icct
THE INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION

CDMX
CIUDAD DE MÉXICO

REPORTE DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE VEHÍCULOS DEL METROBÚS

CIUDAD DE MÉXICO, A 17 DE NOVIEMBRE DE 2017

DIRECTORIO

CDMX

Miguel Ángel Mancera Espinosa
JEFE DE GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Tanya Müller García
SECRETARIA DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DE LA CIUDAD DE MÉXICO

Beatriz Cárdenas González
DIRECTORA GENERAL DE GESTIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE

Guillermo Calderón Aguilera
DIRECTOR GENERAL DE METROBÚS

ICCT

Katherine Blumberg
SENIOR FELLOW/ REGIONAL LEAD DEL CONSEJO INTERNACIONAL DE TRANSPORTE LIMPIO

RESEÑA

Katherine Blumberg
Senior Fellow / Regional Lead

Katherine Blumberg tiene dos maestrías de la Universidad de Berkeley, California; una maestría en Energía y Recursos y otra en Ingeniería con un enfoque en la Calidad del Aire. La maestra Blumberg ha trabajado en el Consejo Internacional en Energía Limpia (ICCT por sus siglas en inglés) desde su creación, liderando el desarrollo de estrategias para el Programa de Aire Limpio (Clean Air Program) principalmente en México, China e India. Actualmente, su trabajo se enfoca a las áreas de regulación de combustible y tecnología vehicular en México, tanto apoyando en el desarrollo de estándares de economía de combustible de vehículos pesados y ligeros vs Gases de Efecto Invernadero como en la adopción de estándares más rigurosos en los límites de emisión de contaminantes vehiculares. Además, su trabajo actual promueve que exista una mejor integración entre el clima, las ciencias de la salud y los esfuerzos en la implementación de políticas para eliminar los modificadores climáticos que no están relacionados con el CO2 (como el carbono negro y los gases fluorados) del sector del transporte. Por otra parte, su trabajo también promueve que se generen hojas de ruta (roadmaps) del transporte para reducir dramáticamente la emisión tanto de los contaminantes de efecto invernadero como de los contaminantes convencionales.

ÍNDICE

INTRODUCCIÓN 4
SELECCIÓN DE VEHÍCULOS..... 5
EQUIPOS Y PROTOCOLO DE MEDICIÓN 8
ANÁLISIS DE RESULTADOS..... 10
BENEFICIOS DE LA ADOPCIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE EMISIÓN EURO VI Y EPA 10 O POSTERIORES..... 17
CONCLUSIONES..... 19
RESUMEN EJECUTIVO..... 25

INTRODUCCIÓN

Con la inclusión de la nueva Línea 7 (L7), a la red del sistema de transporte público Metrobús (MB), entrarán en servicio 90 autobuses Doble Piso Enviro 500 que circularán 15 de los 30 kilómetros de la línea.

Los autobuses en mención son fabricados por la compañía Alexander Dennis. Estos vehículos son impulsados por un motor Cummins ISL 8.9 y cuentan con un sistema de control de emisiones de última tecnología conformado por un sistema pasivo de reducción de partículas (conformado por un DOC y Filtro de Partículas) y un catalizador de reducción selectiva (SCR, por sus siglas en inglés). El motor Cummins ISL 8.9 y el sistema de control de emisiones cuentan con una certificación EPA 16 otorgada por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA, por sus siglas en inglés). La certificación EPA 16 es el estándar de emisiones más reciente a nivel internacional para vehículos de carga a diésel. Esta certificación, además de establecer límites de emisión para contaminantes criterio de EPA 10 (los cuales son equivalentes a EURO VI), establece límites máximos permisibles de emisión para Gases de Efecto Invernadero (GEI).

La Normatividad Mexicana (NOM-045-SEMARNAT-2006) establecía límites máximos permisibles de emisión de gases de escape a los que se podía dar cumplimiento con los estándares internacionales EURO IV y EPA 04, lo cual ha retrasado la introducción de nuevas tecnologías como los vehículos EURO VI y/o EPA 16 en nuestro país. No obstante, el gobierno de la Ciudad de la Ciudad de México ha impulsado la introducción de vehículos que cumplen los estándares de emisiones internacionales más actuales para dar servicio en la Línea 7 del sistema de transporte público MB. La introducción de estos vehículos contribuirá a reducir las emisiones de gases y partículas contaminantes así como de gases y compuestos de efecto invernadero y con ello salvaguardar la salud de los habitantes de la ciudad.

Con la intención de evaluar las emisiones de las nuevas unidades Enviro 500, Secretaría de Medio Ambiente (SEDEMA) de la Ciudad de México a través de la la Dirección de Programas de Transporte Sustentable y Fuentes Móviles (DPTSyFM) de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire (DGGCA), en colaboración con el Consejo Internacional sobre Transporte Limpio (ICCT, por sus siglas en inglés) y la Dirección Técnica Operativa de Metrobús, llevaron a

cabo un estudio corto para realizar la medición de emisiones a 6 de estos vehículos.

Para poder realizar una comparación de las emisiones de estos vehículos con otros de la flota de MB, se efectuó además la medición de 5 vehículos con diversos estándares de emisión y tecnologías de reducción de emisiones contaminantes que prestan servicio en diferentes líneas del sistema MB.

Actualmente, la NOM-045-SEMARNAT-2006 únicamente establece límites para coeficiente de absorción de luz y porcentaje de opacidad y no existe aún en la legislación mexicana el establecimiento de límites de emisión de HC, CO, CO_2, ni número de partículas para vehículos en circulación que utilizan diésel como combustible. Por lo anterior, después de evaluar diferentes alternativas, se definió que la mejor forma de evaluar el desempeño de los vehículos Enviro 500 consistiría en realizar una comparación entre diversas tecnologías utilizadas por los vehículos de MB. Para ello, se realizó una prueba de emisiones a 6 vehículos EPA 16; tres vehículos EURO V (Diésel, Hibrido y Gas Natural Comprimido); un vehículo EURO V-EEV (Enhanced Environmental Vehicle) y dos vehículos EURO IV.

Debido a que las unidades Enviro 500 se encuentran gobernadas a 1,200 RPM (Revoluciones Por Minuto), las pruebas de todos los vehículos en este estudio se realizaron a 1,200 RPM.

SELECCIÓN DE VEHÍCULOS

Los vehículos fueron seleccionados con base en el estándar de emisiones (EPA 16, EURO IV, EURO V, EURO V-EEV) y la disponibilidad de los mismos para realizar las pruebas al momento de realizar este estudio. Con el objetivo de evitar afectaciones en la prestación del servicio, la Dirección Técnica Operativa de Metrobús realizó la selección de vehículos procurando incluir unidades con diferentes estándares de emisión. Para las mediciones se consideraron seis vehículos EPA 16 a razón de que estos se encontraban disponibles en el Módulo de MB en el que se realizaron las mediciones y con el propósito de contar con más datos de esta nueva tecnología. El vehículo Híbrido (555) fue evaluado con su motor diésel en operación.

