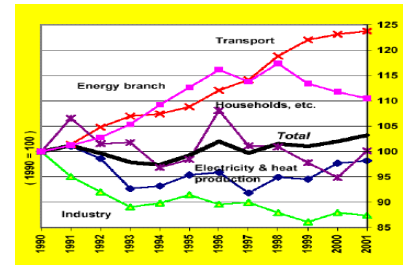
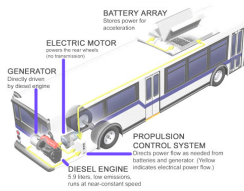




Región Latinoamérica y Caribe

Publicaciones de Desarrollo Sustentable



Pruebas en Campo de Autobuses de Tecnologías Alternativas

En la Ciudad de México

Reporte Final

Equipo de Transporte y Cambio Climático



GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL
Secretaría del Medio Ambiente
Dirección General de Gestión Ambiental del Aire





ÍNDICE

| | |
|---|------------|
| DIRECTORIO..... | V |
| RECONOCIMIENTOS..... | VII |
| PRESENTACIÓN..... | IX |
| 1. INTRODUCCIÓN..... | 1 |
| 2. ANTECEDENTES..... | 5 |
| 3. PROGRAMAS QUE SOPORTARON EL PROYECTO..... | 7 |
| 3.1 PROGRAMA PARA MEJORAR LA CALIDAD DEL AIRE EN LA ZONA METROPOLITANA DEL VALLE DE MÉXICO..... | 7 |
| 3.2 PROGRAMA INTEGRAL DE TRANSPORTE Y VIALIDAD DEL DISTRITO FEDERAL..... | 8 |
| 3.3 PROYECTOS DE TRANSPORTE Y LA SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE..... | 9 |
| 4. PROTOCOLO DE PRUEBAS..... | 11 |
| 4.1 FLOTA DE PRUEBA..... | 11 |
| 4.2 PRUEBAS DE CAMPO..... | 13 |
| 4.3 PRUEBAS OPERATIVAS..... | 14 |
| 4.3.1 Prueba de Aceleración en Planicie..... | 14 |
| 4.3.2 Prueba de Aceleración en Pendiente..... | 15 |
| 4.3.3 Radio de Giro..... | 16 |
| 4.3.4 Distancia de Frenado..... | 17 |
| 4.3.5 Prueba de Recarga de la Batería (SOC) en Vehículos Híbridos..... | 19 |
| 4.4 PRUEBAS AMBIENTALES..... | 20 |
| 4.4.1 Pruebas en Dinamómetro de Chasis..... | 20 |
| 4.4.1.1 Descripción de Laboratorio..... | 21 |
| 4.4.1.2 Dinamómetro..... | 21 |
| 4.4.1.3 Equipamiento del Muestreo de Emisiones Reguladas..... | 22 |
| 4.4.1.4 Muestreo de Especies no Reguladas..... | 24 |
| 4.4.1.5 Vehículos y Combustibles..... | 25 |
| Rendimiento de Combustible..... | 29 |
| 4.4.1.6 Ciclos de Manejo Utilizados..... | 30 |
| 4.4.1.7 Procedimientos de Pruebas en Dinamómetro de Chasis..... | 33 |
| 4.4.1.8 Control de Calidad..... | 34 |
| 4.4.2 Sistema RAVEM..... | 36 |
| 4.4.2.1 Vehículos de Prueba..... | 36 |
| 4.4.2.2 Principios de Operación..... | 38 |
| 4.4.2.3 Sistema RAVEM y Operación..... | 40 |
| 4.4.2.4 Control de Calidad..... | 45 |
| 5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS..... | 47 |
| 5.1 PRUEBAS OPERATIVAS..... | 47 |
| 5.1.1 Aceleración en Planicie..... | 47 |
| 5.1.2 Radio de Giro..... | 49 |
| 5.1.3 Distancia de Frenado..... | 52 |
| 5.1.4 Recarga de la Batería (SOC)..... | 54 |
| 5.2 PRUEBAS AMBIENTALES..... | 54 |



| | | |
|------------|---|------------|
| 5.2.1 | <i>Emisión de Contaminantes con Dinamómetro de Chasis</i> | 54 |
| 5.2.1.1 | Emisiones en Relación a la Distancia Recorrida. | 54 |
| 5.2.1.1.1 | Comparativo de Emisiones Aplicando los Ciclos MCS y ETC. | 56 |
| 5.2.1.1.2 | Emisiones Utilizando Diesel con Diferentes Concentraciones de Azufre. | 63 |
| 5.2.1.2 | Emisiones en Relación a los Pasajeros Transportados y la Distancia Recorrida. | 68 |
| 5.2.1.2.1 | Comparativo de Emisiones Aplicando los Ciclos MCS y ETC. | 69 |
| 5.2.2 | <i>Emisión de Contaminantes con el Sistema RAVEM</i> | 72 |
| 5.2.2.1 | Ruta Insurgentes Norte. | 72 |
| 5.2.2.2 | Ruta Corredor Insurgentes. | 75 |
| 5.2.2.3 | Operadores. | 76 |
| 5.2.2.4 | Emisiones en Relación a la Distancia Recorrida para las Campañas Realizadas. | 76 |
| 5.2.2.4.1 | Campaña de pruebas 1. | 78 |
| 5.2.2.4.2 | Campañas de pruebas 2 y 3. | 82 |
| 5.2.2.5 | Emisiones en Relación a los Pasajeros Transportados y la Distancia Recorrida para las Campañas Realizadas. | 85 |
| 5.2.2.6 | Comparativo de Emisiones de las Rutas Insurgentes y Corredor. | 90 |
| 5.2.2.7 | Emisiones de los Autobuses a Diesel en Relación a la Potencia al Freno. | 91 |
| 5.2.2.8 | Emisiones de Carbonilos. | 94 |
| 5.2.2.9 | Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles. | 95 |
| 5.2.3 | <i>Ruido</i> | 97 |
| 5.2.4 | <i>Opacidad</i> | 97 |
| 6. | PRUEBAS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS. | 99 |
| 6.1 | DESCRIPCIÓN DE LAS PRUEBAS REALIZADAS. | 99 |
| 6.2 | VEHÍCULOS DE PRUEBA. | 100 |
| 6.3 | SISTEMA WVU. | 100 |
| 6.3.1 | <i>Verificación del Sistema CVS</i> | 101 |
| 6.3.2 | <i>Calibración del Analizador</i> | 101 |
| 6.4 | SISTEMA RAVEM. | 101 |
| 6.5 | DATOS Y RESULTADOS. | 102 |
| 7. | EVALUACIÓN ECONÓMICA COMPARATIVA DE LA FLOTA DE AUTOBUSES..... | 111 |
| 7.1 | INTRODUCCIÓN..... | 111 |
| | FLOTA VEHICULAR. | 111 |
| 7.2 | METODOLOGÍA DEL ANÁLISIS. | 117 |
| 8. | CONCLUSIONES. | 123 |
| 9. | LECCIONES APRENDIDAS. | 125 |
| 10. | GLOSARIO. | 127 |



| | | |
|------------|---|------------|
| 11. | APÉNDICES..... | 129 |
| 11.1 | APÉNDICE 1: EMISIONES DE CARBONILOS MEDIDAS CON EL SISTEMA RAVEM. | 129 |
| 11.2 | APÉNDICE 2: EMISIONES DE COMPUESTOS ORGÁNICOS VOLÁTILES MEDIDAS CON EL SISTEMA RAVEM. | 131 |
| 11.3 | APÉNDICE 3: POLÍTICAS AMBIENTALES APLICADAS AL TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS DE ALTA CAPACIDAD EN LA CIUDAD DE MÉXICO. | 134 |
| 11.3.1 | <i>Introducción.....</i> | <i>134</i> |
| 11.3.2 | <i>Antecedentes.....</i> | <i>137</i> |
| 11.3.3 | <i>Situación Actual.....</i> | <i>138</i> |
| 11.3.4 | <i>Normas Ambientales Vigentes para Vehículos a Diesel en México.....</i> | <i>140</i> |
| 11.3.5 | <i>Normas Ambientales Internacionales.....</i> | <i>141</i> |
| 11.3.6 | <i>Pruebas de Tecnologías de Autobuses.....</i> | <i>142</i> |
| 11.3.7 | <i>Conclusiones.....</i> | <i>146</i> |





DIRECTORIO.

ALEJANDRO ENCINAS RODRÍGUEZ

JEFE DE GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL

EDUARDO VEGA LÓPEZ

SECRETARIO DEL MEDIO AMBIENTE

J. VÍCTOR HUGO PÁRAMO FIGUEROA

DIRECTOR GENERAL DE GESTIÓN AMBIENTAL DEL AIRE

ERNESTO ALVARADO RUIZ

DIRECTOR EJECUTIVO DE COORDINACIÓN INSTITUCIONAL E INTEGRACIÓN DE POLÍTICAS

CESAR F. GÁLVEZ HERNÁNDEZ

COORDINADOR GENERAL DE PRUEBAS DE EMISIONES VEHICULARES





RECONOCIMIENTOS.

Claudia Sheinbaum Pardo.
Ex Secretaria del Medio Ambiente

PANEL ASESOR.

Dr. Carlos Gay García.
Director del Centro de Ciencias de la Atmósfera. Universidad Nacional Autónoma de México.

Ing. Juan José Guerra Abud.
Presidente Ejecutivo de la Asociación Nacional de Productores de Autobuses, Camiones y Tractocamiones.

Dr. Francisco Guzmán López Figueroa.
Director Ejecutivo de Investigación del Instituto Mexicano del Petróleo.

Ing. Vicente Mayagoitia Barragán.
Profesor Investigador del Área de Transporte del Centro de Investigación e Innovaciones Tecnológicas.

Dr. Mario Molina Pasquel Henríquez.
Presidente del Consejo Directivo del Centro Mario Molina.

Greg Rideout.
Líder de Investigación de Emisiones Tóxicas y Estudios de Campo. Environment Canada.

Ing. Nicolás Rodríguez Martínez.
Gerente de Ingeniería de Procesos de la Subdirección de Producción. Instituto Mexicano del Petróleo.

John Rogers.
Director General del Grupo Trafalgar.

Ing. Rodolfo del Rosal Díaz.
Director General de la Comisión Nacional de Energía.

Juan Pedro Searle.
Coordinador del Proyecto de Corredores en Santiago de Chile.

Lee Schipper.
Director del World Resources Institute / EMBARQ.

Lennart Erlandsson.
Director de Calidad del Aire. AVL MTC.



INSTITUCIONES.

Walter Vergara

Ingeniero Líder del Departamento de Medio Ambiente para América Latina, Banco Mundial.

Adriana de Almeida Lobo

Directora del Centro de Transporte Sustentable. EMBARQ-WRI, Ceiba, SMA, SETRAVI y SEDUVI.

Luís Ramírez Corzo y Hernández

Director General de Petróleos Mexicanos.

Luz Elena González Escobar

Directora General de la Red de Transporte de Pasajeros (RTP). GDF.

Elvira Daniel Kabbaz Zaga

Directora General del Sistema de Transportes Eléctricos (STE). GDF.

EMPRESAS.

Allison Transmission. General Motors.

Anhui Ankai.

Buscar.

Cummins.

Combustibles Ecológicos (Ecomex).

Eletra.

Faw Ami.

Jonson Matthey.

Mercedes Benz.

Scania de México.

Shell Inc.

VOLVO Bus de México.

RESPONSABLES POR LA SECRETARÍA DEL MEDIO AMBIENTE DEL GOBIERNO DEL DISTRITO FEDERAL.

Cesar F. Gálvez Hernández.

Daniel León Cervantes.

Enrique Rivero Borrel.

Rodrigo Perrusquía Máximo.

Rodrigo Vargas Cornejo.



PRESENTACIÓN.

Es en el renglón de promoción del empleo de tecnología moderna para autobuses de pasajeros, que se decidió darle impulso al desarrollo de un programa que permitiera medir el desempeño ambiental, operativo y de determinación de costos donde se perfilaron las acciones de la Componente 3 del Proyecto de Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables en transporte (PIMAAT), cuya finalidad principal la constituyeron las pruebas de emisión de autobuses con diferentes tecnologías como son motores EPA 98, EPA 2004, EURO III e híbridos, todos estos propulsados con diesel. El diesel utilizado fue de tres tipos por su contenido de azufre, éste tuvo concentraciones de 15, 50 y 350 ppm. También se probaron autobuses impulsados por combustibles alternativos, como el Gas Natural Comprimido (GNC).

En algunas de las unidades se realizaron pruebas operativas de radio de giro, frenado y aceleración, así como de emisión de ruido y consumo de combustible, todos estos resultados se reportan en este documento.

En el capítulo 1 se da una introducción al proyecto, describiendo la problemática que da origen al proyecto y la necesidad de fortalecer el transporte masivo de pasajeros.

El capítulo 2 contiene los antecedentes del proyecto, los cuales dieron origen a las diferentes componentes y se hace énfasis en las características de la Componente 3.

En el capítulo 3 se discuten a mayor detalle los vínculos entre la Componente 3 y el Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010, el Programa Integral de Transporte y Vialidad 2002-2006 del Distrito Federal, así como otros proyectos de transporte en los cuales ha estado involucrada la Secretaría del Medio Ambiente y otros organismos internacionales.

El protocolo de prueba se presenta en el capítulo 4, junto con un listado de los vehículos participantes y sus características. Es en este capítulo donde se explica la estructuración y los tipos de pruebas realizadas. También se tiene una descripción de los dos sistemas que se utilizaron en la medición de emisiones contaminantes: el dinamómetro de chasis utilizado por la Universidad de Virginia del Oeste y el sistema portátil RAVEM, desarrollado por la empresa Motor, Combustible e Ingeniería de Emisiones (EF&EE por sus siglas en inglés).

Los resultados de las pruebas Operativas de las pruebas Ambientales, utilizando el dinamómetro de chasis y el sistema RAVEM, se tienen en el capítulo 5, en donde se analiza tanto la emisión de contaminantes en relación a la distancia recorrida como en relación al número de personas transportadas en cada vehículo y las emisiones contaminantes al variar la concentración de azufre en el diesel, desde el llamado Diesel de Ultrabajo contenido de Azufre (ULSD por sus siglas en inglés) hasta el diesel normalmente distribuido en la ZMVM, el cual tiene una concentración de 350 ppm.



El capítulo 6 contiene la descripción de las pruebas de emisión que se realizaron para obtener una correlación entre el dinamómetro de chasis y el sistema portátil RAVEM, una descripción de los vehículos utilizados y los resultados de las mismas.

En el capítulo 7 se dan los resultados de la evaluación económica que se realizó, incluyendo los costos de mantenimiento para cada unidad, la inversión de compra, consumo de combustible y mantenimiento; con lo cual se estima un costo en términos del kilometraje recorrido.

El capítulo 8 comprende las conclusiones de las pruebas realizadas y se conjunta con el capítulo 9, en donde se hace una recopilación de las lecciones aprendidas a lo largo del proyecto y que serán de utilidad para proyectos similares que se realicen en otras ciudades.

También se presentan los términos y abreviaturas más comunes empleados en el presente documento y se presentan en el capítulo 10, el cual es un glosario.

Finalmente el capítulo 11 contiene los apéndices que complementan la información discutida a lo largo del presente documento, ahondando en los resultados del análisis de carbonilos y compuestos orgánicos volátiles que se hizo con el sistema RAVEM y una discusión de la influencia de las pruebas realizadas en la normatividad ambiental que rige a los vehículos que utilizan diesel como combustible en la Zona Metropolitana del Valle de México.

México Distrito Federal, mayo del 2006
Mtro. Eduardo Vega López
Secretario del Medio Ambiente
Gobierno del Distrito Federal



1. INTRODUCCIÓN.

El desarrollo económico y la forma dispersa del crecimiento urbano del Distrito Federal y su zona conurbada tienen impactos en el transporte que se manifiestan en el incremento de las tasas de movilidad, en una creciente motorización, cambios hacia modos más rápidos de transporte y un aumento en las distancias de viaje. No obstante que la infraestructura y el equipamiento con el que se cuenta carecen de la cantidad y la calidad para soportar estos impactos.

Desde esta perspectiva, la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM) cuenta con un sistema de transporte urbano inadecuado cuyos principales efectos negativos son la dificultad de movilidad de los habitantes y altos niveles de contaminación que deterioran la calidad del aire y la salud de las personas.

Por ello, en el mediano y largo plazo el Gobierno del Distrito Federal plantea la necesidad de implantar una reforma global del sistema de transporte urbano que favorezca su eficiencia y que al mismo tiempo sea impulsora de beneficios ambientales, que incluya: el des-estímulo al uso del automóvil individual y su racionalización; el adecuado mantenimiento, integración y expansión, con mayor calidad de servicio, de los transportes públicos menos contaminantes (Metro, trolebús y camiones de alta capacidad, como el Metrobús); sustitución de los microbuses por camiones con tecnología alternativa que tenga un menor impacto ecológico, organizados racional y eficientemente; la ampliación de rutas del transporte público en las colonias populares periféricas y su conectividad al sistema troncal; el ordenamiento de la vialidad urbana y las conexiones metropolitanas para superar los *cuellos de botella* existentes.

En este contexto, el privilegiar las formas de transporte masivo sobre el individual adquiere una enorme relevancia si se toma en consideración que:

- El 81% de los viajes metropolitanos se realizan en transporte masivo y sólo el 19% en automóviles particulares.
- El uso de sistemas masivos de transporte está asociado con las menores emisiones de contaminantes por pasajero-kilómetro.¹

Sin embargo, dar prioridad en la circulación al transporte público de pasajeros mediante el confinamiento de algunas de sus rutas en corredores estratégicos requiere de dotar a las vialidades de una infraestructura perfectamente integrada al entorno urbano (compuesta por elementos paisajísticos, ambientales, de mobiliario y de espacio libre) que induzca a la integración eficiente de los corredores con otros modos de transporte como el Metro y el Tren Ligero, principalmente, cuyo diseño amplíe las posibilidades de incorporar tecnología innovadora así como el uso de formas alternativas de energía.

¹ Programa para la Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables en Transporte (PIMAAT), Secretaría del Medio Ambiente. 2003.



Por tal motivo, el proyecto de los corredores estratégicos es concebido como un proyecto urbano integral: que deriva en una serie de soluciones viales locales sin perder el enfoque metropolitano de la medida; que permita un incremento de la densidad y la habitabilidad tanto de los corredores viales como de su zona de influencia; que favorezca el uso eficiente de la energía y por ende la disminución de los niveles de contaminación de la zona de los corredores; que sea consistente con los objetivos del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 y del Programa Integral de Transporte y Vialidad 2002-2006 del Distrito Federal; y, que esté perfectamente articulado al resto de los planes y programas relacionados de la Ciudad que de manera paralela se están llevando a cabo.

Se plantea entonces la necesidad de contar con un sistema de transporte basado en el diseño de corredores estratégicos en ejes viales de la Ciudad de México, donde, de manera individual, cada corredor represente soluciones que coadyuven a resolver problemas viales y urbanos específicos de un sector de la Ciudad y, de manera conjunta, resulten en una alternativa de transporte masivo que contribuya a la mejora tanto del sistema de transporte público como del medio ambiente metropolitano en general, con la cual se pueda promover la creación de un sistema integral de transporte.

El transporte es el sector que más contribuye con las emisiones de precursores de ozono y monóxido de carbono debido a un alto consumo de combustibles y a la calidad de dichos combustibles, la tecnología vehicular, la falta de infraestructura vial y el congestionamiento de vialidades, entre otros factores.

El beneficio ambiental de capturar en el Metro algunos viajes-persona-día de los ciudadanos del Distrito Federal es reducido si los habitantes del Estado de México están obligados a utilizar su vehículo para transportarse a esta Ciudad, teniendo en cuenta que en muchos casos dichos vehículos en el Estado de México presentan una mayor edad por lo cual generan mayor volumen de emisiones.

Paralelamente deben implementarse mejoras a las condiciones del transporte público concesionado para impulsar la renovación de este parque vehicular por unidades nuevas y de mayor capacidad.

Se debe promover el fortalecimiento de la gestión ambiental mediante la colaboración entre los gobiernos federal y locales, en particular con la Secretaría de Transportes y Vialidad (SETRAVI) para, en conjunto, procurar el financiamiento de la modernización del parque vehicular y las vialidades en el Distrito Federal.



Así mismo, es necesario fortalecer la regulación ambiental del transporte público de pasajeros, tanto el perteneciente a organizaciones privadas como el administrado por entidades del Gobierno de la ciudad. Así mismo, es necesario coadyuvar para que los medios de transporte masivo de alta capacidad tengan una prioridad en su fortalecimiento y desarrollo y aportar los elementos técnicos para que este sector incorpore los criterios ecológicos necesarios para su sustentabilidad ambiental en el mediano y largo plazos. Debido al gran número de unidades foráneas que prestan el servicio y llegan a la ciudad, se requiere de acciones de coordinación para su regulación ambiental con autoridades federales y del Estado de México. Para ello se plantea llevar a cabo las siguientes acciones específicas:

- Fortalecer la verificación de las emisiones contaminantes de los vehículos e implementar una revisión de seguridad de los vehículos acoplada a la verificación vehicular de las unidades.
- Promover la modernización del transporte público de pasajeros privado y de responsabilidad del Gobierno del Distrito Federal, incorporando unidades de menor potencial contaminante.
- Incentivar el uso de unidades nuevas de alta capacidad y bajas emisiones contaminantes en sustitución de las combis y los microbuses.





2. ANTECEDENTES.

El corredor Metrobús en la avenida de los Insurgentes es el primero de un sistema de corredores estratégicos en ser establecido, los cuales se conciben como parte de un programa urbano integral: que derive en una serie de soluciones viales locales, sin perder de vista un enfoque metropolitano; que favorezca el uso eficiente de la energía y por ende la disminución de los niveles de contaminación de la zona de los corredores; que sea consistente con los objetivos del Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México 2002-2010 (PROAIRE) y del Programa Integral de Transporte y Vialidad 2002-2006 (PITV): y que esté perfectamente articulado al resto de los planes y programas relacionados de la Ciudad que se están llevando a cabo de manera paralela.

Para la implantación de un sistema de corredores estratégicos en la Ciudad de México se lleva a cabo el “Programa para la Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables en Transporte” y en él se trabajaron simultáneamente 6 componentes:

- Imagen y Comunicación
- Operación e Infraestructura
- Pruebas de Tecnología de Autobuses
- Programa Institucional
- Programa Organizacional
- Programa Social

En particular, la llamada Componente 3: Pruebas de Tecnologías de Autobuses, consistió en una serie de pruebas comparativas para autobuses que utilizan combustibles y tecnologías alternativas (híbridos y Gas Natural Comprimido) y los vehículos a diesel modernos y normales (con diesel normal y diesel de bajo contenido de azufre, 15 ppm y 50 ppm); para que se prueben las ventajas técnicas, económicas, ambientales y de clima bajo la operación en condiciones de la ZMVM.

Realizando estas pruebas se podrán identificar algunas tecnologías que son más viables para ser utilizadas en el Distrito Federal. La evaluación tiene un carácter ambiental y económico, definiéndose así cuál tecnología resulta menos agresiva con el medio ambiente y cuál es aquella que, desde el punto de vista operativo y económico, puede ser introducida de manera realista.

Para realizar la evaluación ambiental, se decidió utilizar dos métodos para medir la emisión de contaminantes de los autobuses disponibles: En dinamómetro de chasis, el cual es un método ampliamente establecido en diversos países para certificar motores y como base para generar normatividad de emisiones; dado que en México no se tienen dinamómetros para vehículos pesados se realizaron las pruebas en el dinamómetro de chasis portátil de la Universidad de Virginia del Oeste (WVU por sus siglas en inglés). El otro método consiste en utilizar uno de los recientes sistemas para medir emisiones a bordo de los vehículos evaluados, en este caso el sistema de Medición de Emisiones Vehiculares a Bordo (RAVEM por sus siglas en inglés) desarrollado y construido por la empresa Motor, Combustible e Ingeniería de Emisiones (EF&EE por sus siglas en inglés).





3. PROGRAMAS QUE SOPORTARON EL PROYECTO.

3.1 Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la Zona Metropolitana del Valle de México.

El PROAIRE 2002-2010, Programa para Mejorar la Calidad del Aire en la ZMVM, es una campaña a mediano y largo plazo, metropolitana y multisectorial, para atender los problemas de la calidad del aire en la ZMVM y la estrategia oficial del gobierno para mejorar la calidad del aire en el área metropolitana. El programa reconoce la función capital que el sector del transporte tiene para solucionar gran parte de los problemas de calidad del aire e identifica 47 medidas, de un total de 108, vinculando el sector del transporte y mejoras en la calidad del aire. Una medida imprescindible, identificada en el plan, es la adopción de corredores de transporte como un medio que fomente un cambio modal. La meta del programa es muy clara: “mejorar los indicadores de salud mediante reducciones en la exposición de poblaciones a contaminantes transportados por el aire”. El PROAIRE, que han divulgado en forma conjunta el Gobierno del Distrito Federal, el Gobierno del Estado de México y el Gobierno Federal, incluye trabajo previo sobre el control de la calidad del aire y proporciona una descripción detallada de la situación en el Valle de México, en términos de calidad del aire. Concluye que, si bien ha habido avances importantes, hay grandes desafíos frente a la meta de una mejor calidad del aire. Estos se vinculan con el crecimiento continuo esperado en la demanda de servicios y la actividad económica y en la naturaleza compleja de muchas fuentes dispersas de contaminación en el área. Se identifica al sector del transporte como un sector estratégico que exige actuar de inmediato.

El plan también resume información disponible sobre los efectos en la salud causados por la contaminación del aire (tomada de informes preparados con ayuda del PDF-B del Fondo para el Medio Ambiente Mundial y el Banco Mundial). El programa actualiza el inventario de emisiones y fija metas para los 10 años que dura el programa. Esas metas, proporcionadas en forma cuantitativa y resumida, son: Una reducción considerable de la exposición a concentraciones elevadas de ozono (eliminar las concentraciones superiores a 200 puntos del Índice Metropolitano de Calidad del Aire, IMECA) y reducir de manera notable las concentraciones promedio; reducir la concentración de partículas de 10 micrómetros y partículas con 2.5 micrómetros o menos de diámetro aerodinámico (PM_{10} y $PM_{2.5}$); eliminar violaciones a la norma sobre concentraciones de monóxido de carbono y reducir las concentraciones promedio de dióxido de azufre.

Para alcanzar esas metas, el plan establece un programa de diez años integrado por 89 medidas. Las partes principales del programa son: reducción de emisiones generadas por el sector del transporte; reducción de emisiones de la industria y servicios; conservación de recursos naturales y zonas verdes del área metropolitana; integración de políticas y planes sobre la calidad del aire, planificación urbana y de transporte; reducción de exposiciones a concentraciones altas de contaminantes; promoción de la educación y toma de conciencia sobre el ambiente y desarrollo de la tecnología; armonización de planes para abordar la calidad del aire y control de emisiones de gases de efecto invernadero.



