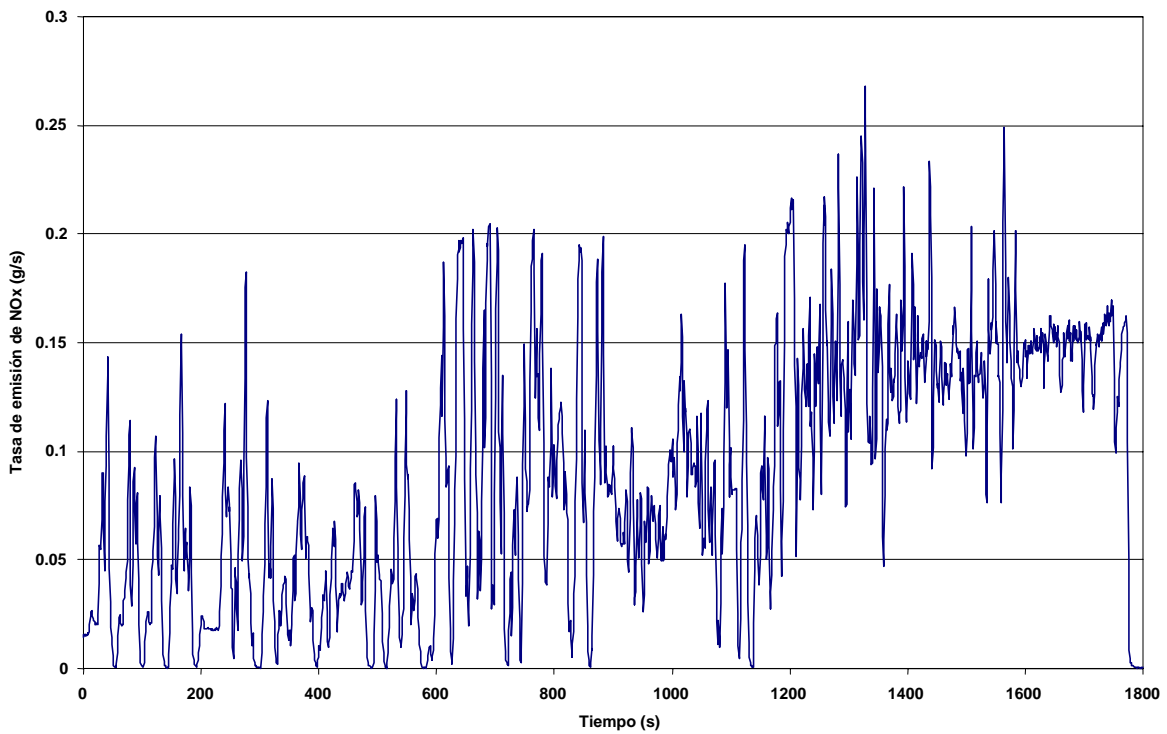


Figura C - 4: Emisiones continuas de NO_x del RTP3 en el ETC

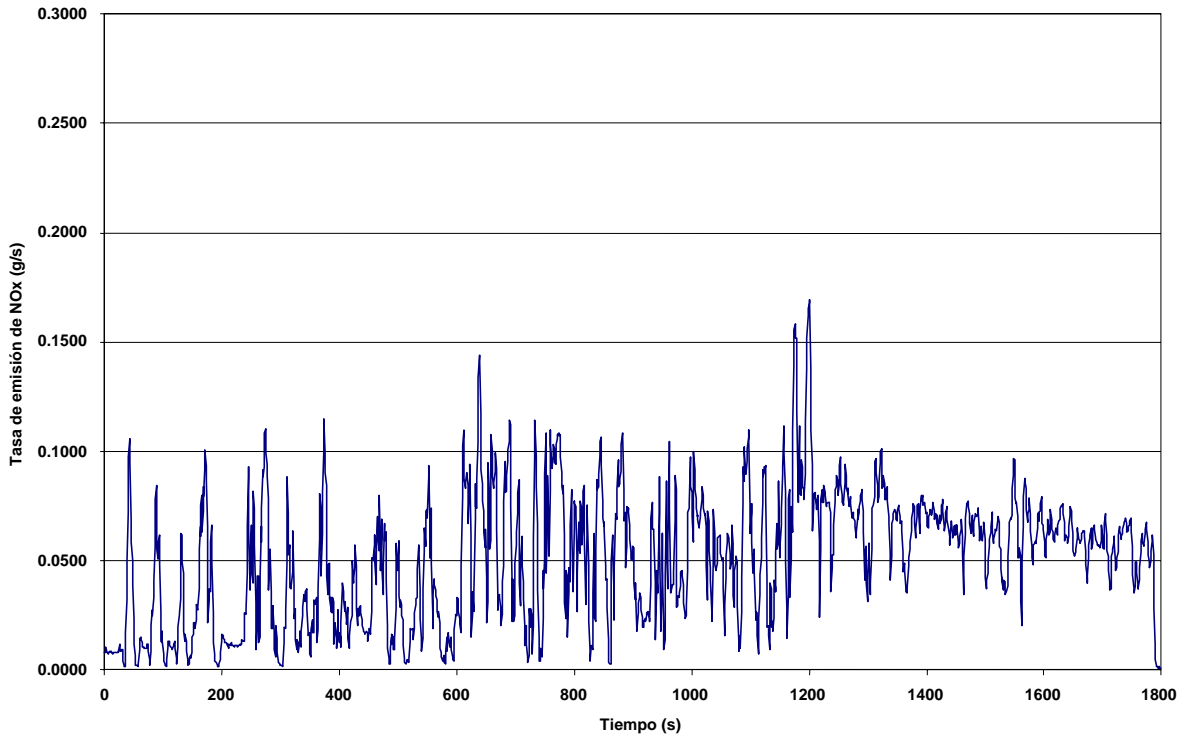


Figura C - 5: Emisiones continuas de NO_x del híbrido ALLISON en el ETC

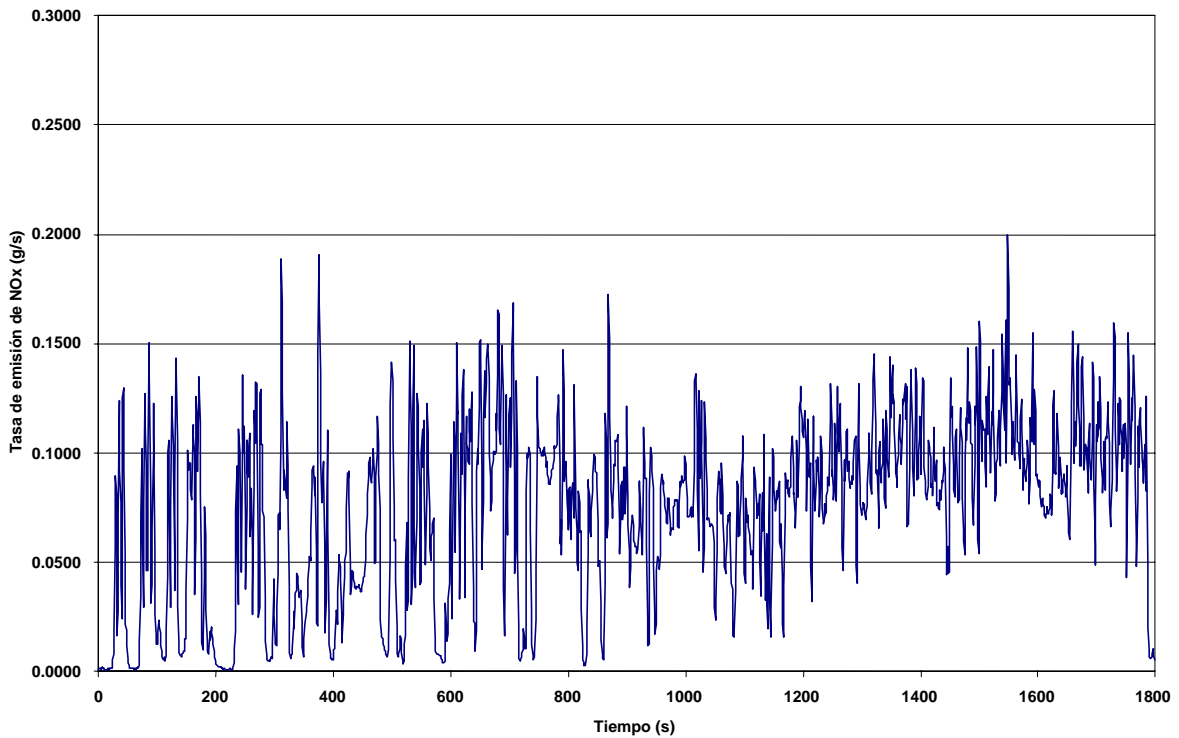


Figura C - 6: Emisiones continuas de NO_x del BUSSCAR GNC en el ETC

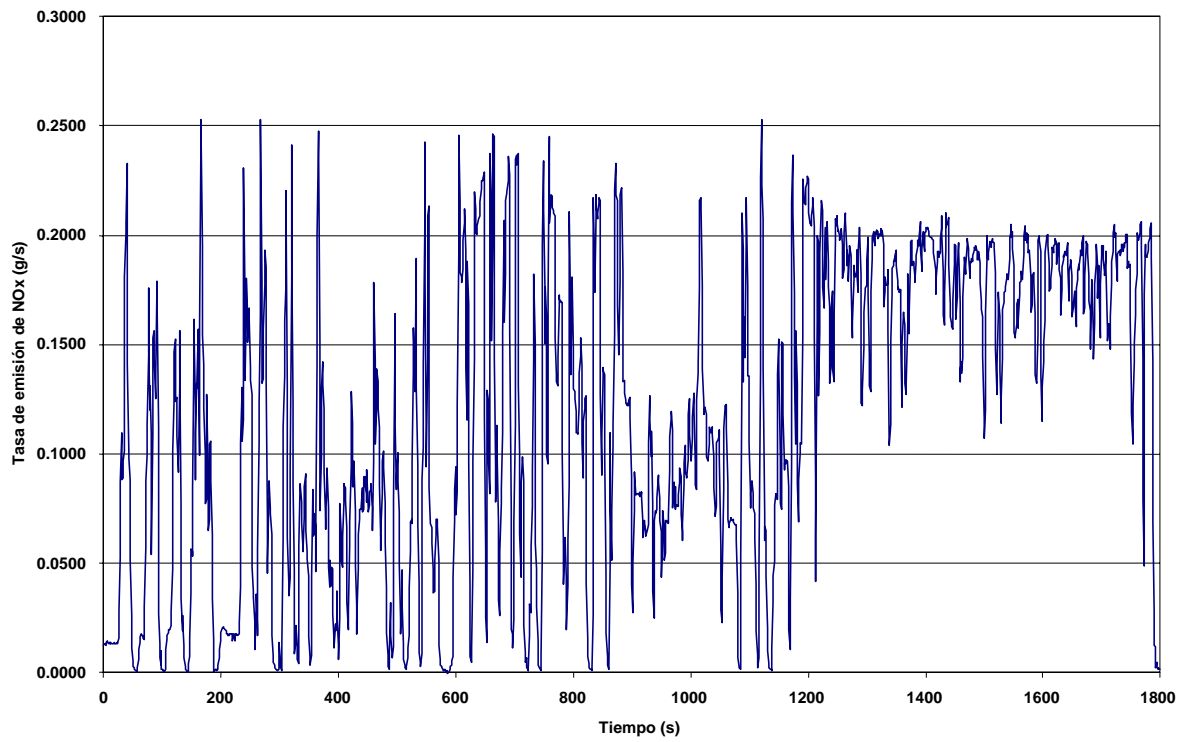


Figura C - 7: Emisiones continuas de NO_x del SCANIA15 en el ETC

Tabla D - 1: Información de los autobuses proporcionada por los armadores

	BUS 1	BUS 2	BUS 3	BUS 4	BUS 5	RTP 1	RTP 3	BUS 6	BUS 7	BUS 8
VEHICULO										
Fabricante	Gillig	Anhui Ankai	Busscar	FAW AMI	Mercedes Benz	Mercedes Benz	Mercedes Benz	Scania	Scania	Volvo