En la Tabla 1 se muestran los vehículos evaluados y sus principales características.

Tabla 1. Relación de los vehículos evaluados.

Número económico	Marca	Tipo	Estándar de emisiones	Combustible
808	Alexander Dennis	Doble Piso	**EPA 16**	Diésel
817	Alexander Dennis	Doble Piso	**EPA 16**	Diésel
818	Alexander Dennis	Doble Piso	**EPA 16**	Diésel
902	Alexander Dennis	Doble Piso	**EPA 16**	Diésel
917	Alexander Dennis	Doble Piso	**EPA 16**	Diésel
918	Alexander Dennis	Doble Piso	**EPA 16**	Diésel
518	Volvo	12 metros	**EURO V- EEV**	Diésel
463	Mercedes Benz	12 metros	**EURO V**	Diésel
555	Volvo	12 metros	**EURO V**	Híbrido (Diésel + Eléctrico)
Prot 29	Mercedes Benz	12 metros	**EURO V**	Gas Natural Comprimido
269	Volvo	Articulado	**EURO IV**	Diésel
265	Volvo	Articulado	**EURO IV**	Diésel

Los estándares de emisión, tanto europeos como estadounidenses, con el paso de los años, han sido ajustados con la intención de reducir las emisiones contaminantes provenientes de las fuentes móviles. Las normativas EURO y EPA han puesto especial énfasis en la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado (PM, por sus siglas en inglés). Como se observa en la Tabla 2. los límites de emisión para PM y NOx han disminuido significativamente a través de los años. En cuanto a la normativa EPA16, los niveles de emisión para NOx y PM se mantienen iguales a los establecidos en EPA10 sin embargo esta nueva normatividad incluye límites de emisión para Gases de Efecto Invernadero (GEI).

Tabla 2. Límites de emisión establecidos en las normativas Estadounidense y Europea

	NORMATIVIDAD ESTADOUNIDENSE				
	EPA 98	EPA 04	EPA 07	EPA 10	EPA 16*
NOx	5.4 g/Kwh	2.7 g/Kwh	1.61 g/Kwh	0.27 g/Kwh	0.27 g/Kwh
PM	0.13 g/Kwh	0.13 g/Kwh	0.013 g/Kwh	0.013 g/Kwh	0.013 g/Kwh
	NORMATIVIDAD EUROPEA				
	EURO III	EURO IV	EURO V	EURO VI	
NOx	5 g/Kwh	3.5 g/Kwh	2 g/Kwh	0.4 g/Kwh	
PM	0.16 g/Kwh	0.03 g/Kwh	0.03 g/Kwh	0.01/Kwh	

* El estándar EPA 16 establece los mismos límites de emisión de NOx y PM que el estándar EPA 10 y además establece límites para CO_2 (555 g/bhp-hr), CH_4 (0.10 g/bhp-hr) y para N_2O (0. 10 g/bhp-hr)

Para poder cumplir con los límites establecidos en las normativas europeas y estadounidenses, los fabricantes han optado por realizar modificaciones en los motores y/o utilizar diversos sistemas de post tratamiento de gases de escape. En la Tabla 3 se presentan los tipos de tecnología de control de emisiones más comúnmente utilizados de acuerdo al estándar de cumplimiento.

Tabla 3. Sistema de post-tratamiento de gases de escape empleados para dar cumplimiento a las normativas Estadounidense y Europea

	NORMATIVIDAD ESTADOUNIDENSE			
	EPA 98	EPA 04	EPA 07	EPA 10
Sistemas de Post tratamiento de gases de escape	No requiere sistemas de post tratamiento	* DOC	* DOC *Filtro de Partículas Diésel (DPF)	* Sistema SCR * DOC * DPF
	NORMATIVIDAD EUROPEA			
	EURO III	EURO IV	EURO V	EURO VI
Sistemas de Post tratamiento de gases de escape	No requiere sistemas de post tratamiento	* Sistema SCR * DOC	* Sistema SCR * DOC	* Sistema SCR * DOC * DPF

En la Figura 1 se muestra la imagen de la distribución de los sistemas de control de emisiones con los que se encuentran equipados los vehículos Doble Piso Enviro 500.

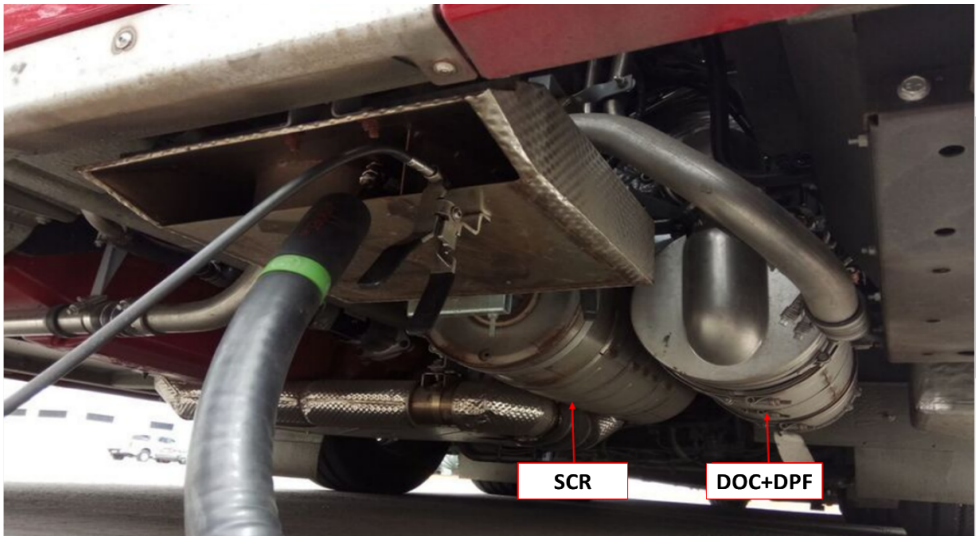


Figura 1. Distribución de los sistemas de tratamiento de gases de escape (SCR-DPF) de los vehículos Enviro 500

EQUIPOS Y PROTOCOLO DE MEDICIÓN

Para realizar la medición de emisiones contaminantes se utilizaron los equipos para medición de gases y nanopartículas, (MAHA, Met 6.3[1] y Testo, NanoMet 3[2] respectivamente), propiedad de la SEDEMA**.** Las especificaciones técnicas de estos equipos se incluyen en el **Anexo I.**

Las pruebas se llevaron a cabo mediante el protocolo empleado por la DPTSyFM para analizar emisiones de nanopartículas y de gases en escape de vehículos a diésel en prueba estática. Este protocolo es una modificación del protocolo utilizado por el Centro Mario Molina para la evaluación, de dispositivos de reducción de emisiones contaminantes, en prueba estática[3]. El protocolo empleado por la DPTSyFM se incluye en el **Anexo I.** Este protocolo tiene una duración total de 4 minutos y se compone de 4 fases:

- Fase 1: se mantiene el vehículo en modo ralentí[4] durante 60 segundos;

[1] El equipo MAHA 6.3 es un analizador de gases de corriente parcial para el análisis de los componentes gaseosos de una muestra de aire proveniente del escape de los vehículos.
[2] El equipo NanoMet3 es un instrumento con el que se determina el número de partículas nanométricas de tamaño entre 0.01 hasta 0.70 micrómetros en un rango de 1,000 hasta 300 millones de partículas por centímetro cúbico (p/cm3).
[3] Centro Mario Molina (CMM) /2015). *Evaluación del Convertidor Catalítico CANAMMEX en vehículos a diésel Serie 60000 / Modelo CA-DI- 60011.*
[4] El ralentí es el régimen mínimo de revoluciones por minuto que requiere un motor de combustión interna para permanecer en funcionamiento cuando no es acelerado.