En el Programa para Mejorar la Calidad del Aire de la Zona Metropolitana de la Ciudad de México (PROAIRE 2002-2010) se le ha conferido gran importancia al uso del transporte masivo para reducir las emisiones de contaminantes criterio del sector en cuestión y, en ese sentido, en su apartado 8.1.20 (Establecimiento de Corredores de Transporte) contempla el establecimiento de corredores de transporte en vialidades de la Ciudad como parte de las medidas a instrumentar entre los años 2002 y 2010.

3.2 Programa Integral de Transporte y Vialidad del Distrito Federal.

El Plan de Transporte Integral del Distrito Federal requiere: a) eliminar en forma gradual los subsidios al sector del transporte y reestructurar el sistema de precios de pasaje; b) integrar el sistema de transporte con el Estado de México y promover el cambio modal creando corredores metropolitanos; c) reforzar el sistema de transporte público mediante el diseño e implementación de prioridades para autobuses; d) reducir la carga ambiental del sector del transporte en la zona atmosférica de la ZMVM; y e) apoyar mejoras de tecnología en el sector del transporte introduciendo mejores autobuses y tecnologías ferroviarias. Entre sus acciones concretas, se plantea la creación de corredores estratégicos de transporte público como una medida para mejorar la red vial primaria de la Ciudad (apartado 4.3.1-PITV).

El primer objetivo apoya el desarrollo de un ambiente comercial sustentable para el sector del transporte público. Las autoridades han empezado a reducir subsidios en términos reales; pero éstos aún representan una fracción importante del costo total de operaciones del Metro y los autobuses. Por otra parte, el Gobierno recibe un ingreso considerable por impuestos sobre el consumo de combustible, parte del cual se dedica a objetivos ambientales de la ciudad. El sector del transporte ha empezado el control de emisiones en la zona atmosférica de la ZMVM, adoptando normas más estrictas para emisión de contaminantes y la circulación de vehículos; y mediante la definición de medidas que promoverían la integración de planes de desarrollo urbano y planes de transporte. Sin embargo, esos planes aún están en la etapa preliminar de desarrollo.

También se está considerando tomar medidas para controlar el número de vehículos en áreas muy congestionadas y otras para dirigir el tránsito a fin de aligerar la paralización total del tráfico y crear áreas peatonales en el centro comercial de la ciudad. Además, el gobierno piensa fomentar la introducción de vehículos de baja emisión de contaminantes y promover un mayor nivel de utilización del Metro. En 1999 se completó un estudio para reestructurar el sistema de concesiones de rutas de autobuses, pero sus recomendaciones aún no se implementan por falta de recursos. La promoción de un cambio modal es parte dominante de la estrategia del gobierno. La medida estratégica que está considerándose es crear corredores de transporte para vehículos de gran capacidad que contaminen poco. Esos corredores están concibiéndose como medidas que harían más eficiente el uso de infraestructura y desplazarían pasajeros en forma integrada con el Metro a velocidades más altas, costos más bajos por pasajero y menores emisiones por pasajero-kilómetro y, al mismo tiempo, aligerarían la congestión vehicular.



Programas que soportaron el proyecto

Se espera que el cambio modal contribuya a una reducción en la emisión de gases de efecto invernadero por pasajero-kilómetro. Un elemento fundamental de la promoción del cambio modal será la introducción deliberada de vehículos que emitan poco carbono y contaminantes. Eso se está logrando al atraer usuarios al Metro y a la línea del Tren Ligero y mediante planes para la introducción de tecnología moderna de autobuses. También pueden especificarse autobuses con nueva tecnología para los corredores de transporte urbano, pero primero existe la necesidad de obtener información bien fundada para sustentar la decisión. El gobierno del Distrito Federal concibe la calidad del aire y la política de transporte como la conjunción de diversos factores complementarios que ayudarían a mejorar las condiciones del transporte en la ciudad.

3.3 Proyectos de Transporte y la Secretaría del Medio Ambiente.

A principios del 2002, el Gobierno del Distrito Federal, a través de la Secretaría del Medio Ambiente (SMA), inició negociaciones con el Banco Mundial con la finalidad de gestionar recursos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) para el desarrollo de una estrategia integral de transporte ambientalmente más amigable en la ZMVM, que fortalezca los esfuerzos de los gobiernos de la ZMVM al permitir la implementación y realización de proyectos y medidas vinculados e incluidos en el PROAIRE 2002-2010 y consideradas como acciones prioritarias en el PITV.

Como resultado de dichas negociaciones, en octubre del 2002 el GEF, a través del Banco Mundial como agencia ejecutora, aprobó un financiamiento para apoyar la implantación del “Proyecto Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables en Transporte”. El proyecto promoverá el uso sostenible de transporte en corredores estratégicos en la Ciudad de México a lo largo de 5 años. La integración de estos corredores permitirá el uso más eficiente y ambientalmente amigable del transporte público, incluyendo el transporte no motorizado.

Paralelamente, el Gobierno japonés realizó, a través del Programa para el Desarrollo de Recursos Humanos (PHRD por sus siglas en inglés), una donación al Gobierno del Distrito Federal (GDF) para la realización de la segunda fase del “Proyecto de la Calidad del Aire y Transporte para la Zona Metropolitana del Valle de México”. Dicha donación se concertó, de manera coordinada, entre la SMA y la Secretaría de Transporte y Vialidad del Gobierno del Distrito Federal. Sus principales objetivos son:

- a) Definir los corredores estratégicos de transporte público con mayor viabilidad en la ZMVM;
- b) Fortalecer la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA); y
- c) Ampliar la capacidad institucional para el desarrollo de estos proyectos así como para fortalecer la gestión de los esquemas financieros que permitan la implantación de proyectos incluidos en el PROAIRE 2002-2010.

Derivado de lo anterior, y con especial énfasis en la definición de corredores estratégicos de transporte público, se realizaron diversos estudios y proyectos ejecutivos cuyo objetivo era la implantación de dos primeros corredores estratégicos (Insurgentes y Eje 8 Sur).



El desarrollo, implantación y evaluación de los proyectos mencionados con antelación, requirieron de la participación de las entidades que los integran. Sin embargo, en ambos casos la responsabilidad primaria para el cumplimiento de los objetivos planteados y la obtención de los resultados esperados ha sido responsabilidad de la SMA, entidad ejecutora de los recursos.

Para ello, la SMA creó la Unidad de Implantación de Proyecto (UIP), a través de la cual se desarrollaron las funciones de una manera coordinada, eficiente, eficaz y documentada. La UIP fue la responsable de ejecutar, supervisar y administrar los recursos de los dos proyectos, y es la encargada de las operaciones de los proyectos, el monitoreo, la evaluación, la contratación de servicios de consultoría y la adquisición de los bienes necesarios.



4. PROTOCOLO DE PRUEBAS.

4.1 Flota de Prueba.

Para medir el éxito de la creación de corredores y realizar la evaluación de autobuses con nuevas tecnologías de combustibles para sustitución de vehículos contaminantes en la ZMVM del programa “Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables al Transporte”, es necesario desarrollar una línea base que es el punto de comparación de las medidas que se tomen en dicho proyecto. Esta comparación permite decidir si las medidas adoptadas tuvieron o no el éxito esperado, así mismo permite decidir cuales son los pasos a seguir para el éxito del proyecto.

En la realización de las pruebas definidas en este protocolo, se contó con dos flotas vehiculares. La primera, consistió en vehículos que actualmente circulan en la ZMVM y su evaluación tiene el propósito de servir como Línea Base, estos vehículos serán designados “vehículos de referencia”. La segunda flota estuvo integrada por vehículos de prueba que, posiblemente, podrían ser introducidos para funcionar en el nuevo sistema de Corredores Estratégicos de Transporte, estos serán designados “vehículos de prueba”. A continuación se describirá cada una de estas flotas así como el tipo de prueba a la que cada vehículo fue sometido.

Se deberán distinguir dos puntos de evaluación en cuanto a emisiones: la disminución de emisiones debido a la introducción de los corredores y la disminución de emisiones debido a la introducción de nuevas tecnologías.

Tal combinación escenario tecnológico - escenario operativo permite obtener información acerca de las emisiones que tendrían lugar en cada uno de los siguientes escenarios conjuntos:

- Autobuses de referencia operando de acuerdo a la dinámica de flujo actual.
- Autobuses de referencia operando en un corredor de transporte.
- Autobuses de prueba operando de acuerdo a la dinámica de flujo actual.
- Autobuses de prueba operando en un corredor de transporte.

Con motivo de contar con suficiente información para lograr evaluar cada uno de los escenarios antes mencionados, fueron evaluados varios vehículos que actualmente operaban en la ZMVM, particularmente, sobre la Avenida de los Insurgentes. Así, la flota de vehículos de referencia esta integrada por vehículos a diesel, GNC, GLP y gasolina. En el caso particular de los vehículos a diesel, uno de ellos estuvo equipado con un sistema de control de emisiones, por lo que utilizó un tipo de diesel con un contenido de azufre de 50 ppm (el diesel comúnmente utilizado en la ZMCM contiene 350 ppm de azufre).



La flota de vehículos de referencia está compuesta de la siguiente manera:

Tabla 4.1 Vehículos de Referencia.

| Vehículo | Tipo de Combustible | Número |
|---|-----------------------------|----------|
| Autobús a diesel | Diesel de 350 ppm de azufre | 2 |
| Autobús a diesel | Diesel de 50 ppm de azufre | 1 |
| Autobús a diesel con control de emisiones | Diesel de 50 ppm de azufre | 1 |
| Microbús a GNC | GNC | 1 |
| Microbús a GLP | GLP | 1 |
| Microbús a Gasolina | Gasolina | 1 |
| Microbús Dual | Gasolina / GNC | 1 |
| Total | | 8 |

Respecto a la flota de prueba, en total se evaluaron 14 autobuses equipados con sistemas de propulsión a diesel, gas natural e híbrido (diesel-eléctrico), incluyendo los 3 modelos de autobuses articulados que pertenecen a Metrobús. Estos vehículos fueron operados en condiciones normales de la Ciudad de México durante el tiempo que permanecieron en el país.

Se determinó que los vehículos articulados utilizaran cotidianamente el diesel de 50 ppm ya que vehículos de tales dimensiones con este tipo de combustible constituyen una opción viable en el corto y mediano plazo para su introducción en el sistema de corredores.

Así, la flota de vehículos de prueba quedó definida de la siguiente manera:

Tabla 4.2 Vehículos de Prueba en la Componente III.

| Tecnología | Marca | Longitud (m) | Certificación | Combustible | Número |
|--------------|-----------|--------------|---------------|-------------|-----------|
| Diesel | Mercedes | 12.6 | EPA 98 | D 50 ppm S | 1 |
| | Mercedes | 11.4 | EPA 98 | D 15 ppm S | 1 |
| | Mercedes | 10 | EPA 2004 | D 15 ppm S | 1 |
| | Scania | 15 | EURO III | D 15 ppm S | 1 |
| | Scania | 18 | EURO III | D 50 ppm S | 1 |
| | Volvo | 12 | EURO III | D 15 ppm S | 1 |
| GNC | Ankai | 11.2 | EPA 2004 | GNC | 1 |
| | Faw | 16 | EPA 2004 | GNC | 1 |
| | Busscar | 11.2 | EPA 2004 | GNC | 1 |
| Híbrido | Allison | 12 | EPA 2004 | D 15 ppm S | 1 |
| | Eletrabus | 12 | EURO II | D 15 ppm S | 1 |
| Metrobús | Volvo | 18 | EURO III | D 350 ppm S | 1 |
| | Scania | 18 | EURO III | D 350 ppm S | 1 |
| | Fénix | 18 | S/C | D 350 ppm S | 1 |
| Total | | | | | 14 |

S/C: Sin control de emisiones.



4.2 Pruebas de Campo.

Las diferentes pruebas que se realizaron a los autobuses son las siguientes:

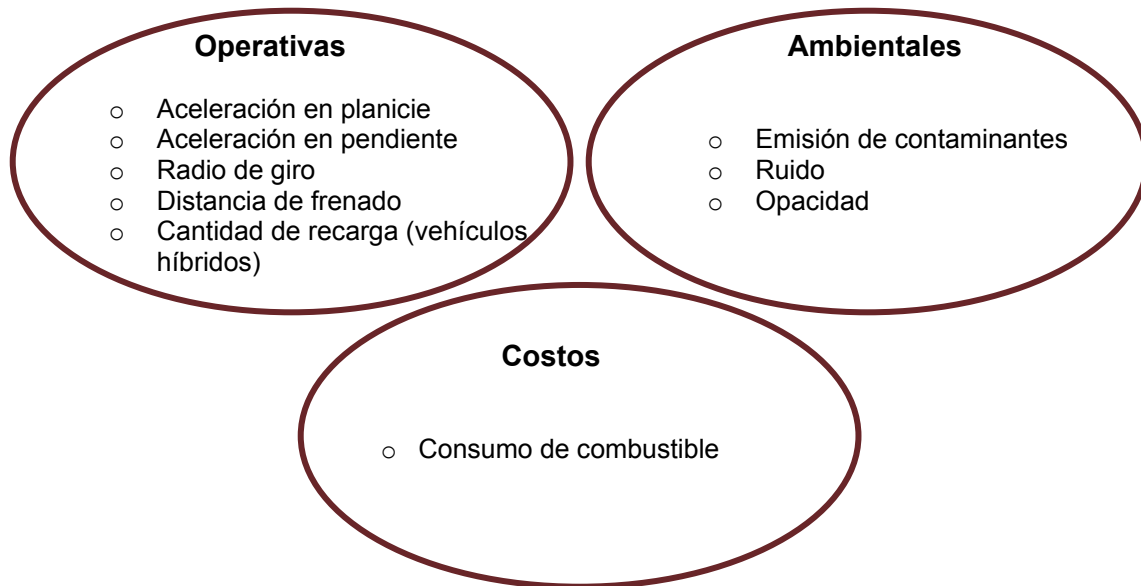
Tabla 4.3 Pruebas de Campo Realizadas.

| Aspecto a evaluar | | Pruebas | Norma aplicable | Información del fabricante |
|-------------------|---|---|-----------------------------------|---|
| Desempeño | Desempeño del motor bajo condiciones de la Ciudad de México | Aceleración en planicie | SAE J1491 | Ubicación del motor Potencia Tipo de inyección Tipo de transmisión Altura al piso Tipo de suspensión Radio de giro Tipo de dirección Especificaciones técnicas. Manual de operación Manual de mantenimiento |
| | | Aceleración en pendiente | N/E | |
| | Aspectos que influyen en el desempeño del autobús | Radio de giro | SAE J695 | |
| | Recarga de la batería State Of Charge (SOC). Solo para el caso de autobuses híbridos. | Cantidad de recarga | N/E | |
| Tránsito | Peso | Inspección | N/E | Dimensiones generales |
| | Dimensiones | | | Tara y peso bruto vehicular |
| Seguridad | Frenos | Distancia de frenado | SAE J1250 FEB80 SAE J299 JAN80 | Tipo de frenos |
| | Puertas | Inspección | N/E | Sistema de accionamiento de puertas Sistemas de seguridad de puertas |
| | Sistemas de emergencia | Inspección | N/E | Sistemas de protección contra incendios Salidas de emergencia |
| | Ventilación | Inspección | | Sistema de ventilación |
| Costos | Consumo de combustible | Consumo de combustible | SAE J1376 JUL82 Dir. 93/116/EC | Tipo de combustible |
| | Costos de operación y Mantenimiento | Monitoreo continuo | N/E | Programa de mantenimiento programado |
| Ambientales | Emisiones de contaminantes | Evaluación con equipo de monitoreo a bordo. Evaluación con dinamómetro de chasis | N/E | Certificación del motor |
| | Ruido | Niveles de ruido interior Niveles de ruido exterior | NOM-080-ECOL-1994 | N/E |
| | Opacidad | Niveles de opacidad | SAEJ1667 | |

N/E: No hay norma Equivalente.



Las pruebas antes mencionadas pueden separarse en tres grandes grupos:



4.3 Pruebas Operativas.

A continuación se describen las pruebas operativas indicadas en el protocolo de pruebas. Es importante destacar que la prueba de aceleración en pendiente no se llevó a cabo, ya que la Universidad de Virginia del Oeste, consideró que no se contaba con un espacio adecuado para realizar dicha prueba.

4.3.1 Prueba de Aceleración en Planicie.

Objetivo de la prueba.

Determinar la capacidad de aceleración en planicie de los autobuses de alta capacidad bajo las condiciones de la Ciudad de México.

Norma vigente.

El procedimiento a seguir se rige por la Norma SAE J1491.

Requerimientos físicos.

- El lugar de la prueba debe ser una vía seca, derecha, pavimentada y plana.
- La longitud de la vía de prueba debe ser suficiente para lograr acelerar el vehículo hasta 20, 40 y 60 km/h y llevarlo a una parada segura.
- El vehículo de prueba se debe encontrar cargado a su máxima capacidad.



Requerimientos de instrumentación.

- Radar doppler colocado debajo del vehículo, el cual sea capaz de registrar la velocidad del vehículo y la distancia de frenado.
- Error en la medición de velocidad menor que ± 0.80 km/h o $\pm 0.5\%$ de la velocidad actual (el que sea mayor).
- Error en la medición de la distancia menor que ± 0.15 m o $\pm 1.0\%$ de la distancia actual (el que sea mayor).

Aspectos a verificar antes de la prueba.

- Temperatura normal de operación del motor.
- Vehículo a máxima carga.
- Presión de las llantas en valores especificados por fabricante.

Procedimiento para la prueba.

- Se inicia la prueba teniendo el vehículo en reposo, el motor en ralentí y la transmisión engranada.
- Se acelera al máximo el vehículo hasta alcanzar la velocidad especificada (20 km/h, 40 km/h y 60 km/h), en el caso de vehículos con transmisión mecánica, se realizan los cambios de marcha a las revoluciones por minuto del motor especificadas por el fabricante.
- Se registra el tiempo y la distancia necesaria para alcanzar la velocidad especificada.
- Un mínimo de 3 lecturas debe ser registrado y el promedio obtenido en cada prueba.

Los resultados de la prueba de aceleración serán usados para verificar si el motor ha sido ajustado correctamente, así como para verificar si los parámetros del motor han sido modificados o manipulados.

Para los autobuses híbridos la curva tiempo vs. velocidad nos ayudará a identificar a que velocidad del vehículo aumenta la potencia de recarga de la batería y como varía esto después de varias pruebas.

4.3.2 Prueba de Aceleración en Pendiente.

Objetivo de la prueba.

Determinar la capacidad de aceleración en pendiente de los vehículos del proyecto de transporte bajo las condiciones de la Ciudad de México.

Requerimientos físicos.

- El lugar de la prueba debe ser una vía seca, derecha y pavimentada.
- El vehículo de prueba se debe encontrar cargado a su máxima capacidad.



Requerimientos de instrumentación.

- Radar doppler colocado debajo del vehículo, el cual sea capaz de registrar la velocidad del vehículo y la distancia de frenado.
- Error en la medición de velocidad menor que ± 0.80 km/h o $\pm 0.5\%$ de la velocidad actual (el que sea mayor)
- Error en la medición de la distancia menor que ± 0.15 m o $\pm 1.0\%$ de la distancia actual (el que sea mayor)

Aspectos a verificar antes de la prueba.

- Temperatura normal de operación del motor.
- Vehículo a máxima carga.
- Presión de las llantas en valores especificados por fabricante.

Procedimiento para la prueba.

- Se inicia la prueba teniendo el vehículo en reposo, el motor en ralentí y la transmisión engranada.
- Se acelera al máximo el vehículo hasta alcanzar la longitud especificada para la prueba (0.2 km o 1.0 km), en el caso de vehículos con transmisión mecánica, se realizan los cambios de marcha a las revoluciones por minuto del motor especificadas por el fabricante.
- Se registra el tiempo y la velocidad transcurrida en el recorrido.
- Un mínimo de 3 lecturas debe ser registrado y el promedio obtenido en cada prueba.

Gradiente de aceleración.

Las mediciones del comportamiento de la aceleración se llevaron a cabo a través de gradientes: El propósito de la prueba es verificar si el comportamiento de la aceleración es aceptable y no es resultado de una mala forma de manejo. Este procedimiento de medición es muy importante para motores a GNC.

Para los híbridos se consideran cambios referentes al desempeño según SOC de la batería de tracción.

4.3.3 Radio de Giro.

Objetivo de la prueba

Medir el radio de giro de los autobuses de alta capacidad.

Requerimientos físicos

- Sistema de medición con exactitud de 0.5 cm
- Lugar plano y de superficie regular



Procedimiento para la prueba de radio de giro

Basándose en la norma SAE J695, con fecha de diciembre del año 1989, el procedimiento es el siguiente:

- Verificación de alineamiento de ruedas.
- Revisión de los ángulos frontales de corte para las ruedas, conforme a especificaciones del fabricante.
- Cargar la unidad a su capacidad de carga útil.
- Realizar la prueba sobre un terreno seco, efectuando giros en ambas direcciones a baja velocidad. La dirección debe ser girada al máximo ángulo de corte sosteniéndola en esa posición.
- Efectuar dos giros completos antes de tomar las mediciones.
- Se realiza un giro a la izquierda y se realizan las siguientes mediciones:
 - Circunferencia descrita justo por debajo de la máxima extensión delantera de la unidad del lado derecho (r1).
 - Circunferencia descrita por el exterior de la llanta delantera derecha (r2).
 - Circunferencia descrita por el interior de la llanta delantera derecha (r3).
 - Circunferencia descrita por el exterior de la llanta trasera izquierda (r4).

Para la determinación del radio de giro fue necesario primero determinar el punto medio del ancho de la rueda delantera derecha al efectuar el giro hacia la izquierda.

4.3.4 Distancia de Frenado.

Objetivo de la prueba

Determinar la capacidad de frenado de los vehículos del proyecto de transporte bajo las condiciones de la Ciudad de México.

Norma vigente

El procedimiento a seguir se rige por la Norma SAE J1250 FEB80 y SAE J299 JAN80.

Requerimientos físicos

- El lugar de la prueba debe ser una vía seca, derecha, pavimentada y plana.
- La longitud de la vía de prueba debe ser suficiente para permitir la entrada del vehículo a velocidad especificada (32 km/h y 60 km/h).
- El vehículo de prueba se debe encontrar cargado a su máxima capacidad.



Requerimientos de instrumentación

- Radar doppler colocado debajo del vehículo, el cual sea capaz de registrar la velocidad del vehículo y la distancia de frenado.
- Error en la medición de velocidad menor que ± 0.80 km/h o $\pm 0.5\%$ de la velocidad actual (el que sea mayor).
- Error en la medición de la distancia menor que ± 0.15 m o $\pm 1.0\%$ de la distancia actual (el que sea mayor).
- Dispositivo indicador del inicio del frenado (sensor de movimiento del pedal de freno que detecte el movimiento a los primeros 3.20 mm de recorrido del pedal) o accionador del contador de distancia de frenado. El tiempo de respuesta del sistema no debe ser mayor de 0.020 segundos.

Aspectos a verificar antes de la prueba

- Temperatura normal de operación en el motor.
- Vehículo a máxima carga.
- Presión de las llantas en valores especificados por fabricante.
- Chequeo de fugas en el sistema:
- Para Sistema de aire y sistema de aire asistido hidráulicamente:
 - Con el motor apagado y los frenos sin aplicar, notar si hay sonidos o evidencia de fugas.
 - Con el motor apagado, aplicar fuertemente el freno y mantener por un minuto. Registrar la caída de presión después de la aplicación inicial y notar cualquier sonido o evidencia de fugas.
 - Para el sistema hidráulico y asistido (Vacío o hidráulico)
 - Apagar el motor y mover el freno del pedal con una ligera presión por 10 segundos y luego presionar fuertemente por 10 segundos. Verificar cualquier cambio en la altura del pedal mientras se busca por sonidos o evidencias de fugas.
- Verificar que las condiciones de operación del vehículo sean seguras.

Procedimiento para la prueba

- El vehículo debe entrar al área de prueba lo más cerca posible a la velocidad especificada (8 km/h, 32 km/h y 60 km/h).
- Mantener la velocidad hasta el lugar prescrito en el cual deberá realizar la maniobra de frenado, procurando llevar el vehículo a una parada completa en la mínima distancia utilizando los sistemas ABS y/o ralentizador (en caso de existir), y siguiendo un procedimiento normal de frenado.
- Registrar la velocidad inicial y la distancia de viaje del vehículo desde el momento en que se aplica movimiento al pedal de frenado.
- Registrar cualquier problema o inestabilidad.
- Un mínimo de 3 lecturas debe ser registrado y el promedio obtenido.

Es importante tener atención a la fuerza que se aplica al pedal del freno durante el proceso de frenado, ya que se degradan las propiedades de frenado (comportamiento del



sistema de frenado después de repetir un frenado brusco) y el comportamiento del frenado de emergencia.

Para autobuses híbridos parte de la energía del frenado es recuperada. Sin embargo por seguridad y para aprovechar la mayor parte de la energía liberada cuando se lleva a cabo el proceso de frenado en un vehículo pesado, la energía de frenado es dividida entre la energía del sistema de frenado convencional y la del motor / generador eléctrico. Para llevar a cabo esta prueba se deben consultar los manuales del autobús.

4.3.5 Prueba de Recarga de la Batería (SOC) en Vehículos Híbridos.

Esta prueba es relevante para un buen ajuste del método de prueba para las actuales características del vehículo y prepararlo para las pruebas de emisiones y consumo de combustible. Para vehículos que no pueden ser recargados externamente y no tienen un cambio en su modo de operación, se distinguen dos tipos por el método de la SAE (para vehículos ligeros) para aquellos que tienen un ΔSOC significativo (estado de recarga de batería) con el ciclo recomendado. Para vehículos con un ΔSOC significativo con el ciclo recomendado con una simple prueba que debe de cumplir la siguiente condición:

$$\Delta E_{\text{batt}} / E_{\text{consumed fuel}} \approx \Delta Ah * V_{\text{batt}} / E_{\text{consumed fuel}} \leq n\%, \text{ with e.g. } 2 \leq n \leq 4$$

El nivel de n esta en 1% en la propuesta de SAE.

Objetivo de la prueba

Determinar la capacidad de recuperación de energía regenerativa del sistema de frenos en los autobuses híbridos.

Norma vigente

Ninguna

Requerimientos de la prueba

- Temperatura ambiente entre 7 y 38°C. Este margen representa el rango de temperaturas adoptado por la EPA.
- El lugar de la prueba debe ser una vía seca, derecha, pavimentada y plana.
- El vehículo de prueba se debe encontrar cargado a su máxima capacidad.

Requerimientos de instrumentación

- Amperímetro de DC de banda ancha, el cual deberá tener un período de integración menor que 0.05 segundos, de tal forma que los cambios bruscos de corriente puedan ser acomodados sin introducir errores significativos de integración.
- Potenciómetro AC para medir la energía de recarga.
- Voltímetro.
- Amperímetro.



Aspectos a verificar antes de la prueba

- Ventilación y refrigeración de las baterías.
- Protección a la exposición a alto voltaje.
- Cualquier otra precaución de seguridad que debiera ser considerada para el desarrollo de las pruebas.

Esta metodología permite, para ciertos niveles de tolerancia entre el SOC inicial y el SOC final, evita la corrección de datos que se encuentran efectivamente en un cambio neto igual a cero en los niveles de energía.