Modelo	Phantom	HFF6110GK50	Urbanuss Plus	CA6160	Boxer	Torino 2002	Torino 2002			Prototype
Combustible	Diesel	GNC	GNC	GNC	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel	Diesel
Tipo	Conventional	Conventional	Conventional	Articulate	Conventional	Conventional	Conventional	Tandem Axle	Articulate	Conventional
Sistema Híbrido	Dual parallel GM - Allison hybrid electric system, with Variable Electric Transmission, Dual Potency Inversor Module and Energy Storage System	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A
Peso Bruto Vehicular (kg)	35,000	10,500	15,760	15,500	N/A	14,000	14,000			16,000
CUERPO										
Fabricante	Gillig	Ankai	Busscar	FAW	Marco Polo	Marco Polo	Marco Polo	N/A	N/A	Volvo
Longitud (mm)	12,200	11,120	11,300	15,986		10,800	10,800			11,000
Ancho (mm)	2,430	2,500	2,500	2,490		2,550	2,550			2,500
Altura Máxima (mm)	2,590	3,040	3,300	3,210	N/A	3,100	3,100			3,220
Altura del Techo (mm)	N/A	2,000	N/A	1,950		980	980			970
Ejes	2	2	2	3	2	2	2	3	3	2
Peso Bruto (kg)	15,880	N/A	N/A	N/A	N/A	8,500	8,500			10,250
Peso máximo con pasajeros (kg)	7,480	5,500	N/A	5,980	N/A	6,600	6,600			6,230
PASAJEROS										
Sentados	40	32	41	35		28	28			32
Parados	70	N/A	N/A	N/A	N/A	60	60			57
Total	110	N/A	N/A	N/A	N/A	88	88	120	160	89