- Fase 2: se acelera el vehículo hasta llegar a corte de gobernador (RPM máximas del vehículo) y se mantiene en ese punto por 60 segundos;
- Fase 3: se retira el pie del pedal de aceleración y se mantiene el vehículos en ralentí por 60 segundos más; y
- Fase 4: se realiza una última aceleración a corte gobernador y se mantienen las RPM máximas, nuevamente, por 60 segundos.

Como se muestra en la Figura 2, cada prueba cuenta con cuatro fases: dos fases en ralentí y dos fases de aceleración a máximas revoluciones[5].

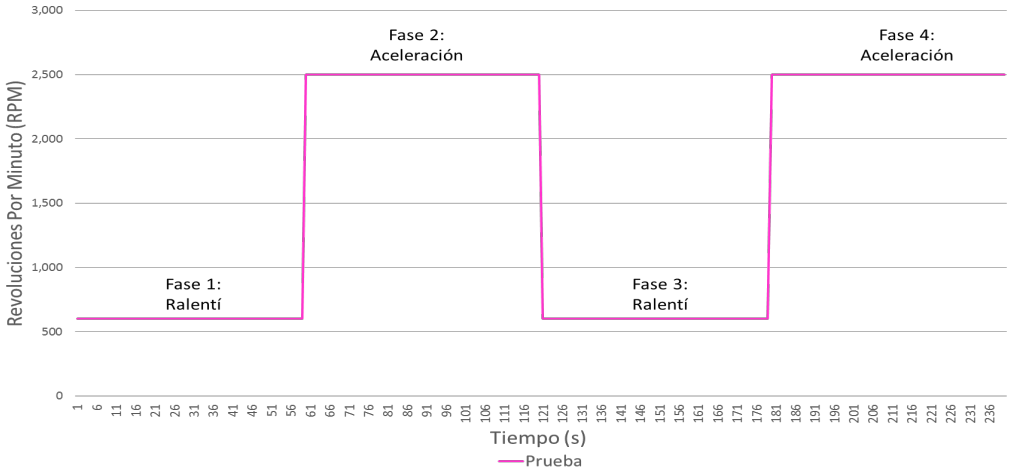


Figura 2. Representación de las cuatro fases de cada prueba

Debido a que los vehículos Doble Piso Enviro 500 se encuentran gobernados a 1,200 RPM, se realizó una prueba a cada una de las unidades a un límite máximo de 1,200 RPM durante las fases de aceleración. Todos los vehículos fueron evaluados bajo las mismas condiciones y al mismo límite de aceleración máxima (1,200 RPM) por lo cual la diferencia en las emisiones depende de las configuraciones mecánicas y de los sistemas de control de emisión de cada uno de los vehículos.

Si bien para poder calcular factores de emisión resulta conveniente realizar pruebas en condiciones reales de circulación con Sistemas Portátiles de Medición de Emisiones (PEMS, por sus siglas en inglés), el protocolo utilizado en este estudio nos da un indicativo fiable del desempeño de los sistemas de control de emisiones de los vehículos evaluados bajo condiciones determinadas. Cabe

[5] Las máximas RPM varían entre cada vehículo, cada fabricante instala y configura el gobernador de acuerdo con los parámetros que ellos o el usuario determine

precisar que las pruebas realizadas no tienen la finalidad de confirmar el cumplimiento de los estándares de emisión de cada uno de los vehículos, para ello se requiere efectuar pruebas en condiciones controladas con equipos de medición específicos así como en dinamómetro.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

En la Tabla 4 se muestran los valores promedio de los contaminantes evaluados de cada uno de los vehículos.

Tabla 4 Resultados de las emisiones de gases contaminantes y nanopartículas

# económico / estándar de cumplimiento	Temperatura Aceite	CO (%)	HC (ppm)	NO (ppm)	NO2 (ppm)	NOx (ppm)	Valor K (1/m)	Opacidad (%)	Número de partículas (p/cm3)
808 EPA 16	87°C	0.02	8	181	89	270	0.006	0.02	2.20E+04
817 EPA 16	85°C	0.01	6	128	107	235	0.01	0.5	5.57E+04
818 EPA 16	90°C	0.004	3	154	53	206	0.01	0.4	6.55E+04
902 EPA 16	85°C	0.01	9	272	64	336	0.04	0.8	5.84E+04
917 EPA 16	82°C	0.01	4	152	75	227	0.01	0.3	5.01E+04
918 EPA 16	90°C	0.01	8	179	88	268	0.01	0.3	6.32E+04
463 EURO V	91°C	0.02	4	366	28	294	0.14	5.8	6.32E+06
555 EURO V-HIBRIDO	87°C	0.04	24	369	56	425	0.25	10.1	1.80E+07
Prot 29 EURO V –GNC	84°C	0.01	17	404	265	668	0.2	8.3	1.68E+06
518 EURO V- EEV	80°C	0.01	7	256	133	378	0.2	8.3	9.70E+06
265 EURO IV	81°C	0.02	13	859	103	962	0.41	16.1	7.11E+06
269 EURO IV	82°C	0.02	18	942	112	1,054	0.57	12.5	1.45E+07

*Temperatura de aceite: La temperatura de aceite indica el valor registrado por el equipo para emisiones de gases (Maha, Met 6.3) al inicio de cada prueba.

La Tabla 4 muestra que los resultados de opacidad y coeficiente de absorción de luz de los vehículos EPA son valores inferiores a 0.01 m^{-1} y 1%[6] respectivamente. Los vehículos con los porcentajes de opacidad más elevados fueron las unidades 265 y 269 (ambos EURO IV) con 16.1 y 12.5 % respectivamente, seguidos de la unidad 555 (EURO V-HÍBRIDO) con 10.5%.

Es importante hacer mención que el protocolo de prueba empleado no ofrece datos determinantes en cuando a la emisión de CO_2 debido a que la potencia del vehículo, ciclo de manejo, velocidad, aceleración, capacidad de carga/pasajeros, rendimiento de combustible y tamaño del motor tienen un impacto relevante en las emisiones de CO_2. Por lo anterior, para poder realizar una comparación de este contaminante en particular entre los vehículos, se requeriría efectuar pruebas en condiciones reales de conducción con equipos portátiles de medición de emisiones o en su defecto en instalaciones que cuenten con dinamómetros. Por este motivo el estudio no contempla resultados de CO_2.