Un aspecto importante a considerar en la medición de emisiones y consumo de combustible en vehículos de tecnología híbrida, es monitorear la actividad de las baterías del autobús con el fin de asegurar que la cantidad neta de energía eléctrica descargada para completar un determinado ciclo de conducción es mantenida bajo un cierto nivel de tolerancia.

El estado de carga (Δh) de las baterías del autobús debe ser medido en forma continua a razón de 1 hz o más, durante el desarrollo de toda la prueba. Este registro de datos se obtiene mediante la integración temporal de las mediciones de corrientes instantáneas utilizando un amperímetro que tenga incorporado el sistema de integración (DC/AC).

4.4 Pruebas Ambientales.

A continuación se describen los equipos empleados para realizar las pruebas ambientales indicadas en el protocolo de pruebas, incluyendo los principios de operación tanto del Dinamómetro de Chasis de la Universidad de Virginia del Oeste como del sistema portátil RAVEM de la empresa Motor, Combustible e Ingeniería de Emisiones.

4.4.1 Pruebas en Dinamómetro de Chasis.

El objetivo de este estudio es caracterizar las emisiones en el Distrito Federal de un grupo de autobuses distintos que usan un control común y avanzado de motores, así como tecnologías de postratamiento y combustible de bajo contenido de azufre. Se midieron las emisiones de diez vehículos, a saber: seis con motor diesel, tres de gas natural y uno híbrido diesel-eléctrico. Las emisiones de los vehículos diesel se obtuvieron utilizando diesel estándar (350 ppm de azufre), diesel con un nivel de azufre medio (50 ppm) y 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), esto por el mal manejo en su transporte, ya que no se tomaron las medidas necesarias de limpieza previa del tanque.

Previo al inicio de las pruebas, se desarrolló un recorrido representativo denominado "Ciclo de Manejo de la Ciudad de México", a partir de la información obtenida de la circulación de los autobuses del Distrito Federal. El ciclo es representativo de autobuses a baja y media velocidad y autobuses operando en condiciones de corredor de transporte.



4.4.1.1 Descripción de Laboratorio.

Las emisiones de los vehículos examinados fueron medidas en el West Virginia University Transportable Heavy-Duty Vehicle Emissions Laboratory (TransLab). Dicho laboratorio se construyó con el propósito de recopilar datos de las emisiones de los vehículos de carga pesada en uso²³⁴. El laboratorio está 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 los autobuses para llevar a cabo las pruebas de emisión.

4.4.1.2 Dinamómetro.

El dinamómetro de chasis utilizado en la investigación se colocó sobre un semi-remolque con ruedas movibles que se pueden colocar sobre el 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 4.1). 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 ruedas volantes giratorias que se seleccionan para cada prueba. Se engranaron diferentes combinaciones de ruedas volantes giratorias para permitir la simulación de las cargas inerciales representativas del peso vehicular deseado (Figura 4.2). 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 registran 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.

² 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.

³ 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.

⁴ 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.



Figura 4.1 El adaptador de cubo del eje del vehículo a la unidad de absorción de potencia.



Figura 4.2 Las ruedas volantes se utilizaron para simular la inercia del vehículo.

4.4.1.3 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 (NOx), 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. La emisión completa de los gases del vehículo a prueba se



canalizaron en un dispositivo Muestreador de Volumen Venturi de Flujo Constante Crítico (CFV-CVS por sus siglas en inglés) y se mezcló con aire ambiental filtrado HEPA en el túnel de disolución principal. Este túnel mide 18 pulgadas (45 cm) de diámetro y una longitud de 20 pies (6.1 m). 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 dilución. 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 quími-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 kilómetro (g/km). 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 4.3 muestra el laboratorio.



Figura 4.3 El laboratorio Móvil de la WVU probando el autobús híbrido-eléctrico ALLISON.



4.4.1.4 Muestreo de Especies no Reguladas.

En este estudio también fueron medidas algunas especies no reguladas, como el óxido nitroso (N_2O) y los aldehídos. 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 Innova 1302 consiste en una línea de muestreo de acero inoxidable, una bomba de muestreo de cabezal precalentado, un medidor 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 Innova 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 4.4.



Figura 4.4 Analizador foto acústico Innova 1302 y el sistema de muestreo.



4.4.1.5 Vehículos y Combustibles.

La Tabla 4.4 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 Ankai 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 el laboratorio móvil para 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. 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 4.4 Vehículos Examinados en dinamómetro de chasis por la WVU .


| Nombre Ref. | Vehículo | Transmisión | Peso Bruto (libras) | Peso Neto (libras) | Capacidad de Pasajeros | Lectura del Odómetro (millas) | Motor | Control de Emisiones |
|-------------|--------------------|----------------------|---------------------|--------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|
| ALLISON | 2004 ALLISON | Híbrido | 35,000 | 29,000 | 113 | 36,846 | 2002 Cummins ISB-230 | CRT Filtro de Partículas y Modulo de Catálisis |
| ANKAI | 2004 Ankai | 5 Velocidades Auto. | 32,150 | 22,700 | 90 | 1,055 | 2004 Cummins B5.9-230G | Catalizador Nelson |
| BUSSCAR | 2004 BUSSCAR | 7 Velocidades Manual | 33,025 | 23,425 | 91 | 693 | 2004 Cummins BG-230 | Catalizador Johnson-Matthey |
| FAW | 2004 Allied Motors | 4 Velocidades Auto. | 48,025 | 33,175 | 140 | 553 | 2004 Cummins CG280 | Catalizador Johnson-Matthey 28277 |
| MB10 | 2004 Marcopolo | 5 Velocidades Manual | 26,996 | 17,800 | 87 | 13,749 | 2004 Mercedes-Benz OM924LA | Ninguno |
| RTP1 | 2002 Marcopolo | 5 Velocidades Auto. | 30,220 | 21,250 | 85 | 89,333 | 2002 Mercedes-Benz OM906LA | Ninguno |
| RTP3 | 2002 Marcopolo | 5 Velocidades Auto. | 30,070 | 21,100 | 85 | 100,142 | 2002 Mercedes-Benz OM906LA | Johnson-Matthey |
| SCANIA15 | 2003 Scania | 4 Velocidades Auto. | 50,040 | 35,400 | 139 | 19,819 | 2003 SCANIA DSC9-260 | Catalizador Oxidativo |
| SCANIA18 | 2004 Scania | 4 Velocidades Auto. | 57,025 | 40,075 | 161 | 998 | 2004 SCANIA DC9-300 | Ninguno |
| VOLVO12 | 2004 Volvo | 5 Velocidades Auto. | 32,050 | 22,500 | 91 | 4,282 | 2004 VOLVO VE D7C-300 | Ninguno |



En la tabla siguiente se muestra el calendario de las pruebas realizadas por la Universidad de Virginia del Oeste, que se llevaron a cabo a lo largo de 2 meses, octubre y noviembre del 2004.

Tabla 4.5 Calendario de las pruebas realizadas por la Universidad de Virginia del Oeste.

| Vehículos de Prueba | | | 2004 | | | | | | | |
|---------------------|---------------|-------------|---------|------|------|------|-----------|------|------|------|
| Autobús | Certificación | Combustible | Octubre | | | | Noviembre | | | |
| | | | Sem1 | Sem2 | Sem3 | Sem4 | Sem1 | Sem2 | Sem3 | Sem4 |
| ALLISON | EPA 2004 | D15 | | | | | | | | |
| ANKAI | EPA 2004 | GNC | | | | | | | | |
| Busscar | EPA 2004 | GNC | | | | | | | | |
| FAW | EPA 2004 | GNC | | | | | | | | |
| MB10 | EPA 2004 | D15 | | | | | | | | |
| RTP1 | EPA 98 | D50 | | | | | | | | |
| RTP3 | EPA 98 | D50 | | | | | | | | |
| SCANIA15 | EURO III | D15 | | | | | | | | |
| SCANIA18 | EURO III | D50 | | | | | | | | |
| VOLVO12 | EURO III | D15 | | | | | | | | |

 Prueba en dinamómetro de chasis
 D15: Diesel con 15 ppm de azufre.
 D50: Diesel con 50 ppm de azufre.

Durante el periodo de pruebas se utilizaron tres combustibles diesel diferentes, incluyendo diesel comercial denominado D2, diesel de bajo azufre denominado D50 y diesel de ultra-bajo contenido de azufre denominado D15. Con la finalidad de evaluar un diesel diferente al contenido en el tanque del autobús en turno y evitar contaminaciones, se purgó una cantidad considerable de diesel de las líneas de alimentación y retorno, colocándolo en tanques de 55 galones independientes del autobús.

Las propiedades de cada tipo de diesel utilizado fueron determinadas a partir de muestras analizadas por Salbot LP (Carson, Ca).

Tabla 4.6 Propiedades seleccionadas de los combustibles diesel utilizados en las pruebas.

| Propiedad | D15 | D50 | D2 | CNG |
|------------------------------------|--------|--------|--------|--------------|
| Poder Calorifico (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/m3 |
| % 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 se almacenó en STE. Los contenedores habían almacenado previamente aceite lubricante que normalmente contiene altos niveles de azufre.

Como parte del aseguramiento de calidad se realizaron muestreos del diesel de 15 y 50 ppm para analizarlos posteriormente y determinar la concentración de azufre presente en el diesel. En la Tabla 4.7 se tienen los resultados obtenidos por el Centro de Transporte Sustentable, quien fue el encargado de realizar dicho análisis.

Tabla 4.7 Análisis a muestras del diesel de 15 y de 50 ppm.

| Fecha | Identificación de la Muestra | Método de Análisis | Contenido de Azufre [ppm] | |
|-----------|------------------------------|--------------------|---------------------------|----------|
| | | | Teórica | Análisis |
| Dic-03 | D15-001 | ASTM D7039 | 15 | 12.6 |
| Dic-03 | D15-002 | ASTM D7039 | 15 | 12.2 |
| Jul-04 | D15-003 | ASTM D7039 | 15 | 9.8 |
| 24-feb-05 | D15-004 | ASTM D7039 | 15 | 10.8 |
| 24-feb-05 | D15-005 | ASTM D7039 | 15 | 15.1 |
| 26-ago-05 | D15-006 | ASTM D7039 | 15 | 9.5 |
| 26-ago-05 | D15-007 | ASTM D7039 | 15 | 9.8 |
| 1-mar-05 | D50-001 | ASTM D7039 | 50 | 97.6 |
| 1-mar-05 | D50-002 | ASTM D7039 | 50 | 96.3 |
| 10-may-05 | D50-004 | ASTM D7039 | 50 | 60.6 |
| 10-may-05 | D50-005 | ASTM D7039 | 50 | 38.1 |
| 26-may-05 | D50-006 | ASTM D7039 | 50 | 46.3 |
| 23-ago-05 | D50-008 | ASTM D7039 | 50 | 48.4 |
| 23-ago-05 | D50-009 | ASTM D7039 | 50 | 50.1 |
| 12-oct-05 | D50-010 | ASTM D7039 | 50 | 47.4 |
| 12-oct-05 | D50-010 | ASTM D7039 | 50 | 82.9 |
| 12-oct-05 | D50-010 | ASTM D7039 | 15 | 10.2 |
| 12-oct-05 | D50-010 | ASTM D7039 | 15 | 9.8 |

La Universidad de Virginia del Oeste realizó un análisis de la composición del combustible GNC utilizado por los vehículos a gas natural tal y como se presenta la Tabla 4.8. El combustible GNC tiene un poder calorífico más bajo, 1037 BTU/scf y una densidad de 20.7 gramos por pie cúbico estándar.



Tabla 4.8 Análisis de composición del combustible 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 |

Rendimiento de Combustible.

El rendimiento 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 (M_{fuel}) se calcula mediante la siguiente fórmula:

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

Ecuación 4.4.1 Cálculo del consumo de combustible.

Donde:

- α Es la proporción atómica de hidrógeno y carbono como se determina mediante el análisis de combustible.
- HC_{mass} Es la masa de hidrocarburos medida durante las pruebas.
- CO_{mass} Es la masa de monóxido de carbono medida durante las pruebas.
- CO_{2mass} Es la masa de dióxido de carbono medida durante las pruebas.

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.



4.4.1.6 Ciclos de Manejo Utilizados.

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 4.5) representa la operación a baja velocidad, el segmento MX2 (Figura 4.6) representa la operación a velocidad mediana y el segmento MX3 (Figura 4.7) 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 4.8) con una duración total de 3000 segundos. 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".

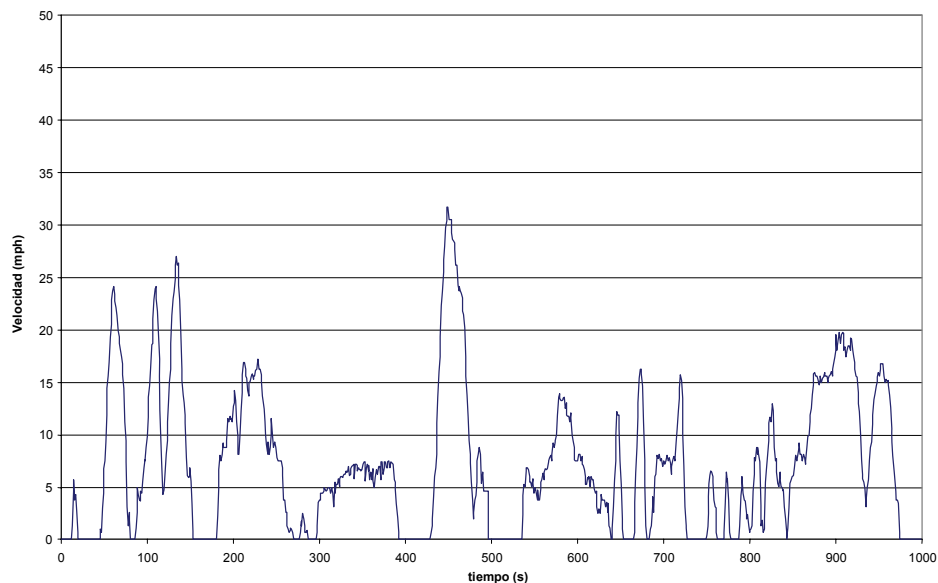


Figura 4.5 Segmento MX1 del Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal.

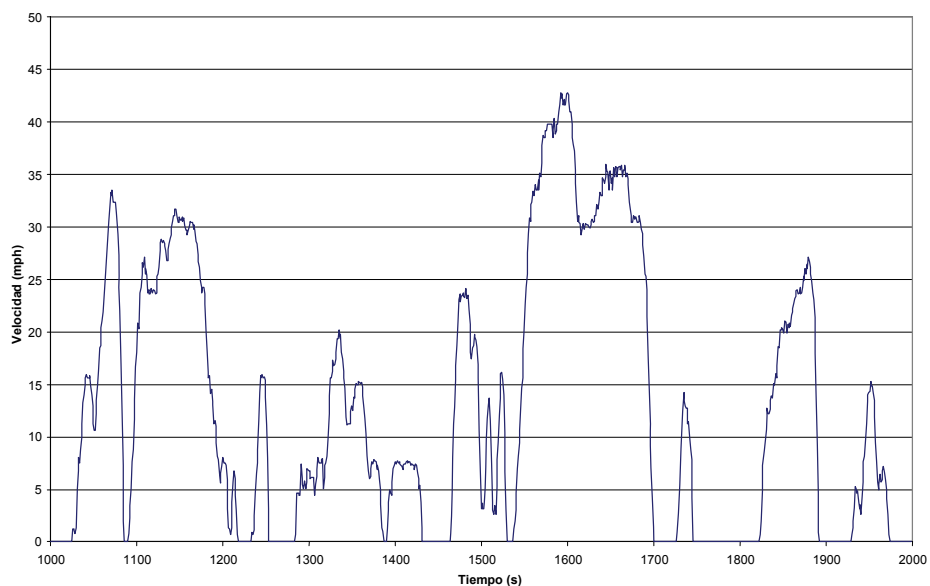


Figura 4.6 Segmento MX2 del Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal.

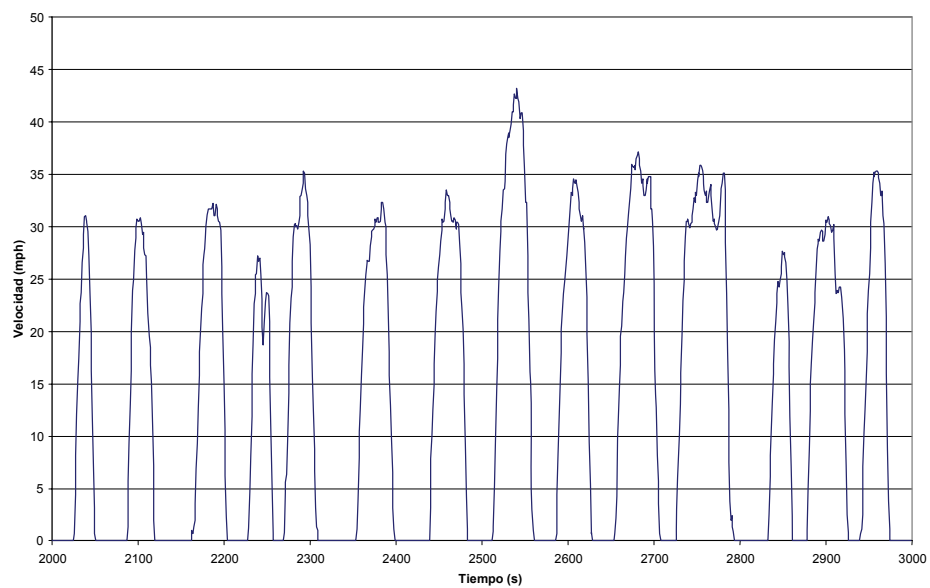


Figura 4.7 Segmento MX3 del Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal.

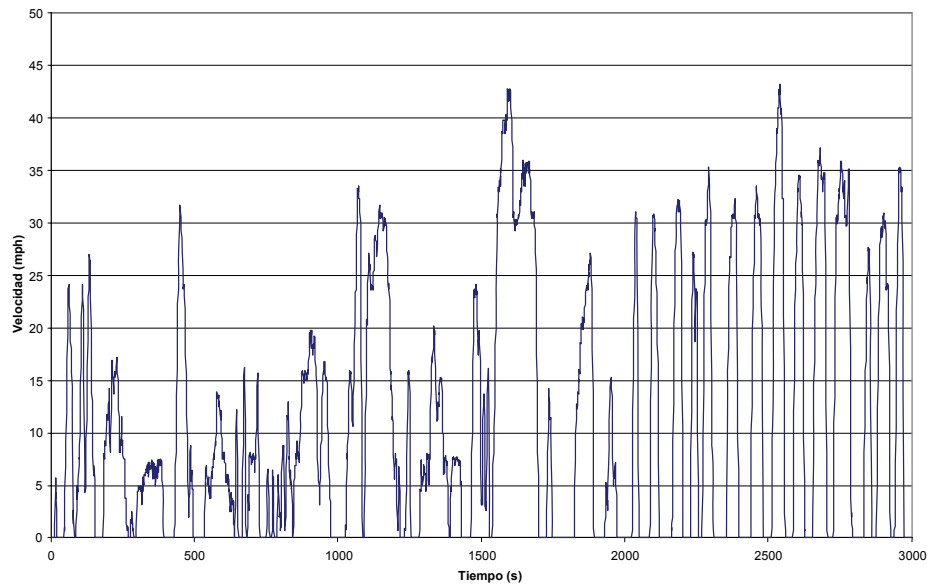


Figura 4.8 Ciclo de Manejo de Autobuses en el Distrito Federal (MCS).

También se evaluó cada vehículo utilizando el Ciclo Europeo Transitorio (ETC por sus siglas en inglés), desarrollado por FIGE (Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen) Aachen, Alemania en 1994. En este ciclo están representadas diferentes condiciones de manejo divididas 3 partes, urbana, rural y carretera, tiene una duración total de 1,800 segundos (600 segundos por segmento). El segmento urbano contiene frecuentes arranques, paradas y operación en punto muerto, con una velocidad máxima de 49.6 km/h (31 millas/hora). El segmento rural inicia con una etapa de 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 4.9 tenemos la representación grafica del ciclo ETC.

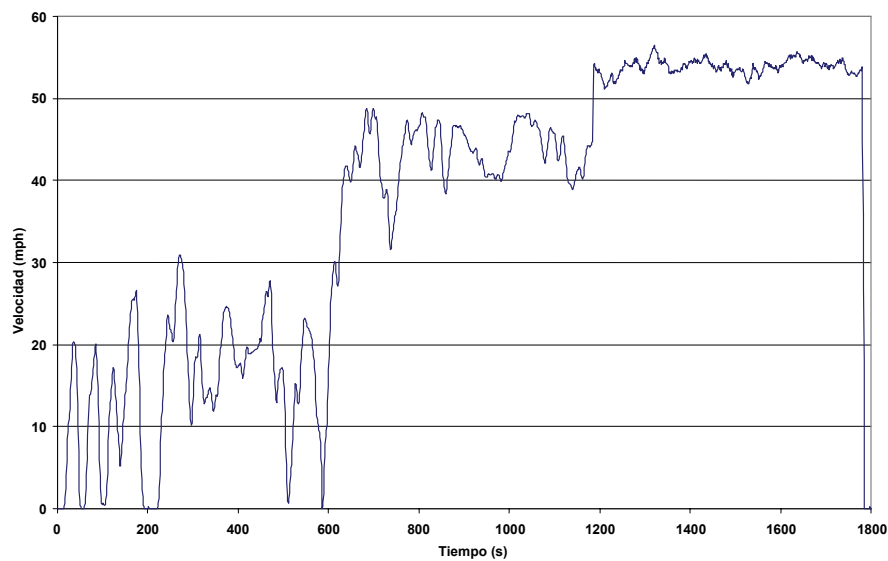


Figura 4.9 Ciclo Europeo Transitorio (ETC).



4.4.1.7 Procedimientos de Pruebas en Dinamómetro de Chasis.

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.

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 4.4.2 de la siguiente manera:

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

Ecuación 4.4.2 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, se utiliza la Ecuación 4.4.2 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.



4.4.1.8 Control de Calidad.

Como un elemento del Programa de Control de Calidad, los investigadores de la WVU realizaron medidas de NO_x, PM y CO₂. En el caso de NO_x, se utilizaron dos analizadores distintos. La Figura 4.10 indica que había una gran similitud entre los dos analizadores. Se midieron las PM utilizando el método del 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.

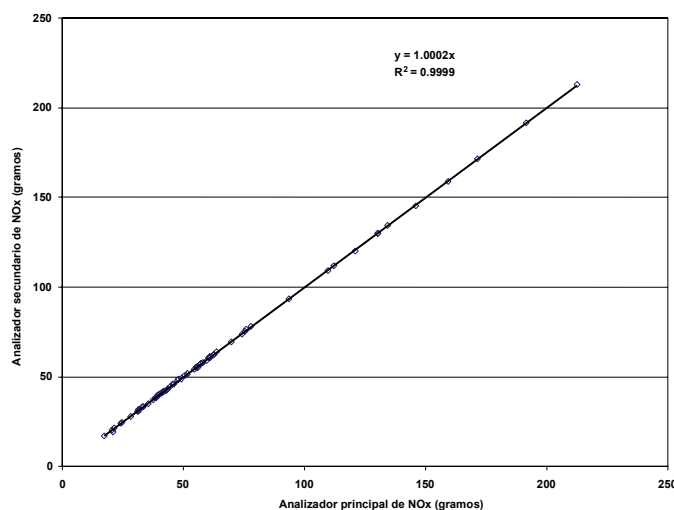


Figura 4.10 Comparación de las Mediciones de los Óxidos de Nitrógeno con los Analizadores Paralelos.

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 PM⁵. Gilbert et al⁶, examinaron la relación durante el ajuste de la temperatura de muestreo y la tasa de flujo de la TEOM. Kelley y Morgan⁷ encontraron que la TEOM indicaba menos masa, entre un 20% y un 25%, que el filtro. Otros investigadores, entre ellos Moosmuller et al⁸, han confirmado que las mediciones en la TEOM registran menos masa que un filtro. La Figura 4.11 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.

⁵ SAE J2711.

⁶ 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.

⁷ 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.

⁸ 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.

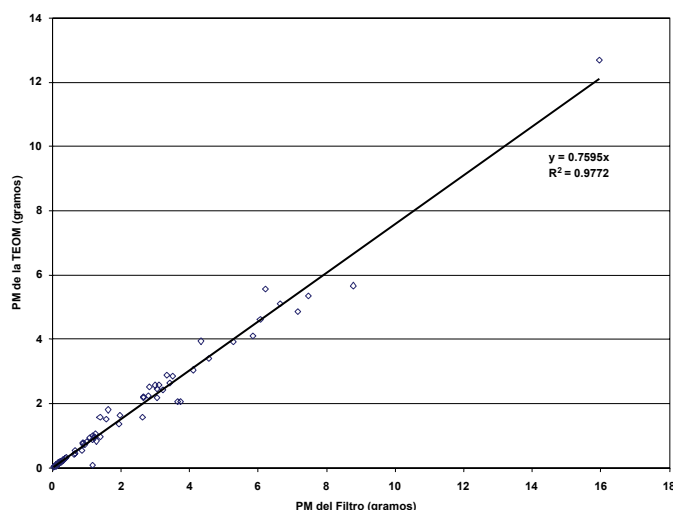


Figura 4.11 Emisiones de partículas medidas con filtro y dispositivo TEOM.

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.

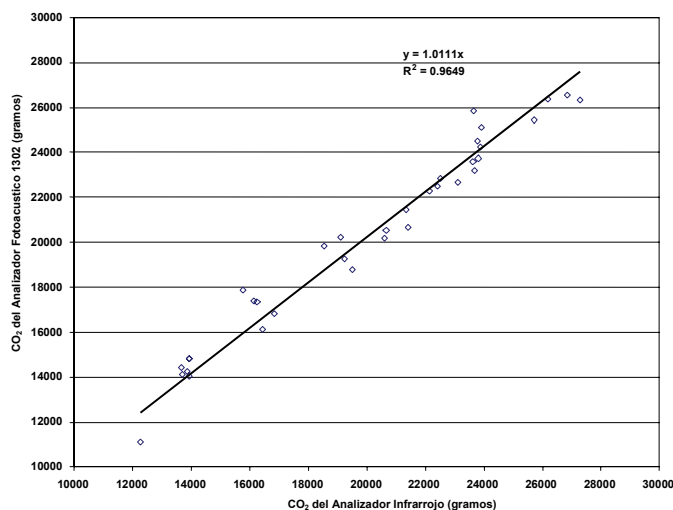


Figura 4.12 Emisiones de dióxido del carbono con los analizadores foto acústico e infrarrojo.



4.4.2 Sistema RAVEM.

El RAVEM (Ride Along Vehicle Emissions Measurement) es uno de los nuevos tipos de sistemas de medición de emisiones portátiles que han empezado a estar disponibles en los últimos años. La tecnología del RAVEM fue desarrollada por la empresa Motor, Combustible e Ingeniería de Emisiones, Inc. (EF&EE por sus siglas en inglés).