Tabla D - 2 (cont.): Información de los autobuses proporcionada por los armadores

	BUS 1	BUS 2	BUS 3	BUS 4	BUS 5	RTP 1	RTP 3	BUS 6	BUS 7	BUS 8
TRANSMISION										
Fabricante	GM - Allison hybrid electric system	Allison	Spicer	Allison		Allison	Allison			ZF
Modelo	EP 40	B300	ES567B	B400	N/A	B300	B300	ZF4HP590 NBS	ZF5HP602C	ZF5HP552-N
Tipo	Variable electric transmission	Automatic gear box	Synchronized	With retarder	N/A	N/A	N/A			N/A
No. Cambios	Infinite variable	4	7	4	5	5	5	4	5	5
Controlde Cambios	Electronic	Automatic	Manual	Automatic	N/A	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic
Relación de Cambios	Variable	1:1	N/A	1:1	N/A	N/A	N/A			N/A
Relación Diferencial	5.25	6.5	5.29	6.33	N/A	6.17	6.17			2.43
CHASIS										
Modelo	Gillig	HFF6110GK50	OISA	CA6160DK17		OMC	OMC			B7R
MOTOR										
Fabricante	Cummins	Cummins	Cummins	Cummins	Mercedes Benz	Mercedes Benz	Mercedes Benz	Scania	Scania	Volvo
Modelo	ISB	B5.9-230G	BG-230 Plus	C8.3G Plus	OM 924 LA	900	900	DC9 (02) 260	DC9 (03) 300	D7C
Certificación Ambiental	EPA 2002	EPA 2004	EPA 2004	EPA 2004	N/A	EPA 98	EPA 98	EURO III	EURO III	EURO III
Tipo	Turbocharged	Turbocharged		Turbocharged		OM-906-LA	OM-906-LA	Electronic	Electronic	Electronic
No. Cilindros	6	6	6	6		6	6	6	6	6
Potencia máx. (HP @ RPM)	260 @ 2400	230 @ 2800	230 @ 2800	280 @ 2400		230 @ 2300	230 @ 2300	260	300	300 @ 2200
Par máx.(lb/ft @ RPM)	660 @ 1400	500 @ 1600	500 @ 1600	850 @ 1400	N/A	698	698			1270NM @ 1200 RPM
Relación de Compresión	16.5:1	10:1	10.5:1	10:1	N/A	17.4:1	17.4:1	17:1	17:1	19.5:1
Desplazamiento (L)	5.9	5.9	5.9	8.3	N/A	6.37	6.37	9	9	7.3
Inyección	N/A	Electronic	N/A	Electronic		Electronic	Electronic			Electronic
Turbocompresor	Yes	Yes	N/A	Yes		Yes	Yes			Yes
Interenfriador	Yes	N/A	N/A	Cooled with air		Yes	Yes			Yes

	BUS 1	BUS 2	BUS 3	BUS 4	BUS 5	RTP 1	RTP 3	BUS 6	BUS 7	BUS 8
Ubicación	In front of cooling packet	Rear	Rear	Front		In front of radiator	In front of radiator		Rear	Rear
Tanque(s) de Combustible										
Capacidad (L)	378.5	80 L x 6 + 50 L x 2 (580 L water @ 3000 psi)	80 L x 6 (480 L water @ 3600 psi)	90 L x 6 (540 L water @ 3000 psi)	N/A	208	208	400	400	300
RUEDAS										
Numero	6	6	6	10		6	6			6
Tamaño	11.0 R 22.5	10.00 R 20	11 R 22.5	11 R 20		11 R 22.5	11 R 22.5			295 / 80 R 22.5
CONTROL DE EMISIONES										
Si/No	Yes	Yes	Yes	Yes	N/A	Yes	No			N/A
Tipo	Continuously Regenerating Technology	Catalytic Converter	Catalytic Converter	Catalytic Converter	N/A	Continuously Regenerating Technology				N/A
Fabricante	Johnson Matthey	Fleetguard	Donaldson	Fleetguard	N/A	Johnson Matthey				N/A
Modelo	CRT Filter System	3927832	M1110857	3928277	N/A	CRT Filter System				N/A