En la Tabla 4 se observa que los vehículos que presentaron el valor promedio de emisión más alto de NOx (NO+NO2) fueron los vehículos 265 y 269 cuyo estándar de emisión es EURO IV. También, se aprecia que los niveles de emisión de NOx de todos los vehículos EPA 16 y de los Vehículos EURO V y EURO V-EEV se encuentran por debajo de las 400 ppm, mientras que el resto de los vehículos superan este valor.

Al comparar un vehículo EPA 16 (902) con un vehículo EURO IV (265) con Pesos Brutos Vehiculares (PBV) de 25,500 y 30,000 kilogramos respectivamente, podemos observar que los niveles de emisión de NOx, del vehículo EURO IV, son significativamente superiores durante toda la prueba, tal como se muestra en la Figura 3.

[6] La NOM-045-SEMARNAT-2006 establece como límites máximos 2.5 m-1 y 65.87%, de coeficiente de absorción de luz y opacidad respectivamente, para los vehículos en circulación equipados con motor diésel con PBV mayor a 3,785 kg y año modelo 1991 y posteriores

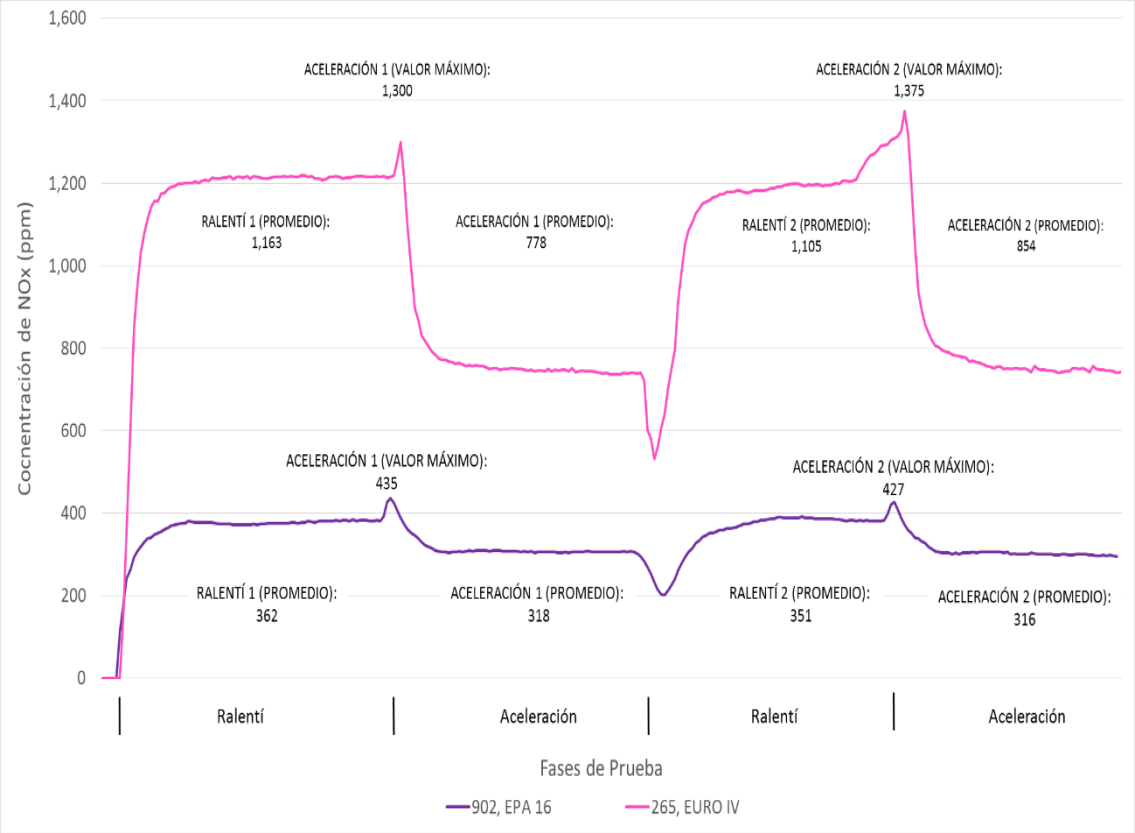


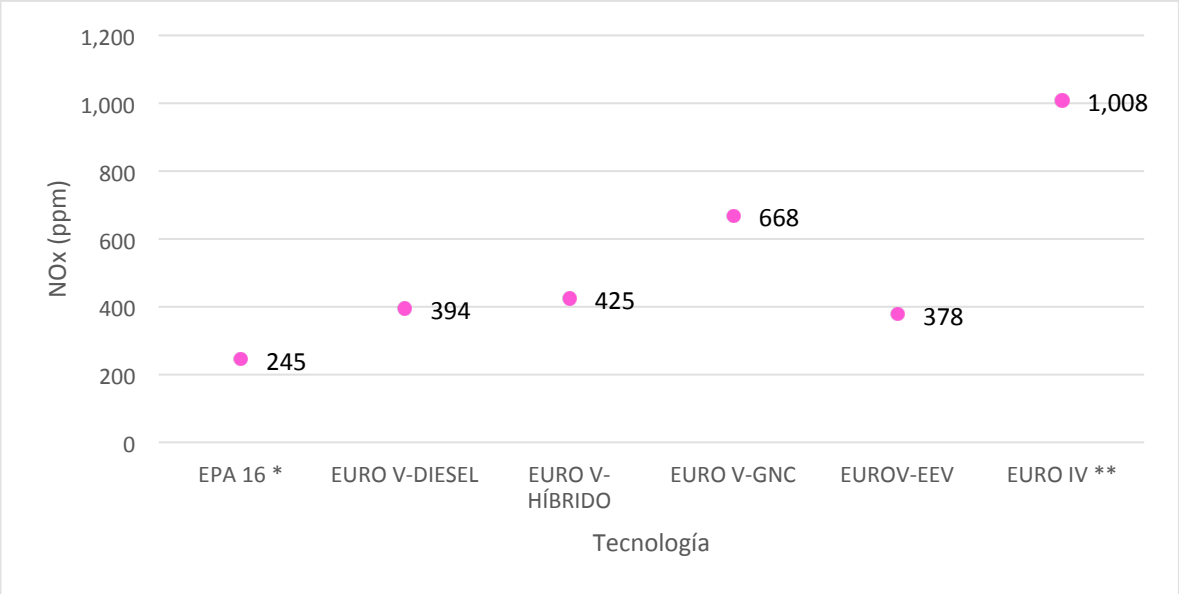
Figura 3 Comparativa de emisión de emisiones de NOx de un vehículo EPA 16 y un vehículo EURO IV

Al contar con un diferente número de vehículos evaluados de cada una de las tecnologías y con la finalidad de realizar una comparación entre tecnologías, se calcularon los valores promedio y desviación estándar de las diferentes pruebas de emisión de los seis vehículos EPA 16 y de los dos vehículos EURO IV, como se muestra en la Tabla 5.