El sistema, propiedad de la SMA fue el segundo sistema RAVEM que se ha producido.

4.4.2.1 Vehículos de Prueba.

Las pruebas de emisiones se realizaron a bordo de 17 autobuses y 4 microbuses, tal como se muestra en la Tabla 4.9. Los autobuses evaluados incluyen 12 con sistemas convencionales de diesel, dos vehículos híbridos diesel-eléctricos y tres que utilizan GNC en motores de mezcla pobre, esto es, en la relación aire – combustible se tiene una cantidad de combustible menor de la estequiometricamente necesaria ($\lambda > 1$)⁹. Todos los autobuses, excepto el Busscar, tenían transmisiones automáticas. Dos autobuses a diesel y uno de los híbridos tenían instalados filtros catalíticos de partículas para diesel (DPF por sus siglas en inglés) de la marca Johnson Matthey modelo CRTTM. Todos los autobuses a GNC fueron equipados con convertidores catalíticos de dos vías (C2V). Los cuatro microbuses incluyeron uno a gasolina en un motor estequiometrico, uno que fue modificado para utilizar GLP, uno modificado para utilizar GNC y uno dual, el cual puede utilizar ya sea gasolina o GNC y fue probado utilizando cada combustible. Los microbuses estaban originalmente equipados con convertidores catalíticos de 3 vías (C3V), pero no se verificó que estuvieran intactos. Tomando en cuenta los resultados de las pruebas de emisiones, todo indica que el C3V en el microbús dedicado a gasolina estaba severamente dañado.

Los dos autobuses Mercedes/Marco Polo Torino y los dos de marca International pertenecen a la flota regular de la Red de Transporte de Pasajeros (RTP). Los 3 autobuses de Metrobús también forma parte de la flota en servicio de este nuevo sistema de transporte de la Ciudad de México. Tres de los cuatro microbuses también estaban en circulación regular, mientras que el microbús dual es propiedad de la empresa Combustibles Ecológicos Mexicanos S.A. de C.V. (ECOMEX). El resto de los autobuses fueron proporcionados por las empresas armadoras con fines demostrativos.

Al aplicar las pruebas, todos los autobuses fueron cargados, aproximadamente, al 70% de su capacidad de pasajeros, utilizando contenedores de agua en lugar de pasajeros.

⁹ Air Pollution from Motor Vehicles, standards and technologies for controlling emissions. The World Bank.1996.



Tabla 4.9 Vehículos de prueba con el sistema RAVEM.

| Armadora | Modelo/ Descripción | Identificador | Motor | | Control de Emisiones | Combustible | Peso [kg] | |
|---|------------------------|-------------------------|-----------|-----|-------------------------|------------------------|-----------|--------|
| | | | Modelo | HP | | | Prueba | Bruto |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | |
| Mercedes Benz | RTP No. 12-592 | RTP1 | OM 906-LA | 230 | EPA 1998 | D50 | 12,020 | 14,000 |
| International | RTP No. 23-995 | RTP2 | DT466E | 215 | EPA 1998 | D350 | 13,994 | 15,800 |
| Volvo | 12 m | VOLVO 12 | D7C | 300 | Euro 3 | D15 | 14,131 | 16,000 |
| Scania | 18-m Articulado | SCANIA 18 | DC9 | 310 | Euro 3 | D50 | 25,957 | 29,500 |
| Mercedes Benz | 10 m Boxer | MB 10 | OM924-LA | NA | EPA 2004 | D15 | NA | 8,063 |
| Mercedes Benz | 11.4 m Torino | MB 11 | OM924-LA | 230 | EPA 1998 | D15 | NA | NA |
| Mercedes Benz | 12.3 m Torino | MB 12 | OM926-LA | 280 | EPA 1998 | D50 | NA | NA |
| Metrobuses a Diesel | | | | | | | | |
| Scania | Articulado (18 m) | RTP | DC9 | 340 | EURO 3 | D350 | 25,957 | 29,500 |
| Volvo | Articulado (18 m) | CISA | DH12-340 | NA | EURO 3 | D350 | 25,957 | 29,500 |
| Fénix | Articulado (18 m) | Fénix | DDC | NA | sin control | D350 | NA | NA |
| Autobuses a Diesel con controles adicionales de emisiones | | | | | | | | |
| Mercedes Benz | RTP No. 12-569 | RTP3 | OM 906-LA | 230 | EPA 1998 + DPF | D50 | 12,020 | 14,000 |
| International | RTP No. 23-1022 | RTP4 | DT466E | 215 | sin control+DPF | D15 | 13,994 | 15,800 |
| Gillig/Allison | "Magic Bus" híbrido | ALLISON | ISB | 260 | Hybrid+DPF | D15 | 13,646 | 15,890 |
| Eletrabus | híbrido | ELETRABUS | NA | 163 | Hybrid+Euro 2 | D15 | NA | NA |
| Autobuses de mezcla pobre a Gas Natural Comprimido | | | | | | | | |
| Busscar | Urbanuss Plus | BUSSCAR | B5.9-230G | 230 | EPA 2004 con C2V | GNC | N/A | 15,760 |
| FAW AMI | CA6160 | FAW | C8.3G+ | 280 | EPA 2004 con C2V | GNC | 13,706 | 15,500 |
| Anhui Ankai | HFF6110GK5 | ANKAI | B5.9-230G | 230 | EPA 2004 con C2V | GNC | 14,350 | 16,000 |
| Microbuses con motor a Gasolina | | | | | | | | |
| Chevrolet | Ruta 3 No. 030473 | M- GNC | NA | NA | C3V | GLP | NA | NA |
| NA | Ruta 2 No. 1133 | M- GLP | NA | NA | C3V | GNC | NA | NA |
| NA | Ruta 2 No. 21403 | M-Gasolina | NA | NA | C3V | Gasolina s/plomo | NA | NA |
| Chevrolet | Microbús Dual | M-D- Gasolina / M-D-CNG | NA | 270 | C3V | Gasolina s/plomo - GNC | NA | 8,000 |

NA: No aplica

Las pruebas con el sistema RAVEM se realizaron a lo largo de 12 meses, divididos en 3 campañas. En la Tabla 4.10 se muestra el mes en el cual se realizó cada campaña, la prueba con RAVEM y los vehículos participantes, cabe mencionar que la primera campaña fue la más larga y en la que se evaluaron más vehículos.



Tabla 4.10 Calendario de las pruebas realizadas con el sistema RAVEM.

| Vehículos de Prueba | | 2004 | | 2005 | | | | | | | | | |
|---------------------|-------------|------|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| ID | Combustible | Nov | Dic | Ene | Feb | Mar | Abr | May | Jun | Jul | Ago | Sep | Oct |
| MB12 | D 50 | | | | | | | | | | | | |
| MB11 | D 15 | | | | | | | | | | | | |
| MB10 | D 15 | | | | | | | | | | | | |
| SCANIA18 | D 50 | | | | | | | | | | | | |
| VOLVO12 | D 15 | | | | | | | | | | | | |
| ALLISON | D 15 | | | | | | | | | | | | |
| ANKAI | GNC | | | | | | | | | | | | |
| FAW | GNC | | | | | | | | | | | | |
| BUSSCAR | GNC | | | | | | | | | | | | |
| ELETRABUS | D 15 | | | | | | | | | | | | |
| CISA* | D 350 | | | | | | | | | | | | |
| RTP* | D 350 | | | | | | | | | | | | |
| Fénix* | D 350 | | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | D 50 | | | | | | | | | | | | |
| RTP 2 | D 35 | | | | | | | | | | | | |
| RTP 3 | D 50 | | | | | | | | | | | | |
| RTP 4 | D 350 | | | | | | | | | | | | |
| M- GLP | GLP | | | | | | | | | | | | |
| M-D | GNC | | | | | | | | | | | | |
| M-D | Gasolina | | | | | | | | | | | | |
| M- GNC | GNC | | | | | | | | | | | | |
| M- Gasolina | Gasolina | | | | | | | | | | | | |

*Vehículos pertenecientes a Metrobús.

| | |
|--|-----------|
| | Campaña 1 |
| | Campaña 2 |
| | Campaña 3 |

4.4.2.2 Principios de Operación.

El sistema RAVEM se describe ampliamente en 2 publicaciones^{10,11}, por lo cual su principio de operación sólo se describe brevemente. El sistema RAVEM se basa en un muestreo de flujo-parcial proporcional de volumen constante (CVS por sus siglas en inglés) a partir del tubo de escape del vehículo. El principio CVS es ampliamente utilizado en la medición de emisiones vehiculares ya que los ajustes de dilución son tales, que la concentración de contaminantes en el túnel de dilución del CVS es proporcional a la tasa

¹⁰ C.S. Weaver and L.E. Petty "Reproducibility and Accuracy of On-Board Emission Measurements Using the RAVEM™ System", SAE Paper No. 2004-01-0965, March, 2004.

¹¹ Weaver, C.S. and M.V. Balam-Almanza, "Development of the 'RAVEM' Ride-Along Vehicle Emission Measurement System for Gaseous and Particulate Emissions", SAE Paper No. 2001-01-3644.



de flujo de masa en el escape del vehículo. La concentración de contaminantes puede medirse sin grandes problemas, mientras que medir las tasas de flujo de masa resulta costoso y difícil de medir con exactitud, especialmente en condiciones de tránsito, al circular en los caminos.

La masa total de emisiones contaminantes durante un ciclo de manejo dado, es igual a la integral de la tasa de flujo de masa de contaminantes durante dicho ciclo. En un sistema CVS, este valor integrado puede obtenerse fácilmente integrando sólo la concentración medida, la tasa de flujo de masa del CVS funciona únicamente como una constante de multiplicación. Esta integración puede llevarse a cabo tanto numéricamente como físicamente. La tasa de flujo del escape no entra directamente en el cálculo, lo cual hace innecesario su medición. En la Figura 4.13 se tiene un diagrama esquemático del sistema RAVEM. Excepto por el sistema de muestreo isocinético en la parte superior de la figura, este diagrama es muy parecido a un sistema CVS convencional de dilución sencilla para la medición de emisiones.

En el caso de los gases, el sistema RAVEM utiliza tanto la integración numérica como la física. Las concentraciones de NO_x, CO₂ y CO en el gas de escape diluido son registradas segundo a segundo durante cada prueba. Además, muestras integradas de los gases de escape diluidos y aire de dilución se colectan en bolsas de Tedlar® durante la prueba y son analizadas más tarde para determinar NO_x, CO₂ y CO y (opcionalmente) otros contaminantes.

En el muestreo CVS para material particulado, la integración de la muestra es llevada a cabo físicamente, haciendo pasar la mezcla del escape diluida, con una tasa de flujo constante y controlada, a través de un filtro pre-pesado. El peso ganado por el filtro es después dividido por el volumen de mezcla que pasó a través de él para determinar la concentración promedio de partículas durante el ciclo de prueba.

Los métodos convencionales de un laboratorio de emisiones definidos por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos¹² (U.S. EPA por sus siglas en inglés) y la Oficina de Recursos del Aire de California¹³ (CARB por sus siglas en inglés) utilizan CVS de flujo completo, en los cuales todo el flujo de gases de escape es extraído y diluido. El requerimiento del aire necesario resultante, hace que un sistema CVS de flujo completo sea impráctico para sistemas portátiles; de cualquier forma, el diseño del sistema RAVEM resuelve este obstáculo extrayendo y diluyendo sólo una fracción del flujo total del escape, utilizando un sistema patentado de muestreo isocinético proporcional¹⁴. Dado que el sistema de muestreo del RAVEM toma solamente una pequeña fracción del flujo total del escape, los requerimientos de aire para dilución y el tamaño del túnel de dilución pueden ser reducidos a niveles competitivos para una operación portátil.

¹² 40 CFR 86, Subpart N "Emission Regulations for New Otto-Cycle and Diesel Heavy-Duty Engines; Gaseous and Particulate Exhaust Test Procedures".

¹³ California Exhaust Emission Standards and Test Procedures for 1985 and Subsequent Model Heavy-Duty Diesel Engines and Vehicles" as amended on February 26, 1999, California Air Resources Board.

¹⁴ U.S. Patent No. 6,062,092. "System for Extracting Samples from a Stream", May 16, 2000.



La medición de concentración de contaminantes en el sistema RAVEM sigue los métodos especificados por la EPA y en el estándar 8178 de ISO. Los contaminantes medidos durante el programa de correlación fueron los siguientes:

- Óxidos de Nitrógeno (NOx) por análisis de químiluminiscencia de la muestra diluida del escape,
- Monóxido de Carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂) mediante análisis infrarrojo no dispersivo de la muestra diluida del escape sin humedad;
- Material particulado (PM) mediante colección del material particulado en filtros pre-pesados de fibra de vidrio de silicato de boro cubiertos con teflón, seguido de un post acondicionamiento y repesado de los filtros expuestos.

La capacidad de medir aldehídos (con análisis HPLC de cartuchos DNPH) y compuestos orgánicos volátiles (con análisis de Cromatografía de Gases) fueron adicionados posteriormente al sistema RAVEM.

4.4.2.3 Sistema RAVEM y Operación.

- El sistema RAVEM esta compuesto de los siguientes subsistemas claves:
- Sistema de dilución de volumen constante
- Sistema de muestreo isocinético
- Sistema de bolsas de muestreo
- Sistema analizador de gases
- Sistema de muestreo de partículas
- Sistema de muestreo de cartuchos
- Sistema de procesamiento de datos y manejo
- Entradas auxiliares

Cada uno de éstos se describen brevemente a continuación.

Sistema de Dilución de Volumen Constante

Este subsistema constituye el corazón del sistema RAVEM. De acuerdo al diagrama de la Figura 4.13 , el soplador de velocidad variable proporciona una mezcla de aire / gas de escape fuera del túnel de dilución a una tasa constante (expresada en litros por minuto). El gas de escape “crudo” entra al túnel de dilución cerca del extremo superior, donde se mezcla con el aire de dilución filtrado. Las proporciones relativas de gas de escape y aire de dilución son controladas por el sistema de muestreo isocinético.

Los sensores del venturi, temperatura y presión entre el túnel de dilución y el soplador proporcionan los datos de retroalimentación necesarios para mantener este flujo constante. Este sistema es calibrado contra un medidor de flujo de masa térmico de alta precisión (no mostrado) para compensar cualquier desajuste. Aquí se requiere alta precisión, ya que cualquier error en el flujo de masa resultará en un error proporcional en los resultados finales.



Sistema de Muestreo Isocinético.

El sistema de muestreo isocinético comprende la punta de prueba, una línea de muestra aislada que conecta la punta de muestreo con la entrada del gas “crudo” en el túnel de dilución, y el sistema para controlar el flujo de muestreo y mantener las condiciones isocinéticas. El sistema de control utiliza puntas de presión estática en las superficies interna y externa de la punta de prueba, conectadas a un manómetro de sensibilidad diferencial. Cuando este manómetro marca cero, la presión interna y externa son iguales. Lo anterior requiere que las velocidades dentro y fuera de la punta de prueba sean también iguales – i.e. isocinético. La garganta en el extremo superior del túnel de dilución varía la presión dentro del mismo de acuerdo a las necesidades que se requieran para tener esta condición. El ventilador en el extremo de la garganta aumenta el rango de presiones del túnel de dilución para incluir ligeras variaciones, tanto positivas como negativas (comparadas con la presión atmosférica).

Dado que el sistema de control depende de igualar la presión estática medida dentro y fuera de la punta de prueba, cualquier fuga u otro problema en las puntas de presión, líneas de presión y en el sensor de presión diferencial que afecte la diferencia de presiones medidas, resultará en un sobre muestreo o sub muestreo de los gases de escape. Durante este programa de pruebas se utilizaron dos sondas isocinéticas: una (identificada como sonda Mx01) la cual se construyó exprofeso para el sistema RAVEM adquirido por la SMA y la segunda (identificada como sonda EF&EE) la cual se construyó con anterioridad y que se ha utilizado en el sistema RAVEM propiedad de la empresa EF&EE. Posteriormente se encontró que la sonda Mx01 generaba resultados inconsistentes, lo cual se cree que fue provocado por una fuga en una de las líneas diferenciales de presión.

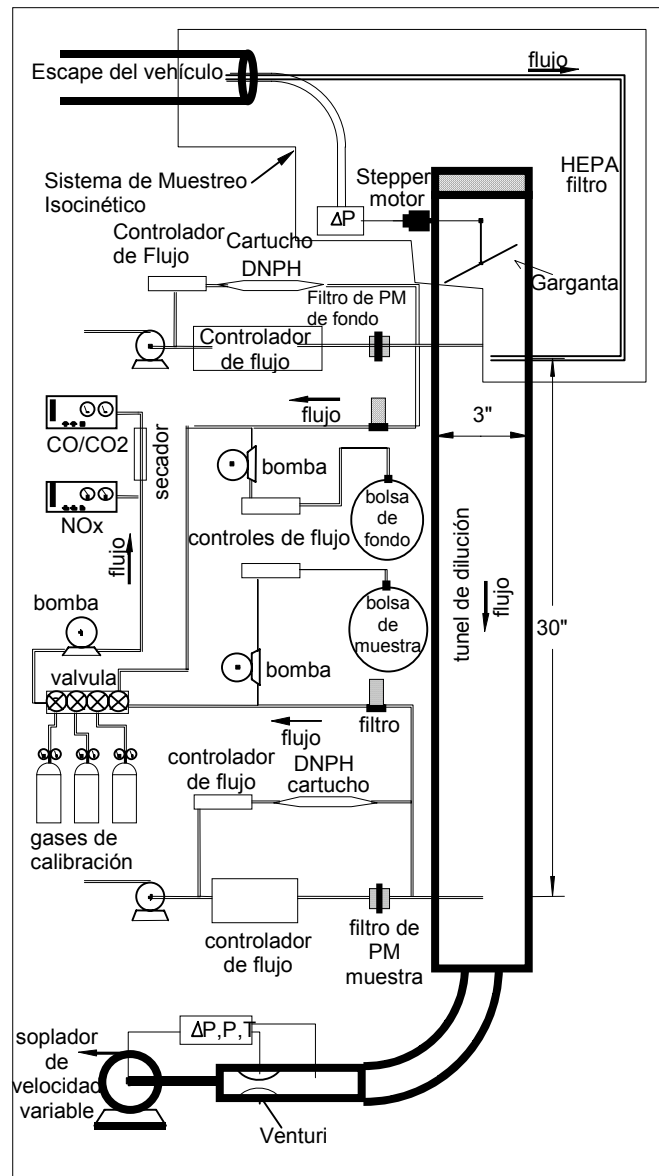


Figura 4.13 Diagrama esquemático del sistema RAVEM.

El efecto que provoca cualquier fuga en las líneas de presión diferencial pudo ser diferente (y probablemente mayor) durante las pruebas de correlación con el sistema de la WVU que en mediciones de emisiones normales en circulación. Típicamente, la sonda de muestreo isocinética del RAVEM se inserta en el extremo del escape que descarga a la atmósfera.

Sistema de Bolsas de Muestreo.

El sistema de bolsas de muestreo está diseñado para llenar un par de bolsas Tedlar en cada prueba. Una de las bolsas contiene una muestra integrada de los gases de escape provenientes del túnel de dilución y la otra, contiene una muestra integrada del aire de



dilución. Con respecto al uso de las bolsas Tedlar el sistema RAVEM cuenta con dos opciones: Un par de bolsas internas las cuales tienen una capacidad de aproximadamente 10 litros, o un par de bolsas externas con una capacidad de 60 litros las cuales son alimentadas a través de dos puertos de conexión rápida en el exterior de la unidad. El sistema está diseñado para permitir que las bolsas externas se intercambien rápidamente durante las pruebas, de tal forma que las bolsas de muestra colectadas en cada prueba se pueden analizar fuera del vehículo e.g. mediante cromatografía de gases. Un par de válvulas de 3 vías operadas manualmente permiten seleccionar entre las bolsas internas o las externas.

Para llenar las bolsas, se extrae gas de un puerto de muestreo en el túnel de dilución, éste pasa a través de un filtro y una pequeña bomba. Después llega a la válvula seleccionadora de bolsa mediante un controlador de flujo de masa y de ahí a la bolsa. Cualquier fuga en la bolsa de muestreo afectaría directamente a los resultados de emisiones. Una revisión de fugas se realiza en el proceso de vaciado de la bolsa de muestreo antes de realizar cada prueba.

Sistema Analizador de Gases.

El sistema analizador de gases comprende una bomba de muestreo, una válvula múltiple y analizadores convencionales de CO/CO₂ a temperatura ambiente y de NOx precalentado con una precisión de laboratorio instalados en una caja contra golpes de 19 pulgadas. El analizador de NOx es de la marca California Analytical Instruments modelo HCLD 400 equipado con un convertidor de NO a NO₂ que utiliza carbón activado. El analizador se mantiene a una temperatura de 60° C, lo cual hace innecesario secar la muestra para evitar condensaciones. Para el generador de ozono se alimenta aire seco comprimido a baja presión con una bomba equipada con un filtro y un cartucho secante.

El analizador de CO/CO₂ es de la marca California Analytical Instruments modelo ZRH el cual utiliza análisis infrarrojo no dispersivo (NDIR por sus siglas en inglés). El vapor de agua interfiere con la medición NDIR, especialmente en el caso del CO, por lo cual debe ser removido de la muestra; esto se logra al pasar la muestra a través de una membrana de intercambio de masa semi-permeable NafionMR. En el otro lado del intercambiador de masa se alimenta aire seco mediante una pequeña bomba que cuenta con un cartucho secante.

La válvula múltiple alimenta al analizador de cualquiera de las fuentes siguiente: los gases de escape diluidos del túnel de dilución, el aire de dilución que entra al túnel (para análisis del medio ambiente), la bolsa integrada de muestra, la bolsa integrada de aire ambiente, gas cero, gas span CO/CO₂, o gas span NOx; los últimos 3 gases mencionados son utilizados para calibración y se suministran al sistema RAVEM mediante puertos de conexión rápida ubicados en el exterior de la unidad. Durante una prueba de emisiones, se monitorea constantemente la concentración de gases de escape diluidos y se registra una vez por segundo. Cuando la prueba termina, se calibra el analizador y después se utiliza para determinar la concentración de contaminantes en las bolsas de muestra y de aire ambiente.



Dado que las lecturas segundo a segundo pueden verse afectadas por variaciones, vibraciones, cambios en la concentración de contaminantes de fondo y el manejo del vehículo, los datos de la bolsa normalmente son más exactos y generalmente son los que se reportan. El registro de los datos segundo a segundo es útil para examinar la variación de emisiones durante el ciclo de manejo y también constituyen un respaldo si le sucede algo a la muestra de las bolsas e.g. una falla en las bolsas durante la prueba.

Sistema de Muestreo de partículas.

Este sistema está compuesto por una bomba de vacío, 2 controladores de flujo, 2 válvulas de cierre y 2 soportes para filtros: uno para las PM de la muestra y otro para el aire de fondo diluido. Cada soporte para filtro contiene 2 filtros de 37 mm en serie. Los filtros utilizados son de fibra de vidrio de silicato de boro cubiertos con teflón y cumplen con las especificaciones de EPA y de ISO 8178 para medición de partículas provenientes del diesel. Por último, los 2 soportes utilizados están diseñados para ser conectados y removidos rápidamente del sistema de muestreo y se tienen que tener por lo menos 2 juegos de soportes, lo cual permite que mientras se lleva a cabo una prueba de emisiones, se cambien los filtros de la prueba anterior por unos nuevos para la prueba siguiente.

Durante una prueba de emisiones, se abren las válvulas de cierre, permitiendo la entrada de los gases de escape diluidos y del aire de dilución en su respectivo juego de filtros. El gas filtrado pasa a través de controladores de flujo a la bomba de vacío, donde es expulsado al ambiente. Los filtros expuestos al aire de dilución proporcionan una muestra en “blanco” para cada prueba, permitiendo la corrección por efectos de cambios en la humedad, presión atmosférica y PM en el ambiente (incluyendo especies condensables) presentes en el aire de dilución filtrado. La experiencia nos ha mostrado que dichas correcciones pueden llegar a ser entre 0.01 y 0.02 g/BHP-hr.

Sistema de Muestreo de Cartuchos.

El sistema de muestreo de cartuchos no se tenía en las campañas de prueba de emisiones reportadas aquí. A continuación se describe únicamente para completar la información del sistema propiedad de la SMA y porque se incluyó sólo en la campaña final de pruebas.

Este sistema tiene un diseño similar al de las PM descrito anteriormente y comprende dos válvulas de cierre, dos soportes para tubos de muestreo de vidrio SKC de 6 mm de diámetro, dos controladores de flujo y una bomba. La diferencia con el sistema de PM es que está diseñado para tasas de flujo mucho menores (i.e. 0 a 2 l/min en lugar de 0 a 30 l/min) y en que se alimenta del flujo de muestra filtrado, el cual alimenta también las bolsas Tedlar, en lugar de alimentarse directamente del túnel de dilución.

Para medir la concentración de carbonilos tales como el formaldehído, acetaldehído y acetona, los cartuchos de muestra son cargados con 2 tubos de vidrio de 6 mm que contienen sílica gel impregnada con Dinitrofenilhidrazina (DNPH por sus siglas en inglés). El gas de la muestra y del aire de dilución de los puertos de muestreo se hace pasar por los filtros, después por los cartuchos, donde cualquier carbonilo presente reacciona con el



DNPH quedando retenido en él. Después se remueven, se colocan en una hielera para mantener la temperatura a aproximadamente 4° C y poder transportarlas al laboratorio donde se mantienen en un refrigerador hasta que se analicen mediante Cromatografía Líquida de Alto Rendimiento (HPLC por sus siglas en inglés).

Sistema de Procesamiento de Datos y Manejo.

El sistema de procesamiento de datos y manejo esta compuesto por una computadora laptop, conectada a un sistema de la marca National Instruments Fieldpoint que contiene 24 canales analógicos a digitales, 8 canales digitales a analógicos, 36 salidas digitales, 8 entradas digitales de uso general y 4 entradas de conteo. Esto incluye algunos puertos de entrada y salida libres, lo cual facilita la interfase con sensores auxiliares.

El sistema RAVEM mide y registra varios datos en un formato segundo a segundo durante cada prueba de emisiones, incluyendo los datos crudos y concentraciones calculadas de CO, CO₂ y NO_x, la tasa de flujo CVS, la posición de la mariposa y las lecturas del manómetro diferencial. También se registran los datos de calibración relacionados con la alimentación cruda y concentraciones calculadas, lo cual hace posible recalculer los resultados segundo a segundo utilizando la calibración al final de la prueba. La temperatura de los gases de escape y más de 2 temperaturas auxiliares se graban segundo a segundo; además la temperatura, la presión barométrica y la humedad se registran al inicio de cada prueba. Todo lo anterior se guarda en archivos separados para cada prueba en un formato binario compacto.

4.4.2.4 Control de Calidad.

Los procedimientos de operación incluyen varias medidas de aseguramiento de calidad (AC). Dos procedimientos de AC clave son los de Recuperación de CO₂ y Consumo de Combustible. Durante el procedimiento de Recuperación de CO₂ se inyecta gas CO₂ de un cilindro a presión al túnel de dilución, y se compara la masa de CO₂ medida, con el cambio de peso del cilindro de CO₂. Esto confirma la precisión de la medición de flujo del CVS, así como el sistema de muestreo de gases y el analizador de CO₂. Como se mencionó antes, las pruebas de recuperación de CO₂ realizadas antes de las pruebas de correlación con el WVU, mostraron una discrepancia del 6 al 8%. La fuente de esta discrepancia, determinada posteriormente, fue una fuga a través de la perforación de un tornillo que estaba fuera de su lugar. Una vez que este tornillo fue sustituido, los chequeos de recuperación de CO₂ mostraron cercana correlación entre las emisiones de CO₂ medidas por el RAVEM y el cambio de peso del cilindro.

Los chequeos de consumo de combustible comparan la masa de combustible utilizada por el vehículo y el consumo de combustible calculado a partir de las emisiones de CO₂ y CO por balance de masa de carbono. Adicionalmente al chequeo del sistema de CVS y al sistema de muestreo de gases, este procedimiento verifica la operación del sistema isocinético de muestreo. La Tabla 4.11 resume las pruebas de consumo de combustible realizadas antes, durante y después del programa de correlación con el laboratorio del WVU.



Tabla 4.11 Resultados de recuperación de combustible del RAVEM.

| Fecha/hora de prueba | Vehículo | Ciclo de Manejo | Combustible Calculado | Combustible Medido | Calculado/Medido |
|----------------------|--------------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|------------------|
| 10/30/04 12:55 | RTP 23-955* | Módulo 23 | 1,161 | 1,317 | 88.1% |
| 10/31/04 19:17 | RTP 23-955* | Módulo 23 | 965 | 1,305 | 74.0% |
| 11/12/04 21:23 | RTP 23-955** | CBD | 914 | 905 | 101.0% |
| 1/7/05 12:34 | RTP 23-0992 ⁺ | Módulo 23 sin ralenti | 941 | 1,040 | 90.5% |
| 1/7/05 13:04 | RTP 23-0992 ⁺ | Ralenti continuo | 1,014 | 980 | 103.5% |
| 1/10/05 9:35 | RTP 23-1003 | Insurgentes Norte | 7,871 | 8,196 | 96.0% |
| 2/3/05 2:42 | Busscar GNC | Insurgentes Corredor | 6,932 | 6,750 | 102.7% |
| 2/4/05 4:06 | FAW GNC Bus | Insurgentes Corredor | 10,353 | 10,000 | 103.5% |
| 2/4/05 5:36 | FAW GNC Bus | Insurgentes Corredor | 9,229 | 8,800 | 104.9% |

* Prueba con punta defectuosa MX01

** Prueba de correlación con WVU (West Virginia University Emissions Lab)

+ Probablemente afectado por una fuga de combustible



5. RESULTADOS DE LAS PRUEBAS.

5.1 Pruebas Operativas.

A continuación se presentan los resultados de las pruebas operativas realizadas, en algunas participo la Universidad de Virginia del Oeste y otras fueron realizadas por personal de la componente en las instalaciones de STE.

5.1.1 Aceleración en Planicie.

Esta prueba fue supervisada por el personal de la Universidad de Virginia del Oeste y realizada en el Distrito Federal utilizando los autobuses de prueba. Esta prueba se aplicó a los 10 vehículos que se evaluaron con dinamómetro de chasis (ver Tabla 4.4) y a continuación se analizan los resultados obtenidos por el autobús articulado Scania de 18 metros de longitud (SCANIA 18).

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 5.1.1

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 de la gravedad

θ = pendiente de la 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 5.1 presenta los datos de la aceleración del autobús SCANIA18 junto con la curva de aceleración libre derivada sobre el mismo camino.

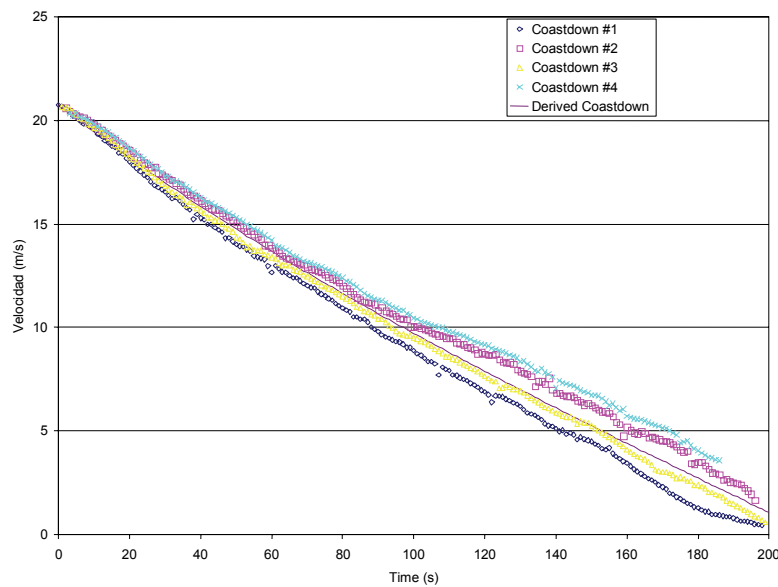


Figura 5.1 Datos de la aceleración libre en pista para el autobús SCANIA18.

Después, se procesaron los datos de velocidad-tiempo para obtener una curva de aceleración (dV/dt) versus la velocidad al cuadrado (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 5.1.2 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 5.2 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 5.1.2 con las constantes derivadas empíricamente de C_1 (-0.000119) y C_2 (-0.082455) se obtuvo un valor para C_D de 0.686 y para μ de 0.0084. Los valores normalmente utilizados por la Universidad de Virginia del Oeste para C_D y μ en un vehículo de son 0.79 y 0.009, respectivamente.

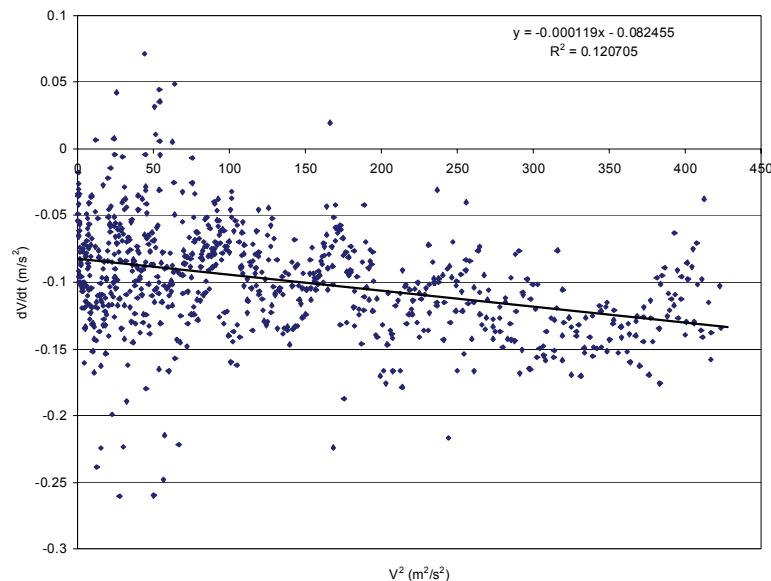


Figura 5.2 Tasa de deceleración para el autobús SCANIA18 (40,075 lb peso neto).

5.1.2 Radio de Giro.

El propósito de la prueba es medir el radio de giro de los autobuses conforme a la norma **SAE J695** y compararlo con la información técnica proporcionada por las diferentes armadoras; esta prueba fue llevada a cabo por personal de la Componente 3 y de STE.

Basándose en la norma **SAE J695** de carácter internacional, con fecha de diciembre del año 1989 el procedimiento a seguir fue el siguiente:

- Verificación de alineamiento de ruedas.
- Revisión de los ángulos frontales de corte para las ruedas, conforme a especificaciones del fabricante.
- Cargar la unidad a su capacidad de carga útil.
- Realizar la prueba sobre un terreno seco, efectuando giros en ambas direcciones a baja velocidad. La dirección debe ser girada al máximo ángulo de corte sosteniéndola en esa posición.
- Efectuar dos giros completos antes de tomar las mediciones.



Se tomaron las siguientes lecturas de la unidad al realizar un giro hacia la izquierda:

- a) Circunferencia descrita por el exterior de la llanta delantera derecha.
- b) Circunferencia descrita por el interior de la llanta delantera derecha.
- c) Circunferencia descrita por el exterior de la llanta trasera izquierda.
- d) Circunferencia descrita justo por debajo de la máxima extensión delantera de la unidad del lado derecho.

Para la determinación del radio de giro fue necesario determinar el punto medio del ancho de la rueda delantera derecha al efectuar el giro hacia la izquierda como se muestra en la siguiente Figura:

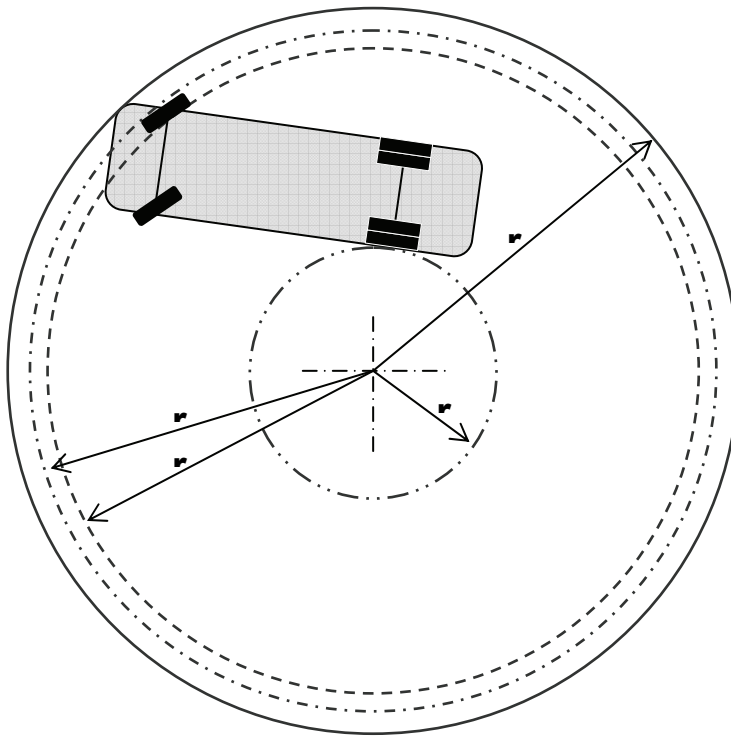


Figura 5.3 Prueba de radio de giro.

Donde:

- r1 Radio de giro de pared a pared.
- r2 Circunferencia descrita por el exterior de la rueda delantera derecha.
- r3 Circunferencia descrita por el interior de la rueda delantera derecha.
- r4 Circunferencia descrita por el exterior de la rueda trasera izquierda (radio de giro interior).



Resultados de las Pruebas

En la Tabla 5.1 se pueden observar los resultados de radio de giro obtenidos por las diferentes alternativas tecnológicas.

Tabla 5.1 Resultados de la prueba de radio de giro.

| Autobús | Radio de giro [m] | | | |
|---------------|-------------------|-------|-------|-------|
| | r1 | r2 | r3 | r4 |
| Volvo | 11.2 | 9.79 | 9.53 | 5.74 |
| Mercedes Benz | 10.56 | 9.26 | 9.01 | 5.19 |
| Ankai | 11.98 | 10.78 | 10.53 | 6.65 |
| Busscar | 11.16 | 9.88 | 9.53 | 5.77 |
| FAW | 11.55 | 10.8 | 10.55 | 6.2 |
| Eletrabus | 10.92 | 9.25 | 9 | 4.65 |
| Scania 15 | 11.606 | 6.207 | 5.95 | 4.622 |
| Scania 18 | 11.5 | 6.1 | 5.95 | 4.6 |

Pruebas de radio de giro





5.1.3 Distancia de Frenado.

El propósito de la prueba es determinar la capacidad de frenado de las diferentes tecnologías de transporte bajo las condiciones de la Ciudad de México mediante el procedimiento SAE J1250 FEB80 y SAE J299 JAN80.

El procedimiento de prueba establecido en la norma SAE J1250 FEB80 y SAE J299 JAN80, es el siguiente:

- El vehículo debe entrar al área de prueba lo más cerca posible a la velocidad especificada (8 Km/h, 32 Km/h y 60 Km/h).
- Mantener la velocidad hasta el lugar prescrito en el cual deberá realizar la maniobra de frenado, procurando llevar el vehículo a una parada completa en la mínima distancia utilizando los sistemas ABS y/o ralentizador (en caso de existir), y siguiendo un procedimiento normal de frenado.



Resultados de las Pruebas

- Registrar la velocidad inicial y la distancia de viaje del vehículo desde el momento en que se aplica movimiento al pedal de frenado.
- Registrar cualquier problema o inestabilidad.
- Un mínimo de 3 lecturas debe ser registradas y promediadas.

En la Tabla 5.2 podemos observar los resultados de distancia de frenado obtenidos por los autobuses de prueba.

Tabla 5.2 Resultados de la prueba de distancia de frenado.

| Autobús | Distancia de tracción X [m] | Tiempo de tracción t [seg.] | Distancia de frenado X [m] | Tiempo de frenado t [seg.] | Velocidad medida en el odómetro del autobús [Km/h] |
|-----------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|----------------------------|----------------------------|--|
| Eletrabús | | | | | |
| Tracción | 50 | 9.18 | | | 32 |
| Frenado | | | 7.03 | 0.076 | 32 |
| Ankai | | | | | |
| Tracción | 50 | 1.09 | | | 30 |
| Frenado | | | 8.64 | 1.16 | 30 |
| Faw | | | | | |
| Tracción | 50 | 11.5 | | | 32 |
| Frenado | | | 7.36 | 0.77 | 38 |
| Scania de 15 metros | | | | | |
| Tracción | 50 | 9.67 | | | 40 |
| Frenado | | | 5.76 | 0.93 | 40 |
| Mercedes Benz de 11 metros | | | | | |
| Tracción | 50 | 9.77 | | | 38 |
| Frenado | | | 7.36 | 0.78 | 38 |
| Allison | | | | | |
| Tracción | 50 | 8.3 | | | 32 |
| Frenado | | | 10.12 | 1.67 | 32 |
| Volvo | | | | | |
| Tracción | 50 | 10.91 | | | 33 |
| Frenado | | | 8 | 0.91 | 33 |
| Busscar | | | | | |
| Tracción | 50 | 12.73 | | | 23 |
| Frenado | | | 5.73 | 0.43 | 23 |



5.1.4 Recarga de la Batería (SOC).

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 . 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.

5.2 Pruebas Ambientales.

5.2.1 Emisión de Contaminantes con Dinamómetro de Chasis.

Dado que en esta campaña de pruebas se evaluó el mismo autobús con 2 y hasta 3 diesel con diferente concentración de azufre, en adelante se le agregará un sufijo al nombre con el que se identifica en la Tabla 4.4 :

- DE: Diesel – eléctrico.
- D: Diesel de 350 ppm de S.
- D-50: Diesel de 50 ppm de S.
- D-15: Diesel de 15 ppm de S.
- GNC: Gas Natural Comprimido.

5.2.1.1 Emisiones en Relación a la Distancia Recorrida.

En la siguiente tabla se tienen las emisiones y el rendimiento de los autobuses evaluados en las pruebas de dinamómetro de chasis, utilizando tanto el ciclo Mexicano MCS como el Europeo ETC; las emisiones se reportan en gramos por kilómetro y el rendimiento en kilómetros por litro. En general se tiene que las emisiones obtenidas al aplicar el ciclo ETC son menores que las del ciclo MCS, esto se debe a la duración de los ciclos, el primero es de 1800 segundos y el segundo es de 3,000 y a las condiciones de manejo de cada uno ya que el MCS tiene un carácter más agresivo, con mayor número de paros y arranques, mientras que el ETC se desarrolla con menores variaciones en la velocidad. En algunos casos se reportan emisiones menores a cero, lo cual indica que la medición realizada fue menor a las concentraciones ambientales de fondo y deben considerarse como iguales a cero.



Resultados de las Pruebas

Tabla 5.3 Emisiones y rendimiento en dinamómetro de chasis.

| Ciclo | Autobús | NOX [g/km] | NO [g/km] | PM [g/km] | CO [g/km] | HC [g/km] | CO2 [g/km] | N ₂ O [g/km] | Rendimiento [km/l] |
|---|----------------------|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|---------------|----------------------------|-----------------------|
| Autobuses a diesel | | | | | | | | | |
| ETC | ALLISON-DE-15 | 3.409 | 1.449 | 0.014 | 0.413 | -0.008 | 702.70 | 0.134 | 3.88 |
| | MB10-D-15 | 4.910 | 4.618 | 0.093 | 1.354 | 0.036 | 704.75 | 0.240 | 3.84 |
| | RTP1-D-15 | 4.354 | 2.087 | 0.128 | 0.29 | -0.009 | 678.30 | 0.109 | 4.00 |
| | RTP3-D-15 | 5.408 | 4.904 | 0.199 | 1.677 | 0.116 | 773.53 | 0.300 | 3.50 |
| | SCANIA15-D-15 | 7.234 | 6.835 | 0.272 | 1.633 | 0.638 | 1,014.03 | N/E | 2.51 |
| | SCANIA18-D-15 | 6.726 | 6.601 | 0.153 | 1.324 | 0.145 | 1,078.36 | N/E | 2.51 |
| | VOLVO12-D-15 | 6.322 | 6.044 | 0.532 | 5.121 | 0.238 | 643.85 | N/E | 3.91 |
| MCS | ALLISON-DE-15 | 7.013 | 2.298 | 0.023 | 1.376 | -0.064 | 1,258.24 | 0.315 | 2.25 |
| | MB10-D-15 | 6.771 | 6.225 | 0.384 | 6.723 | 0.111 | 1,010.63 | 0.833 | 2.71 |
| | MB10-D-50 | 6.635 | 6.105 | 0.6 | 7.343 | 0.003 | 1,012.50 | 0.878 | 2.68 |
| | MB10-D | 6.701 | 6.244 | 0.455 | 6.033 | 0.006 | 1,015.89 | 0.777 | 2.65 |
| | RTP1-D-15 | 8.243 | 3.038 | 0.093 | 0.831 | -0.068 | 1,143.39 | N/E | 2.39 |
| | RTP1-D-50 | 8.705 | 3.514 | 0.092 | 0.933 | -0.076 | 1,150.29 | N/E | 2.36 |
| | RTP3-D-15 | 9.381 | 8.515 | 0.314 | 5.276 | 0.228 | 1,162.47 | N/E | 2.34 |
| | RTP3-D-50 | 9.015 | 0 | 0.327 | 5.526 | 0.095 | 1,126.47 | 0.575 | 2.39 |
| | RTP3-D | 9.384 | 8.912 | 0.286 | 4.857 | 0.219 | 1,146.24 | 0.560 | 2.30 |
| | SCANIA15-D-15 | 13.459 | 13.024 | 0.570 | 6.905 | 0.810 | 1,702.06 | 0.964 | 1.52 |
| | SCANIA15-D | 13.177 | 12.757 | 0.626 | 7.152 | 0.403 | 1,691.63 | 0.992 | 1.58 |
| | SCANIA18-D-15 | 13.841 | 13.766 | 0.670 | 7.728 | 0.143 | 1,813.31 | N/E | 1.50 |
| | SCANIA18-D-50 | 12.169 | 11.831 | 0.767 | 8.318 | 0.066 | 1,794.19 | N/E | 1.49 |
| | VOLVO12-D-15 | 13.522 | 13.081 | 1.034 | 13.333 | 0.431 | 1,308.58 | N/E | 1.94 |
| | VOLVO12-D | 12.267 | 11.995 | 1.570 | 19.329 | 0.156 | 1,299.48 | N/E | 1.94 |
| Autobuses a gas natural comprimido | | | | | | | | | |
| ETC | BUSSCAR-GNC | 4.217 | 3.353 | 0.026 | 0.388 | 2.875 | 573.60 | 0.069 | 3.17 |
| MCS | BUSSCAR-GNC | 9.561 | 7.474 | 0.012 | 1.543 | 9.47 | 1,148.36 | 0.252 | 1.57 |
| | FAW-GNC | 19.232 | 16.357 | 0.003 | 1.088 | 6.003 | 1,544.57 | 0.171 | 1.18 |



5.2.1.1.1 Comparativo de Emisiones Aplicando los Ciclos MCS y ETC.

En la Figura 5.4 se muestra las emisiones de óxidos de nitrógeno para los autobuses que utilizan diesel como combustible; en el ciclo ETC, el Allison resultó el menor emisor y el Scania de 15 metros el mayor. En el caso del MCS, la menor emisión fue la reportada por el Mercedes Benz de 10 metros al utilizar diesel de 50 ppm de azufre y las mayores emisiones se tuvieron en los autobuses de mayor tamaño, Volvo de 12, Scania de 15 y 18 metros, teniendo la emisión mayor el Scania de 18 utilizando diesel de 15 ppm.

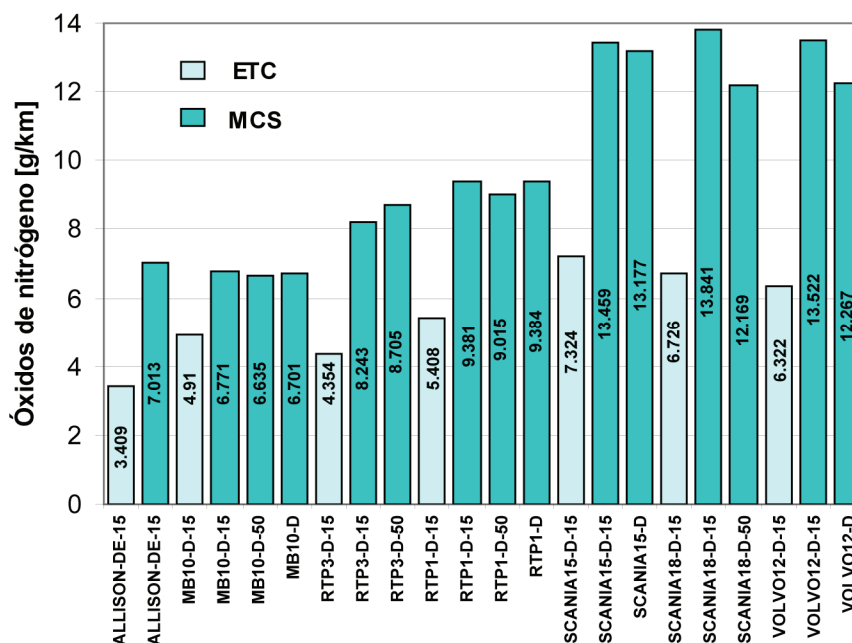


Figura 5.4 Emisiones de NOx en MCS y ETC.

De las emisiones de dióxido de carbono, Figura 5.5 podemos ver que para el ciclo ETC la menor emisión fue del Volvo utilizando diesel de 15 ppm y el Scania de 18 metros al usar diesel de 15 ppm tuvo la mayor emisión. Para el MCS, el mayor emisor es el Scania de 18 metros utilizando diesel de 15 ppm como combustible y el Mercedes Benz de 10 metros reportó la menor emisión.



Resultados de las Pruebas

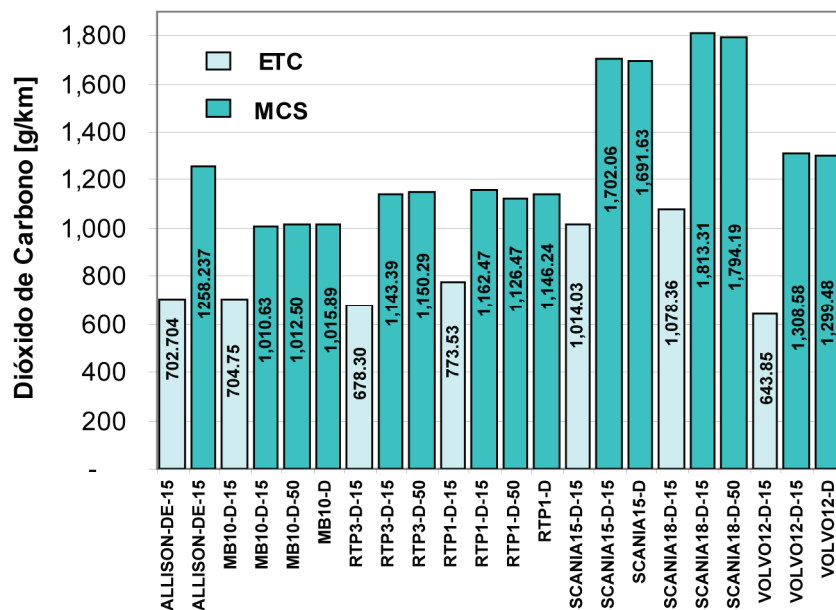


Figura 5.5 Emisiones de CO₂ en MCS y ETC.

Para las partículas se tiene la Figura 5.6, en la cual tenemos que para el ciclo ETC el Volvo fue el más emisor y el Allison fue el que tuvo menores emisiones. Para el ciclo MCS, el que emitió menos material particulado fue el Allison, mientras que el autobús Volvo de 12 metros, utilizando diesel de 350 ppm, fue el que reportó las emisiones más altas de partículas.

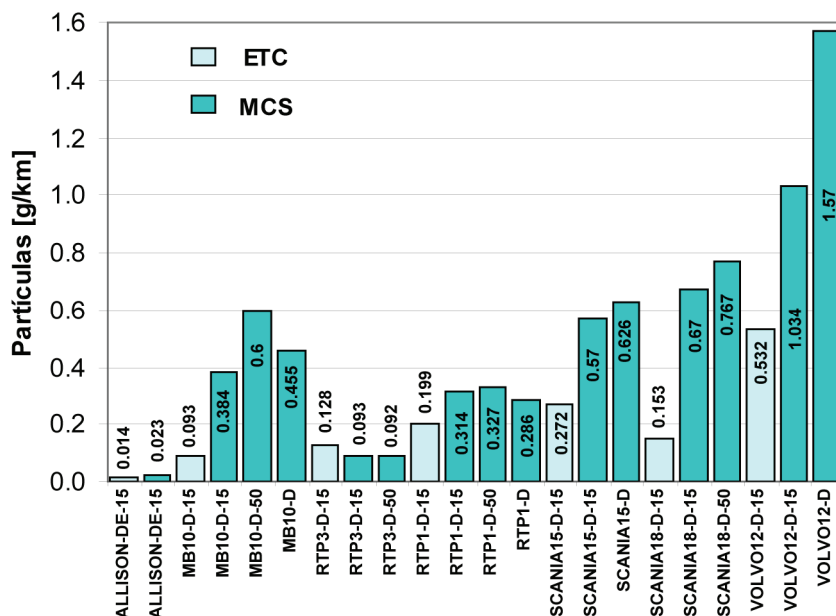


Figura 5.6 Emisiones de PM en MCS y ETC.



La Figura 5.7 muestra las emisiones de monóxido de carbono en ambos ciclos; para el ETC el Allison es el vehículo que tiene la emisión más baja de este contaminante, mientras que el Volvo de 12 metros, utilizando diesel de 15 ppm de azufre, tiene la mayor emisión. Al analizar las emisiones durante el ciclo MCS, tenemos que el RTP3 tiene las emisiones más bajas.