Tabla 5 Promedio, desviación estándar y mediana de los resultados de los vehículos EPA 16 y EURO IV

# económico / estándar de cumplimiento	Temperatura Aceite	CO (%)	CO2 (%)	CO+CO2 (%)	HC (ppm)	O2 (%)	Lambda (%)	NO (ppm)	NO2 (ppm)	NOx (ppm)	Valor K (1/m)	Opacidad (%)	Número de Partículas (p/cm3)
808 EPA 16	87°C	0.02	4.58	4.60	8	14	3.06	181	88	270	0.006	0.02	2.20E+04
817 EPA 16	85°C	0.01	2.69	2.69	6	17	3.64	128	107	235	0.01	0.50	5.57E+04
818 EPA 16	90°C	0.004	2.73	2.73	3	17	3.55	154	52	206	0.01	0.40	6.55E+04
902 EPA 16	85°C	0.01	255	2.56	9	17	3.70	272	64	336	0.04	0.80	5.84E+04
917 EPA 16	82°C	0.01	2.75	2.76	4	16	3.40	152	75	227	0.01	0.30	5.01E+04
918 EPA 16	90°C	0.01	2.82	2.83	8	16	3.47	179	88	268	0.01	0.30	6.32E+04
PROMEDIO	--	**0.01**	**3.15**	**3.16**	**6.24**	**15.87**	**3.45**	**169**	**76**	**245**	**0.01**	**0.37**	**5.25E+04**
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	--	**0.01**	**2.02**	**2.02**	**3.39**	**3.11**	**0.70**	**74**	**25**	**88**	**0.01**	**0.27**	**1.59E+04**
265 EURO IV	81°C	0.02	2.85	2.87	13	17	3.08	859	103	962	0.41	16.10	7.11E+06
269 EURO IV	82°C	0.02	2.43	2.45	18	17	3.91	942	112	1,054	0.57	12.50	1.45E+07
PROMEDIO	--	**0.02**	**2.64**	**2.66**	**15.89**	**16.92**	**3.50**	**900**	**107**	**1,007**	**0.49**	**14.30**	**1.08E+07**
DESVIACIÓN ESTÁNDAR	--	**0.00**	**0.30**	**0.29**	**3.66**	**0.36**	**0.59**	**58**	**6.44**	**65**	**0.12**	**2.55**	**5.20E+06**

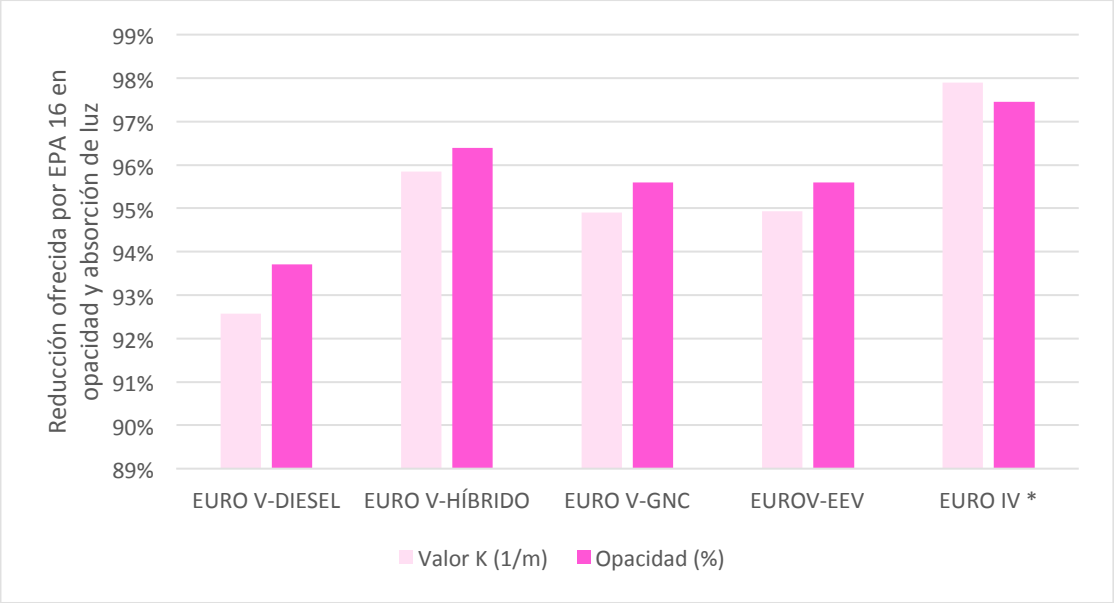
En la Figura 4 se muestra la emisión promedio de NOx ($NO+NO_2$) de cada una de las tecnologías evaluadas. En la figura se aprecia que los vehículos EPA 16, EURO V-Diésel, EURO V- Híbrido y EURO V-EEV no superan las 500 ppm en promedio de toda la prueba. Por otra parte las unidades EURO V-GNC y EURO IV obtuvieron valores superiores a las 500 ppm. También se observa que las emisiones de los vehículos EURO IV tiene 4 veces más emisiones en promedio que los vehículos EPA 16 y el vehículo EURO V-GNC tiene 2.7 veces más emisiones.



** Promedio de los seis vehículos EPA 16 evaluados*
** Promedio de los dos vehículos EURO IV evaluados

Figura 4 Emisión de NOx (promedio)

Al comparar los resultados de coeficiente de absorción de luz se observa que las emisiones de los vehículos EPA 16 son entre 71% y 99% menores que las emisiones del resto de las tecnologías. Los resultados de opacidad muestran reducciones de entre 86% y 99% para los vehículos EPA 16 en comparación con los vehículos de EURO V, EUROV-Híbrido, EURO V-GNC, EURO V-EEV y EURO IV. La Figura 5 demuestra la reducción de opacidad y absorción de luz de los vehículos EPA 16 en promedio en comparación con cada tipo de tecnología medida.



* Promedio de los dos vehículos EURO IV evaluados

Figura 5. Reducción en opacidad y absorción de luz ofrecido por los vehículos EPA 16 (en promedio) comparados a los vehículos de EURO V-Diésel, EURO V-Híbrido, EURO V-GNC, EURO V-EEV y EURO IV.

En cuanto a la emisión de nanopartículas, como se puede observar en la Figura 6, el resultado de las unidades Enviro 500 se encuentra por debajo de las 100,000 p/cm^3, mientras que el resto de los vehículos obtuvieron resultados superiores al millón de partículas por centímetro cúbico. Las unidades Enviro 500 obtuvieron resultados de entre 2 y 3 órdenes de magnitud por debajo del resto de unidades. En otras palabras, los vehículos con estándar de emisión EPA 16 emiten entre 100 y 1,000 veces menos nanopartículas comparados con el resto de tecnologías evaluadas. Los valores más altos se observan en las tecnologías EURO V- Híbrido seguida de la tecnología EURO IV, ambos con resultados superiores a 1.0E^{+07} p/cm^3.