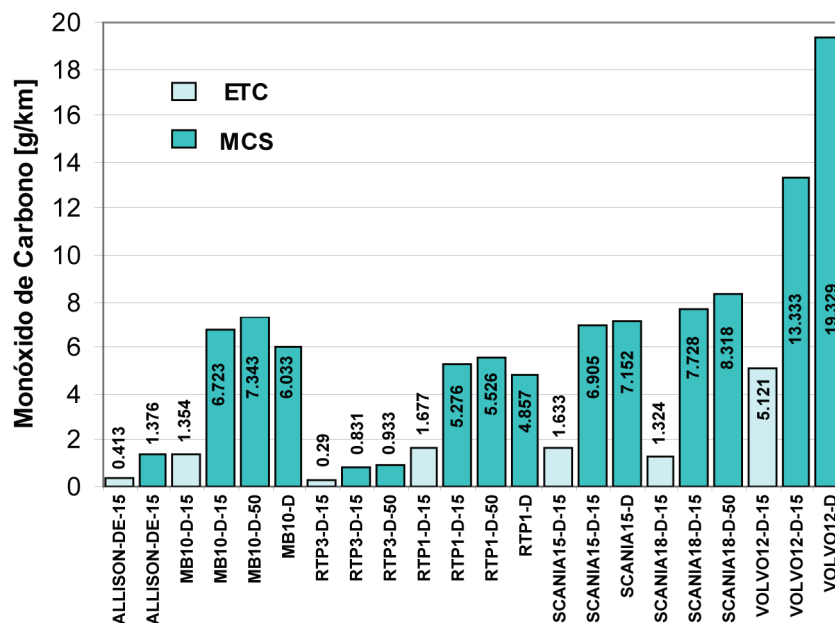


Figura 5.7 Emisiones de CO en MCS y ETC.

En la Figura 5.8 se muestran los resultados en hidrocarburos al aplicar los ciclos de manejo y tenemos que 2 vehículos registraron emisiones menores a las presentes en el medio ambiente al momento de realizar la prueba: el Allison y el RTP3 con los 3 combustibles diferentes; en el mayor emisor tenemos al Scania de 15 metros utilizando diesel de 15 ppm en ambos ciclos. Para este contaminante destaca el comportamiento de las emisiones de los autobuses Scania de 15 metros y del Volvo de 12 metros, para estos autobuses las emisiones de hidrocarburos son mayores en el ciclo ETC que en el MCS, lo cual es contrario al comportamiento que se ha observado en el resto de los contaminantes y vehículos. El Volvo fue reportado como un prototipo y el Scania no fue ajustado adecuadamente a las condiciones de altura de la Ciudad de México; lo anterior aunado a las condiciones más estrictas del ETC pudo generar el resultado antes mencionado.



Resultados de las Pruebas

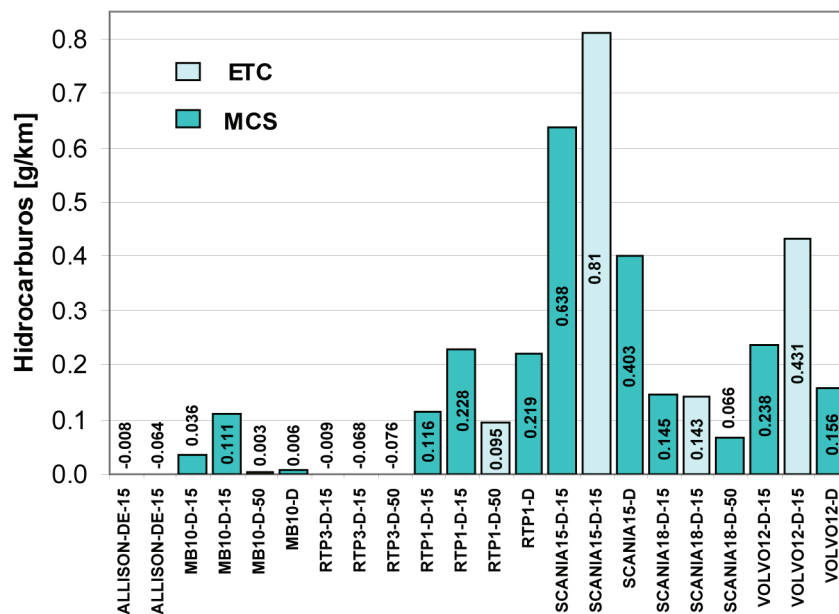


Figura 5.8 Emisiones de HC en MCS y ETC.

Aunque no a todos los autobuses se les midieron sus emisiones de Óxido nítrico, en la Figura 5.9 tenemos los resultados, de donde podemos ver que en el ciclo ETC el Allison fue el menos emisor y el RTP1 el mayor. En el caso del ciclo MCS, al igual que en el ciclo ETC, el autobús que menos N_2O emite es el Allison y el que registró mayores emisiones fue el Scania de 15 metros con diesel de 350 ppm de azufre.

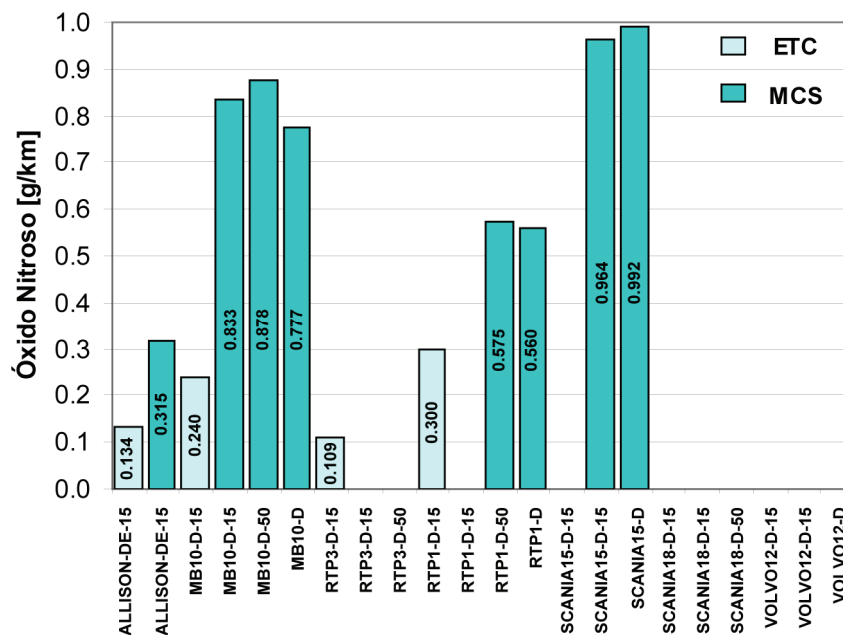


Figura 5.9 Emisiones de N_2O en MCS y ETC.



En la Figura 5.10 tenemos las emisiones de los autobuses a GNC, el Busscar fue evaluado utilizando los dos ciclos de manejo, mientras que el FAW sólo pudo evaluarse utilizando el ciclo MCS; en ella podemos apreciar que las emisiones más altas de NOx y CO₂ fueron del FAW, mientras que el Busscar en el MCS reportó las mayores emisiones de CO, HC y N₂O. Por otro lado, cuando se aplica el ETC, el Busscar tiene las menores emisiones de NOx, CO₂, CO, HC y N₂O. Las emisiones de PM son mayores para el Busscar cuando se aplicó el ETC y las menores fueron las del FAW.

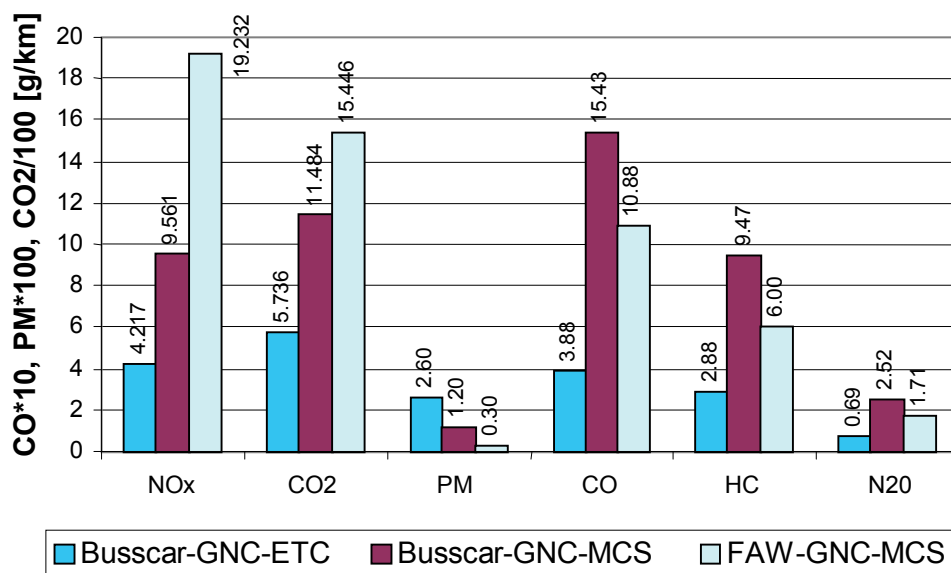


Figura 5.10 Emisiones de los autobuses a GNC en los ciclos MCS y ETC.

Al comparar el rendimiento de los autobuses que utilizan GNC tenemos, ver Figura 5.11, que el Busscar en el ciclo ETC tiene el mayor rendimiento de combustible de los 3 vehículos y el FAW obtiene el menor. En este caso podemos también comparar el desempeño en cada uno de los ciclos de manejo utilizados, el Busscar reporta un rendimiento menor cuando se somete a las condiciones del MCS, lo anterior es debido a las condiciones de tránsito de dicho ciclo ya que tiene un mayor número de paradas y aceleraciones, en comparación del ETC, en el cual el vehículo es operado en condiciones de menor variación en la velocidad y a la duración misma del ciclo, como se mencionó anteriormente en el apartado 4.4.1.6.

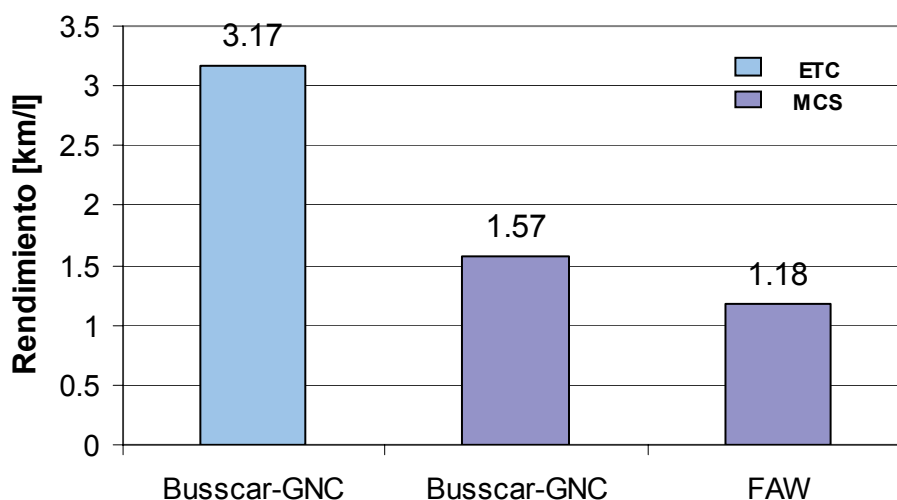


Figura 5.11 Rendimiento de los autobuses a GNC en los ciclos MCS y ETC.

El rendimiento de combustible obtenido por los autobuses participantes al evaluarlos en los dos ciclos, se tiene en la Figura 5.12, de donde se tiene que los resultados para el ETC son mayores que en el MCS, esto debido a que al comparar los ciclos, el ETC tiene una naturaleza de menos tránsito que el MCS. Al analizar por autobús tenemos que el RTP3 funcionando con diesel de 15 ppm tuvo el rendimiento más alto en el ETC, mientras que el Scania de 18 metros tuvo el más bajo. En lo que respecta al MCS, el Mercedes Benz de 10 metros fue el de mayor rendimiento y el Scania de 18 metros el de menor rendimiento.

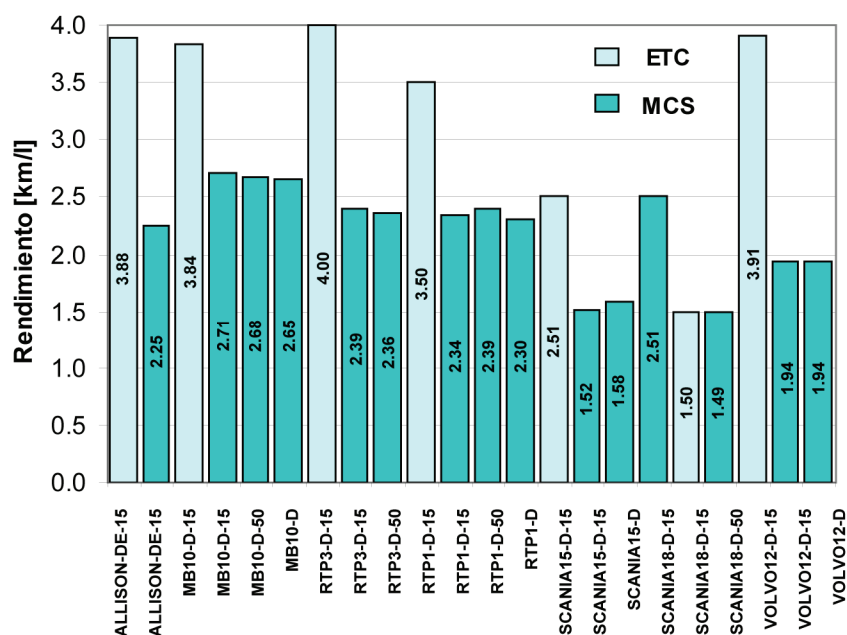


Figura 5.12 Rendimiento en los ciclos MCS y ETC.



La Figura 5.13 y la Figura 5.14 presentan el rendimiento de combustible en el MCS como una función del peso de prueba del vehículo y de la relación de la potencia / peso vehicular, esto es, la potencia del motor dividida por el peso del vehículo, respectivamente. 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 relación potencia-peso y la economía de combustible, aunque se esperaba que el autobús VOLVO12 que tenía la proporción potencia-peso más alta, obtuviera el mayor rendimiento de combustible.

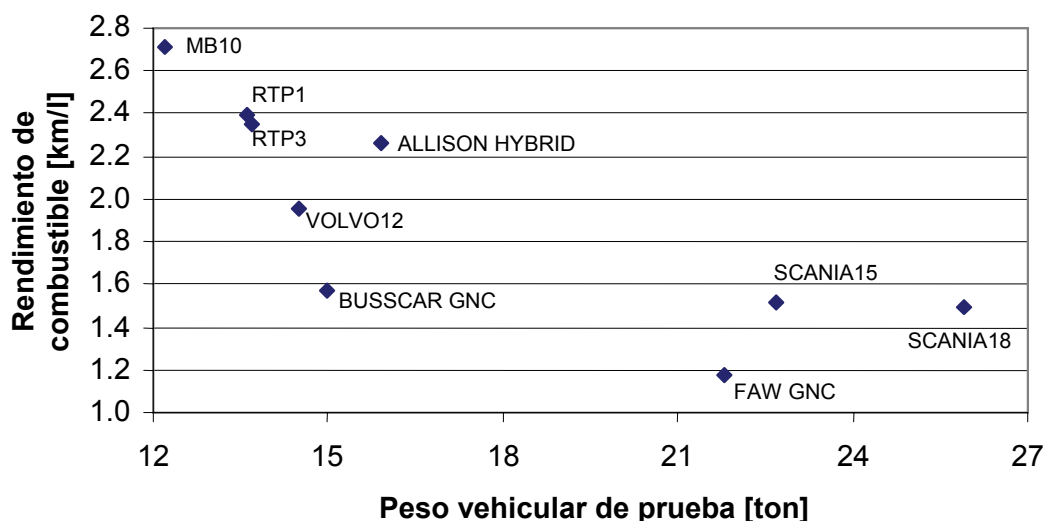


Figura 5.13 Rendimiento de combustible en el MCS como función del peso.

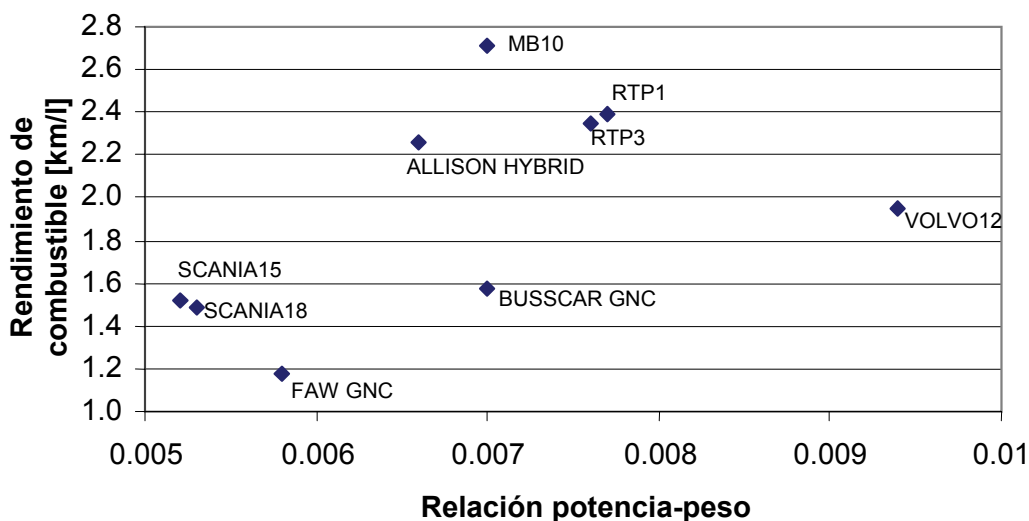


Figura 5.14 Rendimiento de combustible en el MCS como función de la relación potencia / peso.



5.2.1.1.2 Emisiones Utilizando Diesel con Diferentes Concentraciones de Azufre.

Es importante resaltar que como parte de la campaña de medición de emisiones en dinamómetro de chasis, se evaluó un mismo autobús utilizando diesel con diferentes concentraciones de azufre: 15, 50 y 350 partes por millón, esta última es la concentración de azufre del diesel comercial en la ZMVM. Los resultados nos dan una idea del comportamiento en emisiones que se puede esperar al emplear Diesel de Ultra Bajo Contenido de Azufre (ULSD por sus siglas en inglés). En algunos países de Europa, principalmente en el Norte y Oeste, se ha hecho obligatorio el uso de diesel con un contenido de azufre de 50 ppm, conocido como “Diesel de Ciudad”. Por otro lado en Estados Unidos de Norteamérica, actualmente ya se tiene disponible el USLD en forma comercial, aunque es zonas limitadas, principalmente en California.¹⁵ En las graficas siguientes se muestran como D-15, D-50 y D respectivamente.

De las pruebas realizadas a los autobuses diesel, tenemos para este comparativo a 4 autobuses que utilizaron 2 diesel con diferente concentración, de éstos 2 utilizaron la combinación D-15 vs D-50 y dos D-15 vs D. De igual forma se tienen 2 autobuses que utilizaron los 3 tipos de diesel disponible para las pruebas realizadas en la Ciudad de México. Todas las pruebas en que se utilizó más de un tipo de diesel se realizaron aplicando el ciclo de manejo MCS.

Cuando se utilizó diesel de 15 y de 50 ppm de azufre en el autobús de prueba RTP3, ver Figura 5.15, tenemos que con el diesel de 15 ppm se registraron menores emisiones de NO_x, CO y CO₂, siendo la diferencia de emisiones de CO la más notable con 0.102 g/km. En esta misma figura también podemos ver que la emisión de PM aumento ligeramente al utilizar diesel con 15 ppm; en el caso de los HC se muestran valores negativos, lo cual indica que la emisión generada fue menor a la concentración de este contaminante en el ambiente. Es importante mencionar que aunque este autobús tenía instalada una trampa de partículas, las pruebas realizadas tienen un carácter de *efecto inmediato*, esto es, la trampa de partículas se acababa de instalar y es difícil asegurar el desempeño de dicho dispositivo.

¹⁵ Pricing and Infrastructure Costing. For Supply and Distribution of CNG and ULSD to the Transport Sector. Mumbai, India. Tata Energy Research Institute, New Delhi. August 2002.

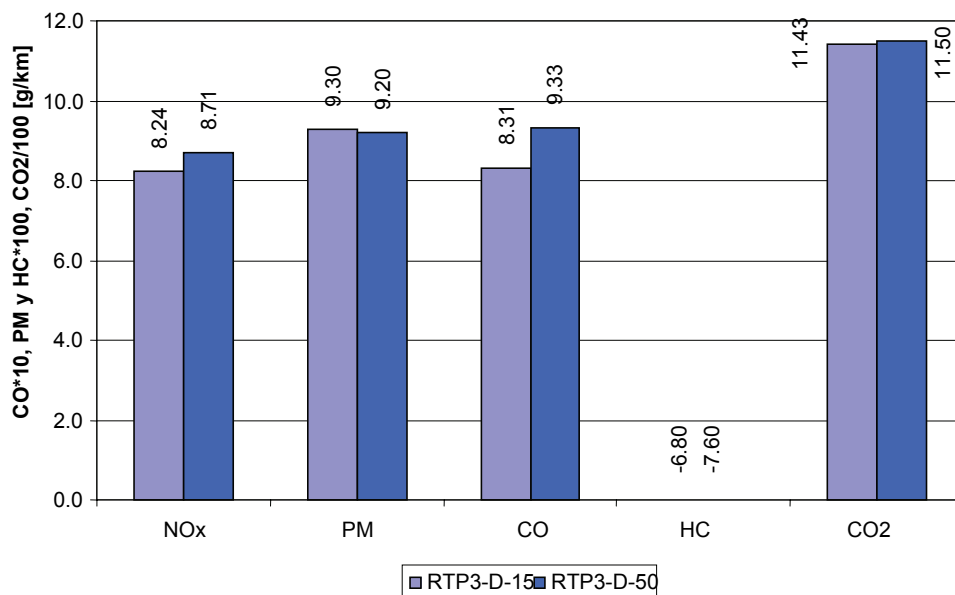


Figura 5.15 Emisiones del autobús RTP3 utilizando diesel de 15 y de 50 ppm.

En la Figura 5.16 tenemos las emisiones del autobús Scania de 18 metros de longitud, al utilizar diesel con una concentración de azufre de 15 ppm y de 50 ppm, este autobús mostró emisiones menores en PM y CO al utilizar el diesel con menor concentración de azufre y aumento en las emisiones de NOx, HC y CO₂. Dado que este vehículo no contaba con ningún dispositivo para reducir emisiones, tenemos que el principal efecto al reducir la concentración de azufre es la reducción de emisiones de PM y CO.

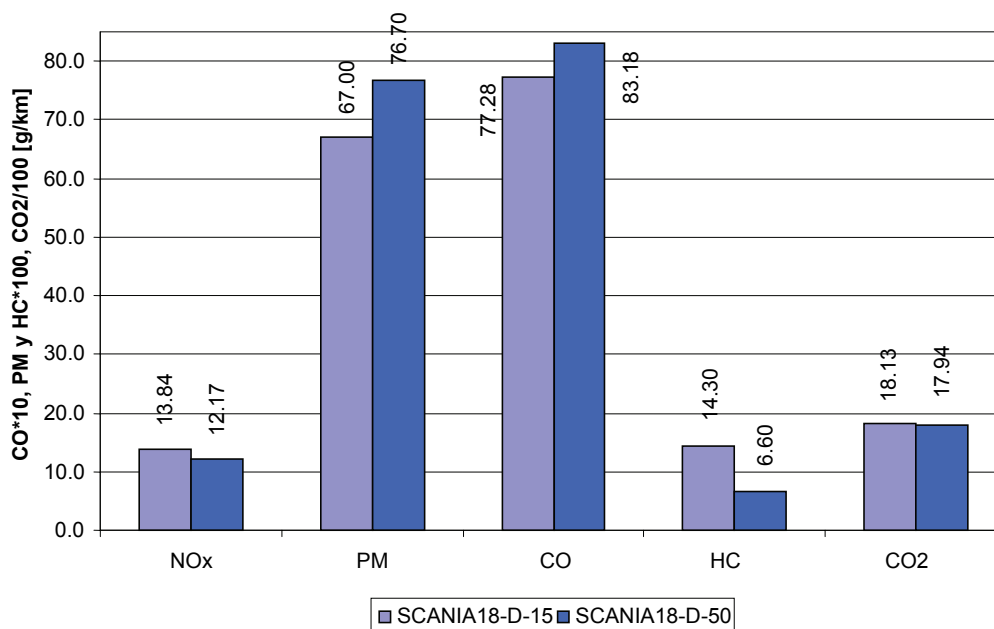


Figura 5.16 Emisiones del autobús Scania de 18m utilizando diesel de 15 y 50 ppm.



Resultados de las Pruebas

El autobús Scania de 15 metros de largo, Figura 5.17, se utilizó para medir las emisiones al emplear diesel de 15 ppm y diesel de 350 ppm, de la figura podemos observar que al utilizar diesel de 15 ppm, se dieron reducciones en la emisión de PM y CO, al igual que en el vehículo anterior, y aumentaron las emisiones de NOx, HC y CO₂.

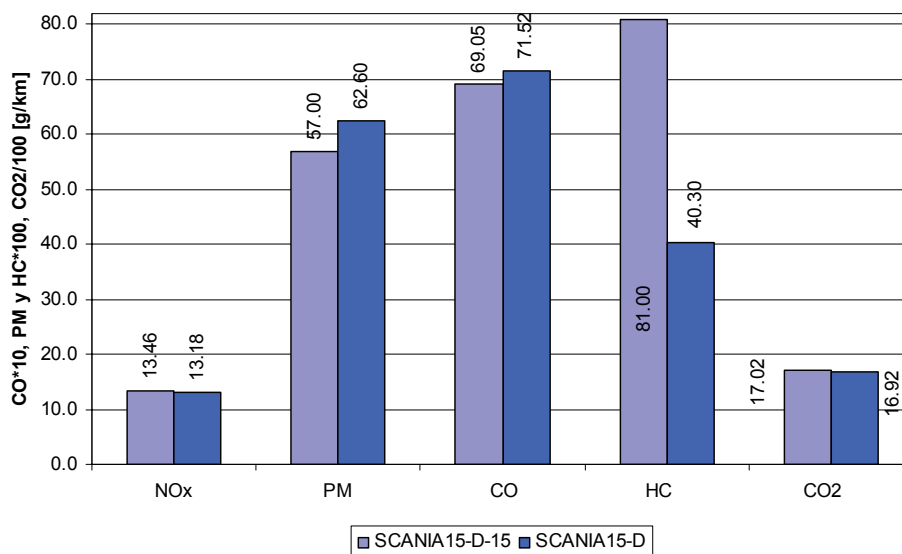


Figura 5.17 Emisiones del autobús Scania de 15m utilizando diesel de 15 y 350 ppm.