Al contrario de la concepción común, el híbrido medido no ofrece mejor perfil de emisiones en ningunos de los métricos, ni el vehículo EURO V EEV. Uno de los vehículos EURO V de diésel tiene buenos resultados para todos contaminantes y métricos de interés, pero todavía emite 100 veces más partículas que los vehículos de EPA 16, equipados con filtros de partículas. En cuanto al vehículo EURO V-GNC, en la Figura 6 podemos observar que las emisiones de partículas (número) son entre tres y once veces inferiores en comparación con el resto de vehículos EURO V, no obstante al compararlo con los vehículos EURO VI el

vehículo EURO V-GNC emite aproximadamente 30 veces más partículas. Y a la vez, las emisiones de NOx medidos por en vehículo de GNC son más de 60% más altos que los otros vehículos de Euro V.

** Promedio de los seis vehículos EPA 16 evaluados*
** Promedio de los dos vehículos EURO IV evaluados

Figura 6 .Emisión de número de partículas

Los resultados obtenidos de emisión de número de partículas en los vehículos EPA 16 se encontraron por debajo de 100,000 p/cm^3 (promedio de prueba), lo que es indicador del buen desempeño del filtro de partículas. Como referencia, la Oficina Federal del Medio Ambiente de Suiza (FOEN, por sus siglas en inglés), ha establecido como límite 250,000 p/cm^3, en prueba estática, para vehículos equipados con filtro de partículas[7]. El FOEN ha sido la única dependencia, de la

[7] FOEN (2016). *Directiva sobre medidas profesionales y técnicas para limitar las emisiones de contaminantes transportados por el aire desde los sitios de construcción*. Berna, Suiza. FOEN.

cual se tenga referencia, a nivel mundial, que ha establecido un límite para la emisión de número de partículas de vehículos diésel en prueba estática.

Para calcular el porcentaje de disminución de emisiones de nanopartículas de las unidades EPA 16 en comparación con el resto de vehículos, se realizó una matriz mediante la cual se obtuvieron las diferencias porcentuales de las emisiones. En la Tabla 6 podemos apreciar que los vehículos EPA 16 evaluados emiten entre 96.3 y hasta 99.7% menos nanopartículas, en comparación con los vehículos de otras tecnologías.

Tabla 6 Matriz de diferencia porcentual de reducción de emisiones de nanopartículas

		EURO V-DIESEL	EURO V-HÍBRIDO	EURO V-GNC	EUROV-EEV	EURO IV **
EPA 16 *	Número de partículas (p/cm3)	6.32E+06	1.80E+07	1.68E+06	9.70E+06	1.08E+07
	5.25E+04	99.2%	99.7%	96.9%	99.5%	99.5%

Valor máximo Valor mínimo

** Promedio de los seis vehículos EPA 16 evaluados*
** Promedio de los dos vehículos EURO IV evaluados

BENEFICIOS DE LA ADOPCIÓN DE LOS ESTÁNDARES DE EMISIÓN EURO VI Y EPA 10 O POSTERIORES

Al evaluar los costos-beneficios de la adopción de nuevos estándares de emisión (EURO IV, EPA 10 o EPA 16) se deben consideran diversas variables y no únicamente el costo inicial de los vehículos. La incorporación de los diferentes sistemas de control de emisiones genera un incremento en el costo de los mismos. El ICCT[8] calcula que el incremento promedio en el precio de venta del vehículo es aproximado a 5,500 dólares estadounidenses, por camión de 12 litros, en comparación con los vehículos con tecnología EPA 04.

El ICCT sugiere que los países deben transitar los más pronto y directamente posible a los estándares EURO VI, EPA 10 o EPA 16 sin pasar por cada una de las etapas[9]. Es decir, para el caso de nuestro país lo más recomendable es pasar de EURO IV y/o EPA 94 a EURO VI y EPA 10 o posteriores sin pasar por EURO V y/o EPA 07.

---

[8] ICCT (2016). COSTS OF EMISSION REDUCTION TECHNOLOGIES FOR HEAVY-DUTY DIESEL VEHICLES. California, Estados Unidos de Norteamérica
[9] https://www.theicct.org/publications/accelerating-progress-euro-4iv-euro-6vi-vehicle-emissions-standards

Con la implementación inmediata de Euro VI y/o EPA 10 o EPA 16 sin pasar por Euro V / EPA 07, se reducirían los costos acumulativos de la transición. Además, los costos de estas fases de transición son relativamente altos, mientras que los beneficios son relativamente bajos. En otras palabras, la proporción entre beneficios y el costo es mucho mayor para la fase final. Existen tres principales razones para esto:

1. Las normas de Euro VI y EPA 10 o EPA 16 requieren la incorporación de los filtros de partículas que, además de reducir emisiones de partículas por masa, contribuye a reducir la emisión de nanopartículas, las cuales han sido catalogadas por la Organización Mundial de la Salud como cancerígenas[10]. Las emisiones provenientes de los escapes de los vehículos Euro VI / EPA 10 / EPA 16 tiene una emisión de número de partículas parecidas a las concentraciones del aire del ambiente, mientras que los vehículos sin filtros, incluidos los híbridos y los vehículos con certificación EEV, como hemos visto en este análisis, muestran una emisión de número de partículas entre 100 y 1000 veces más elevadas.

2. Los controles de emisión de NOx funcionan bien en los vehículos Euro VI / EPA 10 / EPA 16 en todas las condiciones de uso del vehículo, mientras que las emisiones de NOx de los vehículos con certificaciones anteriores, muestran emisiones hasta cinco veces superiores en el mundo real en comparación con los niveles de certificación que cumplen[11]. Lo anterior debido a que el cambio en el ciclo de prueba y otros cambios en la normatividad Euro VI hace que las evaluaciones de emisiones de NOx sean más confiables; disminuyendo así la brecha en la diferencia entre los emisiones presentadas en las pruebas realizadas para la certificación y las emisiones en el mundo real.

3. Los vehículos que cumplen con la normatividad Euro VI y EPA 10 o EPA 16 pueden aprovechar el desarrollo tecnológico que contribuye a mejorar el rendimiento de combustible. El ICCT en su Hoja de datos sobre las normas de emisiones de vehículos de carga pesada (NOM-044)[12], menciona que la

[10] http://www.who.int/mediacentre/factsheets/fs313/es/
[11] https://www.theicct.org/sites/default/files/publications/ICCT_Briefing_EuroIV-V-VI-NOx_Mar2015.pdf
[12] ICCT (2014). Hoja de datos sobre las normas de emisiones de vehículos de carga pesada (NOM-044), California, Estados Unidos de Norteamérica

industria automotriz había calculado entre un 3 y 6% de ahorro de combustible al comparar un vehículo EPA 10/ EURO VI con un vehículo EPA 04, sin embargo, mediante diferentes pruebas se ha observado que este valor es mayor. En el mismo documento se menciona que existe un ahorro de combustible de hasta 11%, por lo cual, dependiendo de la operación de cada vehículo, la recuperación de la inversión, derivada del incremento del costo del vehículo, se daría entre uno y dos años.

Por eso, aunque existe un costo incremental en la adquisición de los vehículos Euro VI / EPA 10 / EPA 16, la mejora en el rendimiento proporciona un beneficio monetario significativo para el consumidor durante la vida útil del vehículo.

La generalización en nuestro país del uso de vehículos EURO VI y EPA 10 o EPA 16 traen consigo un beneficio en términos de salud sumamente significativo. Se estima que los beneficios acumulativos de la generalización de estas tecnologías en nuestro país pueden superar los 120 millones de dólares en beneficios netos en materia de salud, evitando más de 55,000 muertes prematuras acumuladas para el 2037[13].

CONCLUSIONES

Los vehículos Enviro 500 de la nueva Línea 7 de Metrobús cuentan con certificación EPA 16, el estándar de emisiones más reciente a nivel internacional para vehículos de carga a diésel. Esta certificación, además de establecer los mismos límites de emisión para contaminantes criterio que EPA 10 (los cuales son equivalentes a EURO VI), establece límites máximos permisibles de emisión para Gases de Efecto Invernadero (GEI) [14].

Para poder realizar una comparación de las emisiones contaminantes de los vehículos Enviro 500, se efectuó una medición de emisiones a 12 unidades que actualmente prestan servicio en el sistema de transporte de Metrobús, seis EPA 16 y seis con diferentes certificaciones y tecnologías de control de emisiones.

---

[14] El estándar EPA 16 establece los mismos límites de emisión de NOx y PM que el estándar EPA 10 y además establece límites para CO_2 (555 g/bhp-hr), CH_4 (0.10 g/bhp-hr) y para N_2O (0. 10 g/bhp-hr)

Las pruebas realizadas ofrecen una simple, económica y efectiva forma de demostrar que los sistemas de control de emisiones de los vehículos EPA16 se encuentran operando adecuadamente y contribuyen a reducir significativamente las emisiones contaminantes.

Los resultados indican que sin importar las características de los vehículos, las unidades Enviro 500 tuvieron un mejor desempeño ambiental al obtener niveles de emisión inferiores al resto de los vehículos evaluados.

Además, los resultados muestran que los mayores niveles de reducción de emisiones se obtienen al referirnos a emisiones de partículas, tanto en su espectro visible (evaluado mediante opacidad y coeficiente de absorción de luz) como de partículas inferiores a 700nm. Los resultados de coeficiente de absorción de luz y opacidad, de los vehículos Enviro 500, indican valores cercanos a cero, lo anterior es indicativo de la ausencia de humo negro en las emisiones de los vehículos.

El análisis demuestra claramente que los filtros reducen las emisiones de nanopartículas. No obstante los límites de certificación establecidos son para masa de partículas, evaluar el número de partículas permite contar con un mejor indicador de la efectividad de los filtros (además de que el procedimiento de prueba es más económico y fácil de ejecutar). Por otra parte, mientras las tecnologías EURO IV y EURO V muestran bajos niveles de emisión de masa de partículas, en comparación con los estándares anteriores a estos, el número de partículas permanece igual. Los estándares Euro VI y EPA 2010 o EPA 16, que requieren la incorporación de filtros de partículas, reducen hasta en más de 99% el número de partículas de las emisiones de vehículos diésel.

Los vehículos Enviro 500 mostraron niveles de emisión de nanopartículas más de cuatro veces por debajo del límite establecido por el FOEN. Lo anterior reviste de importancia pues las nanopartículas han sido catalogadas por la Organización Mundial de la Salud (OMS) como cancerígenas y un riesgo para la salud humana.

Los resultados obtenidos en la emisión de NOx e HC demuestran que los sistemas de post tratamiento de gases de escape con los que están equipados los vehículos Enviro 500 se encuentran funcionando apropiadamente. Ambos contaminantes son precursores de ozono y de la formación de partículas en la atmósfera, los dos principales contaminantes responsables de las contingencias ambientales y los cuales tienen un mayor impacto en la salud de la población.

Los resultados indican que los niveles de emisión de óxidos de nitrógeno de los vehículos EPA 16 son inferiores a los niveles de emisión del resto de los vehículos, en particular al comprarlos con los niveles de emisión de los vehículos EURO IV, la diferencia entre estos puede ser de hasta cinco veces. Las emisiones de NOx tienen una relación directa con las condiciones de operación, dependiendo del tipo de programación que tengan los sistemas de control para funcionar en determinadas condiciones de conducción. Por lo cual los resultados obtenidos sirven como referencia del buen funcionamiento de los dispositivos, sin embargo se subestiman los beneficios que las tecnologías EURO VI y EPA 10 o EPA 16 tienen en cuanto a la reducción de emisiones de NOx en condiciones reales de operación.

Con la implementación inmediata de Euro VI / EPA 10 / EPA 16 sin pasar por Euro V / EPA 07, se reducirían los costos acumulativos de la transición. La mejora en el rendimiento proporciona un beneficio monetario significativo para el consumidor durante la vida útil del vehículo. Además la implementación inmediata generaría en nuestro país beneficios acumulativos que pueden superar los 120 millones de dólares en beneficios netos en materia de salud, evitando más de 55,000 muertes prematuras acumuladas para el 2037 [15].

[15] ICCT (2014). Hoja de datos sobre las normas de emisiones de vehículos de carga pesada (NOM-044), California, Estados Unidos de Norteamérica

Anexo I. Especificaciones técnicas de los equipos de medición y protocolos de prueba para analizar emisiones de nanopartículas y de gases en escape de vehículos a diésel en prueba estática.

Especificaciones técnicas del equipo de medición Testo, Nanomet3.

Rango de concentración	1E4 -3E8 p/cm^3
Tamaño de partículas	0.01 – 0.70 um
Flujo de toma de muestra	4 l/min
Factores de dilución	10, 30, 50, 100, 300
Temperaturas del tubo de evaporización	300 °C +/- 3°C
Condiciones de operación	T_{amb}: 5°C – 35°C Humedad relativa: 80%
Sensor de calibración	Estándar de Calibración con partículas de cloruro de sodio (NaCL)

Protocolo de prueba para medir número de partículas en escape de vehículos a diésel en prueba estática.

- Se realiza una inspección visual de la hermeticidad en el tubo de escape.
- Se pone en marcha la unidad y se realiza la inspección visual de las emisiones del tubo de escape, la cual consiste en verificar que el vehículo no muestre emisiones de humo negro característico de altos niveles de opacidad.
- El equipo realiza un calentamiento previo.
- Se realiza la calibración automática del equipo, ajustando todos los valores a cero, antes de dar inicio a la secuencia de aceleraciones funcionales.
- Se introduce un termopar en el motor para poder realizar la medición de la temperatura del aceite.
- El vehículo se calienta a un rango entre 60 y 80°C.
- Con el fin de verificar si el vehículo alcanza el valor estándar de RPM que permite el gobernador del motor, se acelera gradualmente desde ralentí hasta alcanzar el valor antes mencionado, se sostiene por un periodo de dos segundos. Este procedimiento se realiza por triplicado.
- Se coloca la sonda dentro del tubo de escape de forma perpendicular al flujo de salida de los gases de escape.
- Se mantiene el vehículo en ralentí durante 60 segundos (se obtiene la primera secuencia de lecturas).