En la Figura 5.18 tenemos las emisiones resultantes al emplear diesel de 15 ppm y diesel de 350 ppm de concentración de azufre en el autobús Volvo de 12 metros de largo y los resultados son muy similares a los autobuses analizados anteriormente; se registran reducciones en las emisiones de PM y de CO, mientras que hay aumento en las de NOx y HC, con una ligera variación en las emisiones de CO₂.

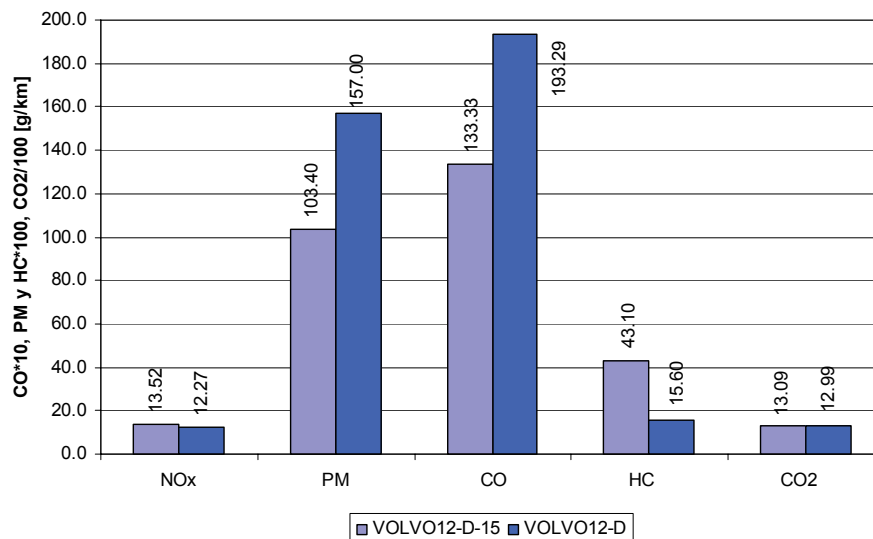


Figura 5.18 Emisiones por pasajero del autobús Volvo de 12m utilizando diesel de 15 y 350 ppm.



Es importante mencionar que en los autobuses anteriores, la emisión de HC aumentó de manera significativa, 116% para el Scania de 18 metros, 101% para el Scania de 15 metros y 176% para el Volvo de 12 metros, lo cual puede deberse a que tanto el diesel de 15 ppm como el de 50 ppm utilizados fueron fabricados ex profeso para las pruebas realizadas, por lo cual se tuvo cuidado de mantener el nivel de azufre más no se tiene registro para el resto de los parámetros de calidad del diesel. También cabe recordar que en el análisis realizado por la WVU, el diesel con 50 ppm resultó tener 152.8 como se muestra en la Tabla 4.6. De igual forma es destacable que las emisiones de HC del autobús RTP3, equipado con un filtro de partículas, son casi indetectables.

Para medir los efectos de emplear los 3 tipos de diesel disponibles, uno de los autobuses utilizados fue el autobús Mercedes Benz de 10 metros de largo, el cual no contaba con ningún dispositivo anticontaminante pero fue el único autobús con certificación EPA 2004 y cuyos resultados podemos ver en la Figura 5.19. De ésta tenemos que las mayores emisiones de PM y CO fueron al utilizar diesel con 50 ppm de azufre; la menor emisión de PM fue con diesel de 15 ppm y la menor de CO fue con diesel de 350 ppm. Mientras que las emisiones de NOx y CO₂ se mantienen sin gran variación al cambiar la concentración de azufre en el diesel y las emisiones de HC más altas resultan cuando el vehículo utilizó diesel con 15 ppm.

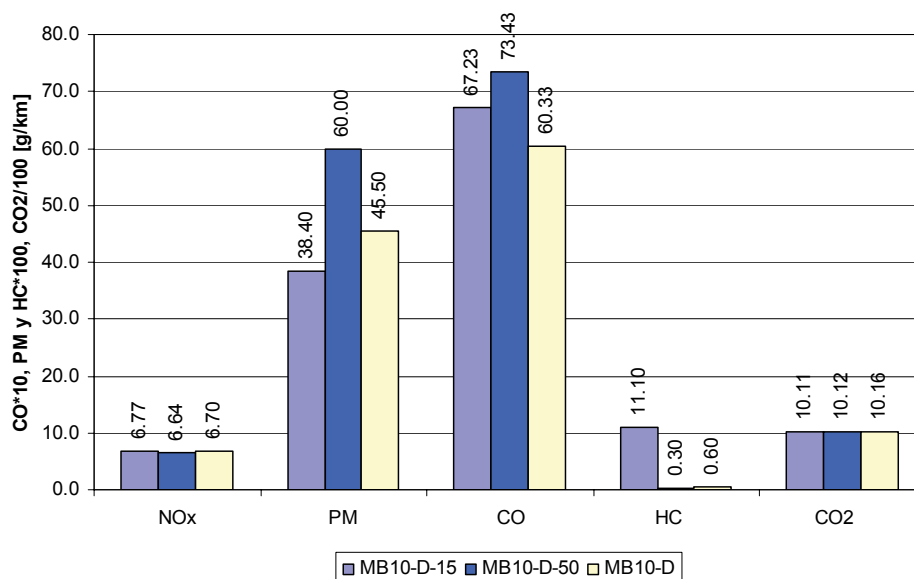


Figura 5.19 Emisiones del autobús Mercedes Benz de 10m utilizando los 3 tipos de diesel.



Resultados de las Pruebas

En la Figura 5.20 tenemos las emisiones del autobús RTP1, el cual no contaba con ningún dispositivo para reducir emisiones contaminantes y tenemos que al igual que el autobús anterior, las emisiones más altas de PM y CO resultan al emplear el diesel de 50 ppm, sin embargo, en ambos contaminantes las menores emisiones de ambos contaminantes son al utilizar el diesel de 350 ppm. Las emisiones de NOx y CO₂ no muestran grandes variaciones al cambiar la concentración de azufre en el diesel y finalmente, las emisiones de HC con diesel de 15 ppm y con 350 ppm son muy similares pero mucho mayores que con el diesel de 50 ppm, entre 130% y 140% mayor.

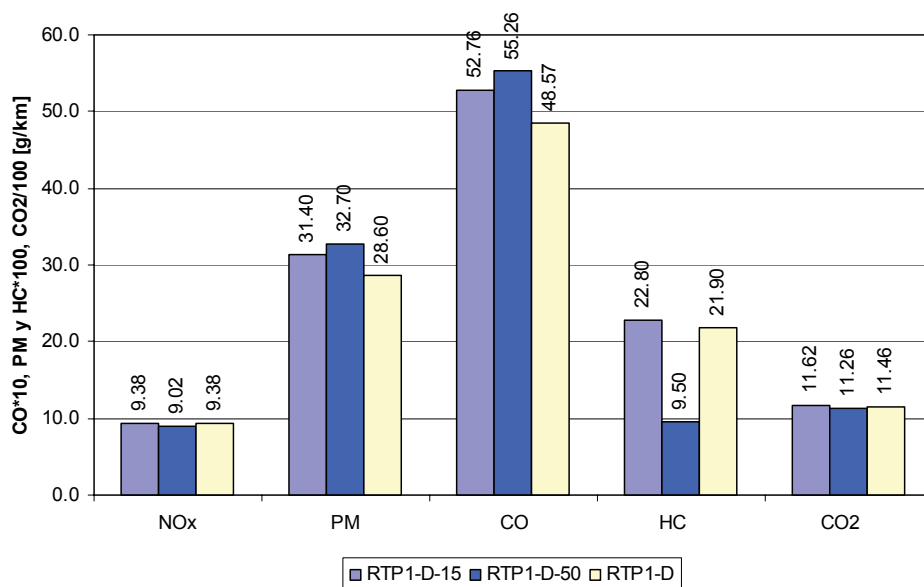


Figura 5.20 Emisiones del autobús RTP1 utilizando los 3 tipos de diesel.

De los resultados anteriores es importante destacar el comportamiento resultante de los autobuses RTP1 y RTP3, los cuales pertenecen a la flota regular de sistema de transporte de pasajeros del Gobierno del Distrito Federal y cuya única diferencia entre uno y otro es que al RTP3 se le instaló una trampa de partículas. De las figuras anteriores tenemos que uno de los beneficios de utilizar ULSD es que permite la utilización del mencionado dispositivo para reducir emisiones y cuando se consume diesel de 15 ppm las emisiones del RTP3 se reducen 0.221 g/km de PM y 4.445 g/km de CO.



5.2.1.2 Emisiones en Relación a los Pasajeros Transportados y la Distancia Recorrida.

Dadas las diferencias de dimensiones y capacidades de pasajeros que existen entre los diferentes autobuses evaluados, el análisis de emisiones basándose en los kilómetros recorridos puede sesgar los resultados. Por este motivo a continuación se presentan los resultados de emisiones tomando como base la capacidad de pasajeros de los diversos vehículos que participaron en las pruebas.

Tabla 5.4 Emisiones y rendimiento por pasajeros en dinamómetro de chasis.

| Ciclo | Autobús | NOx [g/pas-km] | NO [g/pas-km] | PM [g/pas-km] | CO [g/pas-km] | HC [g/pas-km] | CO ₂ [g/pas-km] | N ₂ O [g/pas-km] | Rendimiento [km-pas/l] |
|---|---------------|-------------------|------------------|------------------|------------------|------------------|-------------------------------|--------------------------------|---------------------------|
| Autobuses a diesel | | | | | | | | | |
| ETC | ALLISON-DE-15 | 0.043 | 0.018 | 0.0002 | 0.005 | -0.0001 | 8.88 | 0.002 | 307.01 |
| | MB10-D-15 | 0.081 | 0.076 | 0.0015 | 0.022 | 0.0006 | 11.57 | 0.004 | 233.98 |
| | RTP1-D-15 | 0.073 | 0.035 | 0.0022 | 0.005 | 0.0019 | 11.40 | 0.002 | 238.12 |
| | RTP3-D-15 | 0.091 | 0.082 | 0.0033 | 0.028 | -0.0001 | 13.00 | 0.005 | 208.20 |
| | SCANIA15-D-15 | 0.074 | N/E | 0.0028 | 0.017 | 0.0066 | 10.42 | N/E | 244.10 |
| | SCANIA18-D-15 | 0.060 | N/E | 0.0014 | 0.012 | 0.0013 | 9.57 | N/E | 283.21 |
| | VOLVO12-D-15 | 0.099 | N/E | 0.0083 | 0.080 | 0.0037 | 10.11 | N/E | 249.35 |
| MCS | ALLISON-DE-15 | 0.089 | 0.029 | 0.0003 | 0.017 | -0.0008 | 15.91 | 0.004 | 178.32 |
| | MB10-D-15 | 0.111 | 0.102 | 0.0063 | 0.110 | 0.0018 | 16.60 | 0.014 | 164.77 |
| | MB10-D-50 | 0.109 | 0.100 | 0.0099 | 0.121 | 0 | 16.63 | 0.014 | 163.43 |
| | MB10-D | 0.110 | 0.103 | 0.0075 | 0.099 | 0.0001 | 16.68 | 0.013 | 161.2 |
| | RTP1-D-15 | 0.139 | N/E | 0.0016 | 0.014 | 0.0038 | 19.22 | N/E | 142.11 |
| | RTP1-D-50 | 0.146 | N/E | 0.0015 | 0.016 | 0.0016 | 19.33 | N/E | 140.43 |
| | RTP3-D-15 | 0.158 | N/E | 0.0053 | 0.089 | 0.0037 | 19.54 | N/E | 139.48 |
| | RTP3-D-50 | 0.152 | 0 | 0.0055 | 0.093 | -0.0011 | 18.93 | 0.010 | 142.18 |
| | RTP3-D | 0.158 | 0.150 | 0.0048 | 0.082 | -0.0013 | 19.27 | 0.009 | 136.99 |
| | SCANIA15-D-15 | 0.138 | 0.134 | 0.0059 | 0.071 | 0.0083 | 17.49 | 0.010 | 147.49 |
| | SCANIA15-D | 0.135 | 0.131 | 0.0064 | 0.074 | 0.0041 | 17.39 | 0.010 | 154 |
| | SCANIA18-D-15 | 0.123 | N/E | 0.0059 | 0.069 | 0.0013 | 16.09 | N/E | 168.61 |
| | SCANIA18-D-50 | 0.108 | N/E | 0.0068 | 0.074 | 0.0006 | 15.92 | N/E | 168.38 |
| | VOLVO12-D-15 | 0.212 | N/E | 0.0162 | 0.209 | 0.0068 | 20.54 | N/E | 123.81 |
| | VOLVO12-D | 0.193 | N/E | 0.0246 | 0.303 | 0.0025 | 20.40 | N/E | 123.46 |
| Autobuses a gas natural comprimido | | | | | | | | | |
| ETC | BUSSCAR-GNC | 0.066 | 0.053 | 0.0004 | 0.006 | 0.0451 | 9.01 | 0.001 | 201.71 |
| MCS | BUSSCAR-GNC | 0.150 | 0.117 | 0.0002 | 0.024 | 0.1487 | 18.03 | 0.004 | 100.21 |
| | FAW-GNC | 0.195 | 0.167 | 0 | 0.011 | 0.0608 | 15.65 | 0.002 | 116.92 |

N/E: No Estimado.



5.2.1.2.1 Comparativo de Emisiones Aplicando los Ciclos MCS y ETC.

En la Figura 5.21 tenemos las emisiones de óxidos de nitrógeno en relación al número de pasajeros, y tenemos que en el ciclo ETC el autobús Allison tuvo las menores emisiones, mientras que en el mismo ciclo el Volvo utilizando diesel de 15 ppm fue el más emisor. Para el ciclo MCS el menos emisor es nuevamente el Allison y el mayor es el Volvo utilizando diesel de 15 ppm, lo cual se debe principalmente a la distribución que tiene el autobús Allison y tiene una capacidad de pasajeros mayor (113) que otros autobuses del mismo largo (91).

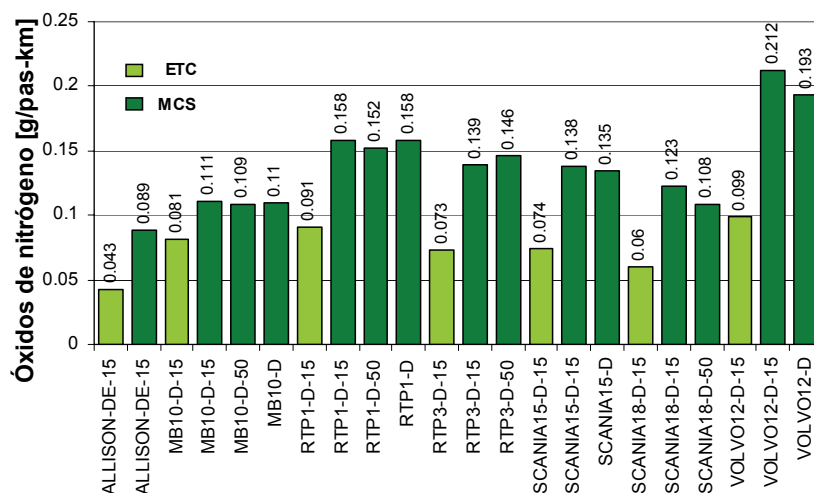


Figura 5.21 Emisiones por pasajero de NOx en MCS y ETC..

Al analizar la emisión de partículas, Figura 5.22, tenemos que en ambos ciclos el Allison registró las emisiones más bajas y el autobús Volvo las mayores, en el ciclo ETC utilizando diesel de 15 ppm y en ciclo MCS utilizando diesel de 350 ppm.

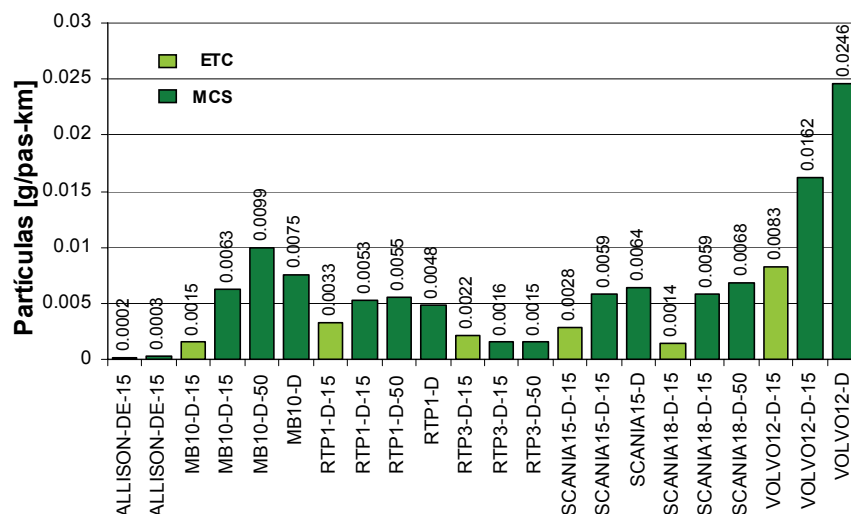


Figura 5.22 Emisiones por pasajero de PM en MCS y ETC.



Cuando se aplica el ciclo ETC, tenemos que en la emisión de hidrocarburos, Figura 5.23, el autobús Allison nuevamente obtuvo las emisiones más bajas, y en el otro extremo tenemos al autobús Scania de 15 metros utilizando diesel de 15 ppm de azufre. Al aplicar el ciclo MCS, tenemos que el autobús Mercedes Benz de 10 metros utilizando diesel de 50 ppm es el menos emisor, mientras que el Scania de 15 metros utilizando diesel de 15 ppm es el mayor emisor de hidrocarburos por pasajero-kilómetro.

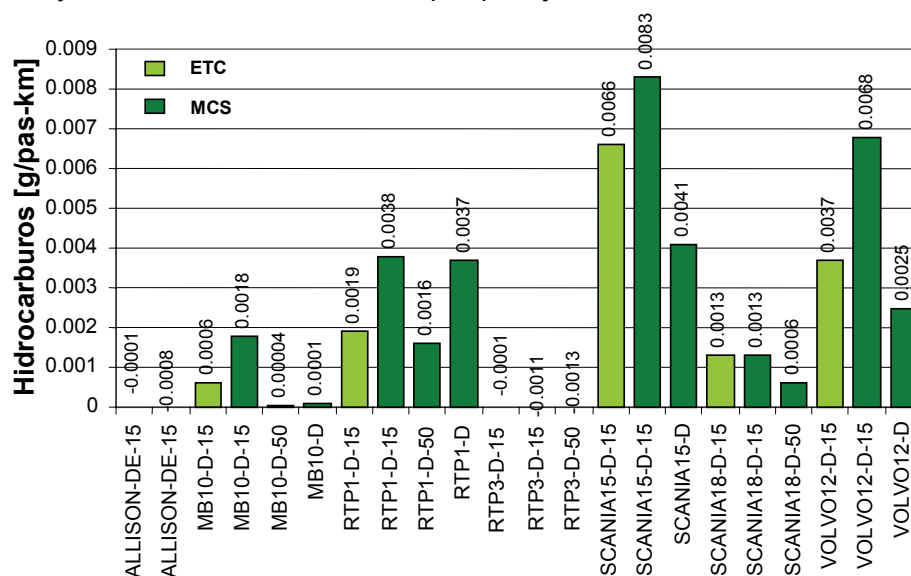


Figura 5.23 Emisiones por pasajero de HC en MCS y ETC.

En la Figura 5.24 tenemos las emisiones de CO₂ por pasajero transportado y podemos apreciar que el autobús Allison tiene las menores emisiones en ambos ciclos, en cuanto a los mayores emisores tenemos en el ciclo ETC al RTP1 con diesel de 15 ppm y en el MCS el Volvo de 12 metros con diesel de 15 ppm.

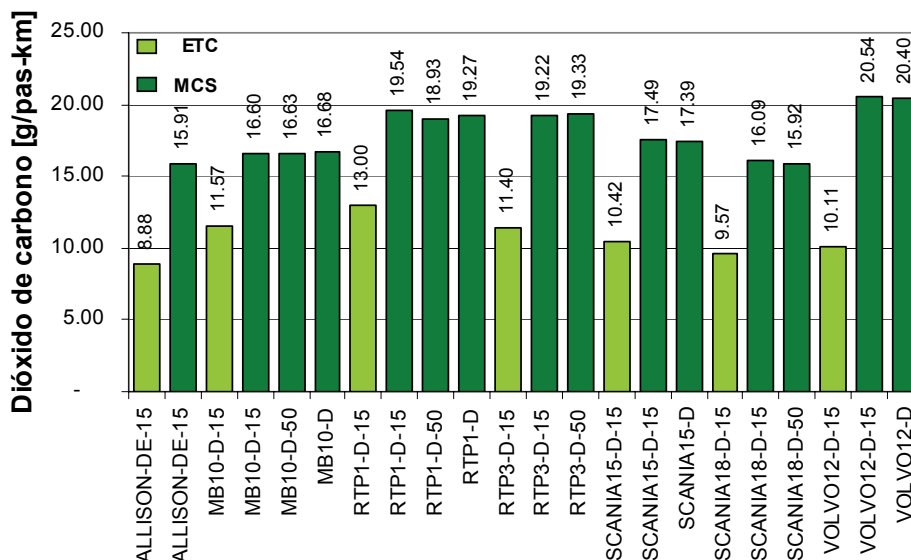


Figura 5.24 Emisiones por pasajero de CO₂ en MCS y ETC.



Resultados de las Pruebas

Aunque no se evaluó el óxido nítrico para todos los vehículos disponibles, en la Figura 5.25 tenemos que en el ciclo ETC los autobuses Allison y RTP3 con diesel de 15 ppm, obtuvieron las emisiones más bajas, mientras que en el ciclo MCS las emisiones más bajas corresponden al Allison y las mayores al Mercedes Benz utilizando diesel de 15 ppm de azufre.

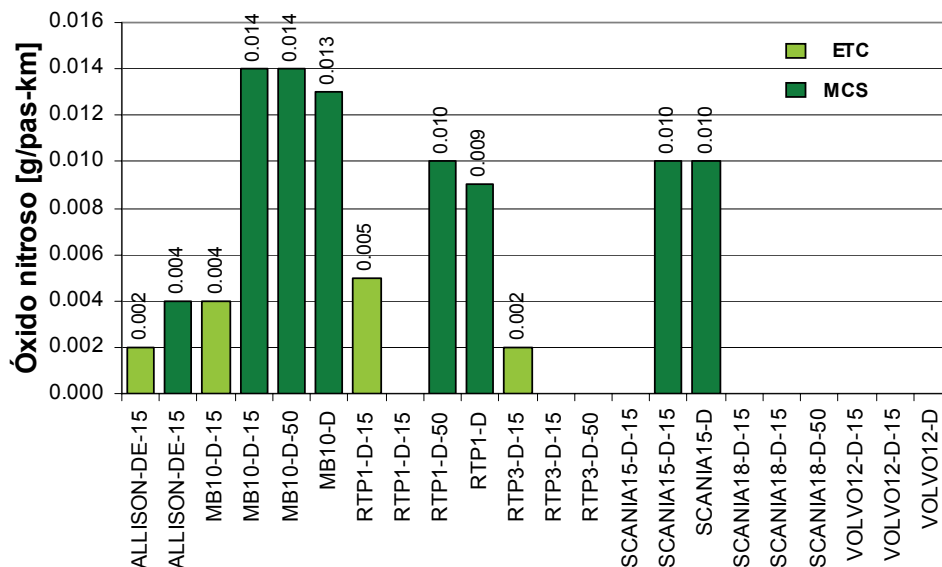


Figura 5.25 Emisiones por pasajero de N_2O en MCS y ETC.

Al igual que el rendimiento en kilómetros por litro, al relacionar el rendimiento de combustible con los pasajeros transportados, tenemos que los rendimientos mayores se registraron al aplicar el ciclo ETC. De la Figura 5.26 tenemos que el autobús Allison registró los mayores rendimientos en ambos ciclos.

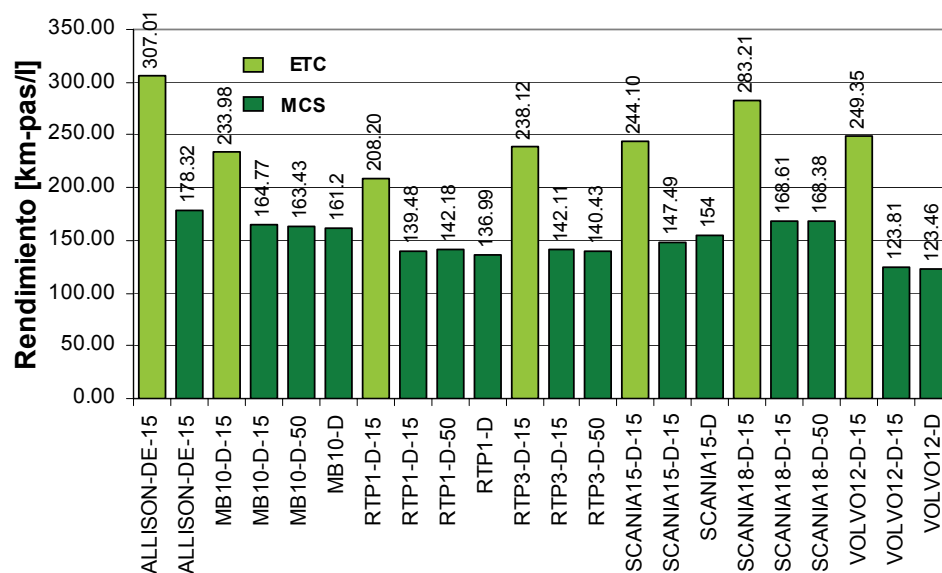


Figura 5.26 Rendimiento por pasajero en MCS y ETC.



5.2.2 Emisión de Contaminantes con el Sistema RAVEM.

La medición de emisiones utilizando este sistema portátil se realizaron a lo largo de rutas de manejo reales, incluyendo la combinación de paros - arranques y las velocidades típicas del transporte público de pasajero del Distrito Federal. A continuación tenemos la descripción de ambas rutas.

5.2.2.1 Ruta Insurgentes Norte.

En la Tabla 5.5 y la Tabla 5.6 se muestran 3 viajes completos de la ruta Insurgentes Norte (de la glorieta de los Insurgentes a Indios Verdes) realizada el viernes 4 de junio de 2004. Estos viajes iniciaron a la 9:10 am, 10:30 am y 12:26 pm. A partir de estos viajes se llegó a la conclusión de que el tiempo promedio que se detiene el autobús para el ascenso y descenso de pasajeros es de 35 segundos, lo cual se confirmó posteriormente con la Red de Transporte de Pasajeros (RTP) del Distrito Federal.

La ruta Insurgentes Norte esta compuesta por dos secciones relativamente bien definidas: una sección rápida donde las velocidades podían ser de más de 65 km/hr y una sección de negocios/comercial más lenta, en la cual se tenían velocidades promedio de alrededor de 17 km/hr.