- Se acelera el vehículo a corte de gobernador durante 60 segundos (se obtiene la segunda secuencia de lecturas).
- Se mantiene nuevamente el vehículo en ralentí durante 60 segundos. (se obtiene la tercera secuencia de lecturas).
- Se acelera el vehículo a corte de gobernador durante 60 segundos (se obtiene la cuarta secuencia de lecturas).
- Los resultados generados después de haber realizado el paso 3, son almacenados en el equipo de medición y analizados posteriormente.

Especificaciones técnicas del equipo de medición Maha, Met 6.3

Gases analizables	**CO**	**CO_2**	**HC**	**O_2**	**NO_X**
Rango de medición	0 a 15,0 Vol. %	0 a 20,0 Vol. %	0 a 2000 ppm (hexano) 0 a 4000 ppm (propano)	0 -25,0 Vol. %	0 a 5000 ppm
Exactitud de la medición	0,03 Vol. %	0,5 Vol. %	10 ppm Vol.	0,1 Vol. %	32- 120 ppm
Principio de medición	Infrarrojos	Infrarrojos	Infrarrojos	Electroquímica	Electroquímica

- Tasa de circulación: 3.5 l/min.
- Valor Lambda: Margen indicador: 0,500 – 9,999 / resolución: 0,001 / calculado según Brettschneider.
- Intervalo de medición opacidad: 0 – 100 %
- Rango de medición valor K: 0 – 9,99 m^{-1}
- Masa de partículas: 0 – 1,100 m^{-1}

Protocolo de prueba para analizar emisiones de gases en escape de vehículos a diesel en prueba estática.

- Se realiza una inspección visual de la hermeticidad en el tubo de escape.
- Se pone en marcha la unidad y se realiza la inspección visual de las emisiones del tubo de escape, la cual consiste en verificar que el vehículo no muestre emisiones de humo negro característico de altos niveles de opacidad.
- Se coloca el tacómetro en la tapa del motor para la medición de las RPM.

- Se introduce un termopar en el motor para poder realizar la medición de la temperatura del aceite.
- El vehículo se calienta hasta alcanzar una temperatura de entre 60ºC y 80ºC.
- Se realiza la calibración automática del equipo, ajustando todos los valores a cero, antes de dar inicio a la secuencia de aceleraciones funcionales.
- Con el fin de verificar si el vehículo alcanza el valor estándar de RPM que permite el gobernador del motor, se acelera gradualmente desde ralentí hasta alcanzar el valor antes mencionado, se sostiene por un periodo de dos segundos. Este procedimiento se realiza por triplicado.
- Se introduce la sonda de medición en el tubo de escape, ésta se coloca a no más 5 cm de distancia dentro tubo de escape.
- Se mantiene el vehículo en ralentí durante 60 segundos (se obtiene la primera secuencia de lecturas).
- Se acelera el vehículo a corte de gobernador durante 60 segundos (se obtienen la segunda secuencia de lecturas).
- Se mantiene nuevamente el vehículo en ralentí durante 60 segundos. (se obtiene la tercera secuencia de lecturas).
- Se acelera el vehículo a corte de gobernador durante 60 segundos (se obtienen la cuarta secuencia de lecturas).
- Los resultados generados después de haber realizado el paso 4, son almacenados en el equipo de medición y analizados posteriormente.

REPORTE DETERMINACIÓN DE EMISIONES DE VEHÍCULOS DEL METROBÚS

RESUMEN EJECUTIVO

- El gobierno de la Ciudad de México, con el objetivo de minimizar los impactos ambientales y en salud derivados de las emisiones contaminantes provenientes de fuentes móviles, ha impulsado la introducción de vehículos de transporte público que cumplan con los más estrictos estándares internacionales de emisión

- Los 90 vehículos Alexander Dennis, Doble Piso Enviro 500, que circularán en la Línea 7 del sistema de transporte público de Metrobús (MB), cuentan con una certificación EPA 16 otorgada por la Agencia de Protección al Ambiente de los Estados Unidos de Norteamérica (EPA, por sus siglas en inglés). Dichos vehículos se encuentran equipados con sistemas de control de emisiones de última tecnología.

- Para confirmar los beneficios en reducción de emisiones de los nuevos autobuses, la SEDEMA a través de la Dirección de Programas de Transporte Sustentable y Fuentes Móviles (DPTSyFM) de la Dirección General de Gestión de la Calidad del Aire llevó a cabo un estudio corto para determinar las emisiones contaminantes a 6 vehículos Enviro 500 a través de mediciones para poder realizar una comparación de las emisiones de estos vehículos con otros de la flota de MB, se efectuó además la medición de 5 vehículos con diversos estándares de emisión y tecnologías de reducción de emisiones contaminantes (EURO V, EURO V-EEV, EURO IV, Híbrido y Gas Natural Comprimido) que prestan servicio en diferentes líneas del sistema MB.

- Los resultados confirman que los sistemas de post-tratamiento de gases de escape con los que se encuentran equipados los vehículos Enviro 500, contribuyen a reducir manera sustancial la emisión de gases y partículas contaminantes:
    - Reducción de emisiones de partículas finas: La incorporación del Filtro de Partículas en los vehículos Enviro 500, contribuye a que estos vehículos

emitan entre 96.8 y 99.7% menos nanopartículas[16] en comparación con el resto de vehículos evaluados con tecnologías anteriores.

- Reducción de humo negro: las mediciones de coeficiente de absorción de luz y opacidad resultaron en valores promedio cercanos a cero, lo que indica la ausencia de humo negro visible en los gases de escape.

- Reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno: los resultados de emisión de NOx nos muestran que los sistemas SCR han ido mejorando su desempeño a través de los años. Los resultados indican que los niveles de emisión de óxidos de nitrógeno de los vehículos EPA 16 son inferiores a los niveles de emisión del resto de los vehículos, en particular al comprarlos con los niveles de emisión de los vehículos EURO IV, la diferencia entre estos puede ser de hasta cinco veces. Las emisiones de NOx tienen una relación directa con las condiciones de operación, dependiendo del tipo de programación que tengan los sistemas de control para funcionar en determinadas condiciones de conducción, por lo cual los resultados obtenidos sirven como referencia del buen funcionamiento de los dispositivos.

- Con la implementación inmediata de Euro VI / EPA 10 / EPA 16 sin pasar por Euro V / EPA 07, se reducirían los costos acumulativos de la transición. La mejora en el rendimiento proporciona un beneficio monetario significativo para el consumidor durante la vida útil del vehículo. Además la implementación inmediata generaría en nuestro país beneficios acumulativos que pueden superar los 120 millones de dólares en beneficios netos en materia de salud, evitando más de 55,000 muertes prematuras acumuladas para el 2037 [17].

KATHERING BLUMBERG
Senior Fellow / Regional Lead

[16] Partículas con diámetro aerodinámico menor a 100 nanómetros (PM0.1)
[17] ICCT (2014). Hoja de datos sobre las normas de emisiones de vehículos de carga pesada (NOM-044), California, Estados Unidos de Norteamérica