Tabla 5.5 Viaje de la Glorieta de los Insurgentes (centro) a Indios Verdes (norte), siguiendo un autobús de RTP.

| Inicio | 9:10AM | 10:30AM | 12:26PM |
|--|-------------------------|--------------|--------------|
| De G. Insurgentes a Indios Verdes | Tiempo acumulado | | |
| Sección Comercial | Min Seg | Min Seg | Min Seg |
| G. Insurgentes | 0 0 | 0 0 | 0 0 |
| Londres | 2 2 | 1 12 | - - |
| Hamburgo (Oxxo) | 2 40 | 1 40 | - - |
| Reforma (VIPS) | 3 50 | 2 58 | 2 20 |
| Sullivan II | 5 38 | 4 57 | 4 6 |
| Antonio Caso | 6 13 | 6 1 | 5 16 |
| Edison (Dormimundo) | 8 5 | - - | - - |
| Pte. de Alvarado | 9 3 | 7 22 | 7 26 |
| H. Ferrocarrileros | 9 50 | - - | - - |
| Colosio (PRI) | 11 2 | - - | - - |
| Mosqueta | 11 21 | 9 20 | 9 39 |
| Sección rápida | | | |
| Díaz Mirón (Buenavista) | - - | - - | 10 54 |
| Eligio Ancona | - - | 11 20 | - - |
| M. González (Eje 2 Nte) | 13 0 | 12 18 | 12 32 |
| San Simón I | - - | - - | - - |
| Monum. a la Raza | - - | - - | - - |
| Gas PEMEX | - - | 14 52 | - - |
| Metro la Raza | 15 44 | - - | 15 15 |
| Euzcaro | 18 50 | 17 0 | - - |
| Montevideo | - - | 18 12 | 18 19 |
| Indios Verdes | 20 38 | 20 06 | 20 08 |

Nota: el guión (-) indica que no se le solicitó al autobús detenerse.

La tabla anterior muestra que el tiempo de viaje tuvo poca variación, en ese día, siendo entre 20 y 21 minutos, de la Glorieta de los Insurgentes a Indios Verdes, lo cual resulta conveniente para las pruebas de emisiones.

Sin embargo, la Tabla 5.6 muestra mayores variaciones en el viaje de regreso, partiendo de Indios Verdes hacia la Glorieta de los Insurgentes, donde cada viaje tiene una duración de entre 31 y 42 minutos.



Tabla 5.6 Viaje de Indios Verdes (norte) a Glorieta de los Insurgentes (centro), siguiendo un autobús de RTP.

| Inicio | 9:10AM | 10:30AM | 12:26PM |
|-------------------------------|------------------|--------------|--------------|
| De I. Verdes a G. Insurgentes | Tiempo acumulado | | |
| Sección rápida | Min Seg | Min Seg | Min Seg |
| Paradero Indios Verdes | 0 0 | 0 7 | 0 0 |
| Metro La Raza | 3 55 | 3 | 3 25 |
| San Simón | - - | - - | - - |
| Eulalia Guzmán (Eje 2 Nte) | 6 15 | 5 15 | 5 43 |
| M. Carpio | - - | 7 23 | 7 45 |
| Alzate | 10 20 | 8 53 | 10 10 |
| Sección Comercial | | | |
| Sor Juana Inés (VIPS) | - - | 10 18 | 15 6 |
| Amado Nervo (PRI) | - - | - - | 19 0 |
| San Cosme | 14 30 | 16 48 | 23 0 |
| Gómez Farías | 20 39 | 21 26 | 30 0 |
| Antonio Caso | 23 30 | 24 40 | 32 7 |
| Sullivan | 25 30 | 27 18 | - - |
| Villalongín (Reforma) | - - | 29 0 | - - |
| Nápoles | 28 52 | 31 16 | 38 16 |
| Niza | - - | 33 6 | 39 58 |
| Glorieta de Insurgentes | 31 05 | 34 40 | 41 29 |

Nota: el guión (-) indica que no se le solicitó al autobús detenerse.

Considerando lo anterior, las emisiones por el escape de los autobuses de prueba fueron medidas en la ruta Insurgentes Norte, donde cada prueba tuvo una duración de 4,500 segundos (75 minutos). Una prueba con esta duración debería eliminar las posibles variaciones en las vueltas individuales. En el caso de que alguno de los viajes de prueba tuviera una duración menor a 4,500 segundos, entonces el autobús estaría funcionando en ralentí hasta completar los 4,500 segundos. En el caso contrario, si una prueba durara más de 4,500 segundos, entonces la prueba se detiene al completar los 4,500 segundos (si el aumento no es mayor de 1 a 3 minutos). La diferencia en cualquiera de las 2 posibilidades proviene de las emisiones cuando el autobús funciona en ralentí en condiciones de tráfico regular.

De esta forma una vuelta completa en esta ruta duró 4,500 segundos y se recorrieron un promedio de 21.4 kilómetros.

Las pruebas de emisiones en esta ruta se realizaron en las mañanas y en las tardes, entre las 9:00 am y las 2:00 pm, de lunes a sábado, que es cuando no se registraron grandes variaciones en las condiciones de tráfico. Sin embargo, después de las 2:00 pm, en horas pico el tiempo de viaje registraba mayores variaciones.



Resultados de las Pruebas

Para no generar congestiones en el tráfico de la avenida de los Insurgentes, después de la implementación del Sistema Metrobús no se utilizó esta ruta en las campañas de medición de emisiones 2 y 3.

5.2.2.2 Ruta Corredor Insurgentes.

Esta ruta fue similar a la Insurgentes Norte, excepto que la medición de emisiones se llevó a cabo durante la noche (entre 2:00 am y 6:00 am) para simular las condiciones de manejo que se tendrían cuando el corredor Sistema Metrobús estuviera funcionando. También cambiaron las paradas consideradas en la ruta anteriormente definida, haciéndolas coincidir con las del sistema Metrobús, las cuales se tienen en la Figura 5.27.

Es importante mencionar que al iniciar estas pruebas, el “corredor” propiamente dicho tuvo que ser simulado ya que su construcción fue terminada en junio del 2005 y que aun después de entrar en operación no se permitía la circulación de otros autobuses que no fueran los del sistema BRT (Autobús de Circulación Rápida, por sus siglas en inglés); razón por la cual el resto de las pruebas previstas fueron realizadas durante la noche y fuera del carril confinado. Sin embargo las pruebas de emisiones realizadas a los 3 autobuses articulados de Metrobús si se hicieron en el carril confinado, durante la hora pico de la mañana, pero con lastre en lugar de pasajeros.

En la ruta Corredor Insurgentes, la duración total de la prueba fue reducida de 4,500 segundos a 3,600. Con la construcción del carril confinado los efectos en la congestión de tráfico para los autobuses se redujo considerablemente y se tenían menos paradas, por lo que el tiempo total de transito se redujo.

Todos los vehículos evaluados en la ruta Corredor Insurgentes fueron lastrados utilizando contenedores llenos con agua simulando el 70% de la capacidad máxima de pasajeros.



Figura 5.27 Paradas del sistema Metrobús.



5.2.2.3 Operadores.

Los hábitos de manejo tienen un impacto sustancial en la emisión de contaminantes. Razón por la cual, se solicitó que para las pruebas de emisiones se contara con un solo operador. Esto sin embargo no fue posible, dadas las restricciones laborales y la logística necesaria para el correcto desempeño de las pruebas.

En lo concerniente al entrenamiento de los operadores para que tuvieran un manejo adecuado con las pruebas, sólo se les indicó que manejaran en forma normal, ya que todos los participantes trabajaban para las empresas de transporte de pasajeros del gobierno de la ciudad. Al inicio de las campañas de prueba, se notó un poco de nerviosismo por parte de los operadores. Sin embargo, después de la primer vuelta empezaron a manejar normalmente.

Con el inicio de operaciones del sistema Metrobús, las condiciones de tráfico mejoraron en general durante la segunda campaña, especialmente en la tercera. También se pudo observar que los operadores tendían a imitar el ritmo de los autobuses articulados de Metrobús, en lugar de manejar tan rápido como fuera posible entre las paradas, como algunos hicieron en la primera campaña. La mejora en el tráfico y la reducción de la velocidad máxima dieron como resultado una reducción en las emisiones y el consumo de combustible durante las últimas campañas.

5.2.2.4 Emisiones en Relación a la Distancia Recorrida para las Campañas Realizadas.

Los resultados de la emisión de los contaminantes evaluados con el sistema RAVEM, para los autobuses a diesel se tienen en la Tabla 5.7. La Tabla 5.8 muestra los resultados para los autobuses a GNC y los microbuses. En dichas tablas también se tiene la masa de combustible consumida, la cual se calcula mediante balance de carbono. Este valor se obtiene multiplicando la emisión medida de CO_2 por 12/44 (la fracción peso de carbón contenida en la molécula de CO_2) y multiplicando la emisión medida de CO por 12/28 (la fracción peso de carbón contenida en la molécula de CO). La suma resultante se divide entre el contenido de carbón del combustible, expresado como fracción de masa. La fracción de masa de carbón se consideró como el 0.867 (lo que corresponde a la composición de combustible $\text{CH}_{1.85}$) para diesel y gasolina, 0.76 para GNC y 0.82 para GLP.



Resultados de las Pruebas

Tabla 5.7 Emisiones de contaminantes regulados y consumo de combustible para autobuses a diesel.

| Vehículo | Fecha de prueba | Ruta | No. de prueba | Emisiones [g/km] | | | | | | | | Combustible [g/km] | |
|---|-----------------|----------|---------------|------------------|------|------|-----|-------|-----|-----------------|-----|--------------------|----|
| | | | | PM | | NOx | | CO | | CO ₂ | | | |
| | | | | Prom. | σ | Prom | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 14-Dic-2004 | Norte | 3 | 0.26 | 0.05 | 8.6 | 0.1 | 2.2 | 2.4 | 945 | 4 | 298 | 2 |
| | 14-Dic-2004 | Corredor | 3 | 0.25 | 0.01 | 8.1 | 0.7 | M/D | 2.6 | 908 | 97 | 285 | 32 |
| | 26-May-2005 | Corredor | 3 | 0.17 | 0.01 | 7.2 | 0.3 | 2.4 | 0.4 | 816 | 37 | 258 | 12 |
| | 29-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.19 | 0.02 | 6.9 | 0.4 | 2.1 | 1.1 | 825 | 25 | 260 | 8 |
| RTP 2 | 6-Dic-2004 | Norte | 1 | 0.28 | - | 16.2 | - | 1.2 | - | 1,214 | - | 382 | - |
| | 6-Dic-2004 | Corredor | 2 | 0.23 | 0.02 | 15.3 | 1.4 | 3.9 | 3.0 | 1,077 | 2 | 341 | 2 |
| Volvo12 | 11-Feb-2005 | Norte | 2 | 0.68 | 0.05 | 12.1 | 0.9 | 12.8 | 0.8 | 1,007 | 123 | 323 | 39 |
| | 11-Feb-2005 | Corredor | 3 | 0.63 | 0.07 | 11.6 | 0.4 | 11.6 | 1.1 | 1,031 | 8 | 330 | 3 |
| | 13-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.55 | 0.08 | 9.6 | 0.4 | 9.9 | 0.9 | 807 | 30 | 259 | 10 |
| | 6-Sep-2005 | Corredor | 2 | 0.68 | 0.01 | 9.4 | 0.2 | 11.2 | 0.4 | 822 | 41 | 264 | 13 |
| Scania18 | 8-Feb-2005 | Norte | 2 | 2.08 | 0.07 | 7.7 | 0.1 | 10.6 | 2.1 | 1,684 | 135 | 535 | 41 |
| | 8-Feb-2005 | Corredor | 3 | 1.55 | 0.07 | 7.0 | 0.3 | 6.5 | 2.3 | 1,685 | 95 | 559 | 72 |
| MB 10 | 9-Nov-2004 | Norte | 3 | 0.13 | 0.01 | 5.0 | 0.3 | 1.4 | 0.3 | 573 | 199 | 181 | 62 |
| | 9-Nov-2004 | Corredor | 2 | 0.11 | 0.01 | 5.8 | 0.1 | 1.9 | 0.2 | 651 | 14 | 206 | 4 |
| MB 11 | 24-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.07 | 0.01 | 8.8 | 0.3 | 2.0 | 0.9 | 763 | 59 | 241 | 19 |
| | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.10 | 0.01 | 8.0 | 0.4 | 1.9 | 0.4 | 746 | 62 | 236 | 20 |
| MB 12 | 16-Dic-2004 | Norte | 3 | 0.22 | 0.01 | 14.5 | 0.1 | 4.1 | 1.7 | 1,224 | 19 | 387 | 7 |
| | 16-Dic-2004 | Corredor | 3 | 0.17 | 0.05 | 13.7 | 0.6 | 4.5 | 1.8 | 1,164 | 43 | 368 | 13 |
| Metrobuses a Diesel | | | | | | | | | | | | | |
| RTP | 7-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.45 | 0.08 | 12.2 | 0.7 | 2.5 | 0.6 | 1,574 | 82 | 497 | 26 |
| CISA | 8-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.33 | 0.02 | 16.9 | 1.2 | 8.1 | 0.6 | 1,385 | 71 | 440 | 22 |
| Fénix | 9-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.97 | 0.13 | 10.7 | 0.3 | 8.2 | 1.2 | 1,558 | 59 | 495 | 19 |
| Autobuses a Diesel con controles adicionales de emisiones | | | | | | | | | | | | | |
| RTP 3 | 8-Dic-2004 | Norte | 2 | 0.06 | 0.02 | 8.3 | 0.6 | 0.8 | 0.5 | 881 | 27 | 277 | 9 |
| | 8-Dec-2004 | Corredor | 3 | 0.08 | 0.04 | 7.6 | 0.5 | 1.2 | 1.0 | 903 | 33 | 285 | 10 |
| | 23-May-2005 | Corredor | 3 | 0.06 | 0.02 | 6.1 | 0.7 | 0.4 | 0.9 | 756 | 86 | 238 | 27 |
| | 12-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.01 | 0.01 | 5.4 | 0.2 | 1.3 | 1.8 | 721 | 37 | 228 | 12 |
| RTP 4 | 3-Dic-2004 | Norte | 3 | 0.07 | 0.01 | 14.9 | 0.6 | M/D | 2.2 | 1,274 | 34 | 399 | 12 |
| | 3-Dic-2004 | Corredor | 3 | 0.04 | 0.01 | 14.7 | 0.5 | 0.0 | 3.3 | 1,251 | 57 | 394 | 19 |
| Allison | 6-Nov-2004 | Norte | 3 | 0.03 | 0.01 | 7.4 | 0.4 | M/D | 3.6 | 1,062 | 120 | 333 | 39 |
| | 6-Nov-2004 | Corredor | 3 | 0.03 | 0.01 | 5.8 | 0.4 | M/D | 3.1 | 1,203 | 94 | 378 | 28 |
| Eletrabus | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.05 | 0.00 | 21.3 | 0.2 | 3.0 | 1.1 | 946 | 4 | 299 | 1 |

M/D: Menor al mínimo detectable.



Tabla 5.8 Emisiones de contaminantes regulados y consumo de combustible para autobuses a GNC y microbuses.

| Vehiculo | Fecha de prueba | Ruta | No. de prueba | Emisiones [g/km] | | | | | | | | Combustible [g/km] | |
|-------------------------|-----------------|----------|---------------|------------------|------|-------|-----|-------|------|-----------------|-----|--------------------|----|
| | | | | PM | | NOx | | CO | | CO ₂ | | | |
| | | | | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ |
| Autobuses a Gas Natural | | | | | | | | | | | | | |
| Busscar | 3-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.04 | 0.03 | 5.6 | 0.2 | 0.0 | 0.0 | 1,087 | 20 | 390 | 7 |
| | 3-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.01 | 4.4 | 0.9 | 0.2 | 0.3 | 945 | 158 | 339 | 57 |
| | 8-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.01 | 0.03 | 6.4 | 0.4 | M/D | 0.4 | 913 | 7 | 328 | 3 |
| | 3-Oct-2005 | Corredor | 3 | 0.01 | 0.01 | 5.7 | 0.4 | 0.0 | 0.1 | 768 | 65 | 276 | 23 |
| FAW | 4-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.03 | 0.02 | 8.3 | 0.3 | M/D | 0.8 | 1,100 | 58 | 395 | 21 |
| | 4-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.02 | 0.00 | 9.9 | 1.9 | 5.1 | 8.3 | 1,261 | 28 | 455 | 5 |
| | 27-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.03 | 0.04 | 14.4 | 0.7 | 0.6 | 1.0 | 1,184 | 38 | 425 | 14 |
| | 4-Oct-2005 | Corredor | 3 | 0.03 | 0.01 | 6.7 | 0.9 | M/D | 2.3 | 1,021 | 34 | 365 | 14 |
| Ankai | 5-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.02 | 0.01 | 6.1 | 0.2 | 0.6 | 0.7 | 1,051 | 31 | 378 | 11 |
| | 5-Feb-2005 | Corredor | 3 | 0.02 | 0.00 | 4.8 | 0.3 | 0.4 | 0.1 | 924 | 32 | 332 | 11 |
| | 5-Oct-2005 | Corredor | 3 | 0.02 | 0.00 | 3.9 | 0.9 | M/D | 0.3 | 842 | 84 | 302 | 30 |
| Microbuses | | | | | | | | | | | | | |
| M-LPG | 24-Feb-2005 | Norte | 1 | 0.02 | - | 3.3 | - | 82.1 | - | 605 | - | 244 | - |
| | 24-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.02 | 0.01 | 4.6 | 0.2 | 79.5 | 0.4 | 759 | 11 | 294 | 3 |
| | 11-Nov-2005 | Montevid | 1 | N/E | - | 3.6 | - | 55.7 | - | 431 | - | 173 | - |
| M-CNG | 9-Mar-2005 | Norte | 2 | 0.01 | 0.01 | 4.8 | 0.0 | 30.1 | 6.3 | 530 | 27 | 207 | 13 |
| | 9-Mar-2005 | Corredor | 1 | 0.01 | - | 3.9 | - | 40.1 | - | 479 | - | 195 | - |
| M-D-CNG | 3-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.01 | 0.01 | 2.7 | 0.2 | M/D | 0.4 | 527 | 10 | 189 | 4 |
| | 7-Oct-2005 | Corredor | 1 | 0.00 | - | 7.2 | - | 4.1 | - | 587 | - | 213 | - |
| M-D-Gsln | 6-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.01 | 0.00 | 0.3 | 0.0 | 147.8 | 11.0 | 661 | 42 | 281 | 12 |
| | 6-Oct-2005 | Corredor | 2 | 0.01 | 0.00 | 0.1 | 0.0 | 235.0 | 17.7 | 646 | 39 | 319 | 21 |
| M-Gsln | 10-Mar-2005 | Norte | 1 | 0.22 | - | 9.6 | - | 362.4 | - | 1,177 | - | 549 | - |
| | 10-Mar-2005 | Corredor | 2 | 0.16 | 0.03 | 8.9 | 0.3 | 250.2 | 44.1 | 915 | 70 | 412 | 44 |

N/E: No Estimado. M/D: Menor al mínimo detectable.

5.2.2.4.1 Campaña de pruebas 1.

Esta campaña se caracteriza por ser la de mayor duración, cerca de 2 meses, ya que es la única en la que se tuvieron las condiciones para hacer mediciones en condiciones previas a la construcción del corredor y simulando las condiciones que se tendrían con el corredor funcionando.

Las emisiones de partículas durante la campaña 1 se muestran en la Figura 5.28, donde tenemos que de los vehículos a diesel sin trampas de partículas, los RTP1 y RTP2 mostraron emisiones moderadas de PM, lo cual refleja su reciente repotenciación y en general un buen programa de mantenimiento de la RTP. Las emisiones de los autobuses Volvo 12 y Scania 18 fueron significativamente mayores en términos de gramos por



Resultados de las Pruebas

kilómetro. Por otro lado, los vehículos que utilizan GNC mostraron las menores emisiones de este contaminante. Al compara las emisiones entre la ruta Insurgentes y con Corredor, podemos ver que, en general las condiciones de Corredor generaron emisiones menores.

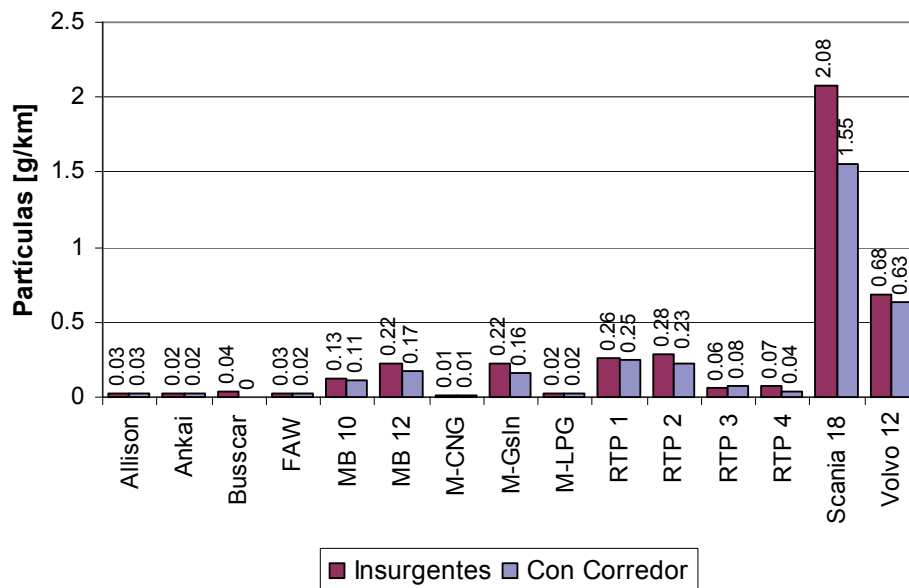


Figura 5.28 Emisiones de partículas con y sin corredor en la campaña 1.

En la Figura 5.29 podemos ver que las mayores emisiones de óxidos de nitrógeno para ambas rutas, fueron las del autobús RTP2, seguidas del RTP4 y el Mercedes Benz de 12 metros. Entre los que generan menos emisiones de este contaminante, tenemos a los vehículos que utilizan GNC o GLP como combustible, como son el Busscar y los microbuses; para esta tecnología cabe destacar la alta emisión del FAW. Es destacable también que en general, las emisiones en condiciones de corredor son menores que en la ruta Insurgentes.

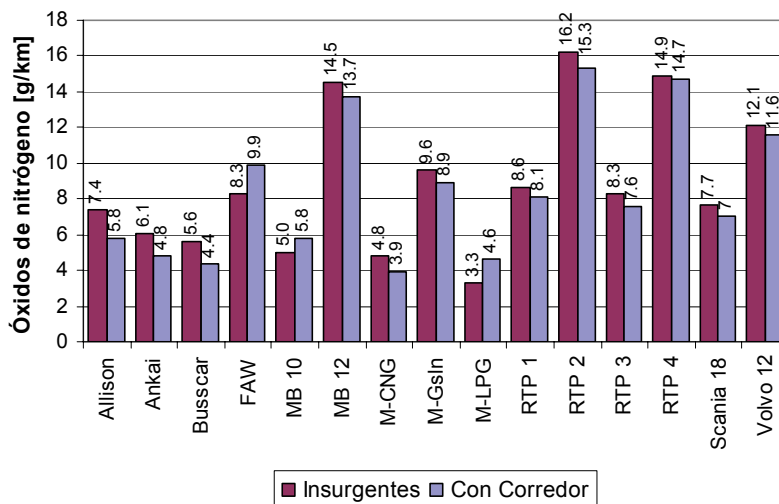


Figura 5.29 Emisiones de óxidos de nitrógeno con y sin corredor en la campaña 1.



Dentro de los autobuses a diesel evaluados, las emisiones de PM y NOx de los vehículos equipados con Filtros de Partículas para Diesel, el autobús híbrido Allison mostró las menores emisiones, comparables a las de los autobuses a GNC. Considerando los autobuses nuevos, el MB10 y el MB11 mostraron las menores emisiones de NOx y PM. El MB10 se reporta como un vehículo con certificación de emisiones EPA 2004, mientras que el MB11 es un EPA 1998.

Las emisiones de PM y NOx para todos los vehículos a GNC y para el microbús a GLP fueron muy bajas, como se esperaba. El proceso de combustión en este tipo de motores no forma partículas, excepto con mezclas muy ricas de combustible; por lo cual las emisiones de PM se limitan a pequeñas cantidades de aceite lubricante. Sin embargo, el microbús a gasolina mostró emisiones de PM sustanciales. La posible fuente de dichas PM es un exceso de aceite lubricante en el escape (debida a desgaste en los anillos de los pistones y en el sello de las válvulas) y/o a la formación de hollín durante el proceso de combustión con mezclas muy ricas de combustible. Este vehículo también mostró emisiones muy altas de CO, lo cual indica que durante la mayor parte de la prueba se tuvo una combustión rica en combustible.

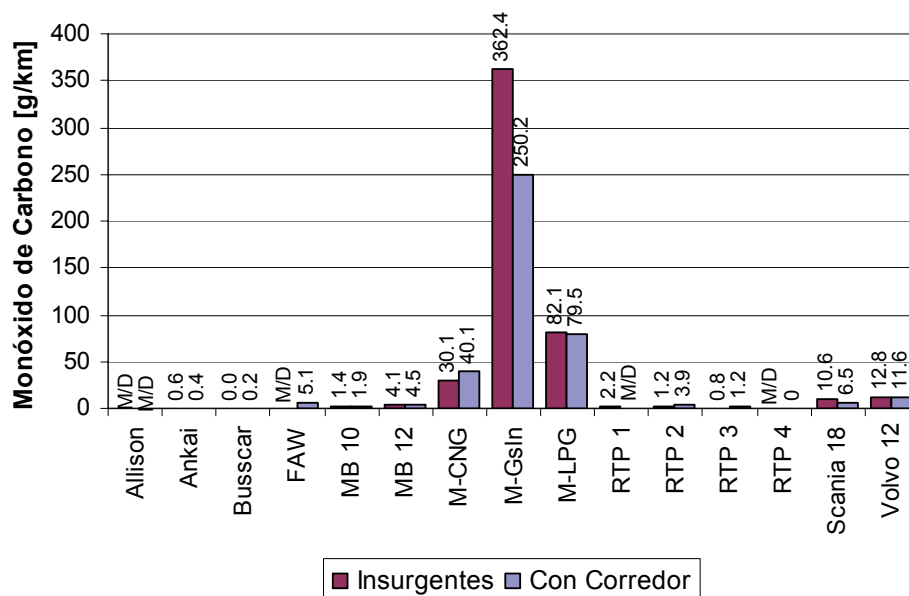
Cuando se midieron las emisiones del microbús dual usando gasolina, mostró las menores emisiones de NOx de todos los vehículos evaluados (0.1 a 0.3 g/km). Estas bajas emisiones de NOx se atribuyen al uso de un convertidor catalítico de 3 vías junto con una mezcla rica aire-combustible. Al utilizar GNC como combustible, fue evidente que dicha mezcla era pobre ya que las emisiones de CO fueron cercanas a cero, pero las de NOx fueron varias veces mayor.

En la Figura 5.30 tenemos que las emisiones de CO de todos los autobuses a diesel y a GNC fueron relativamente bajas en casi todos los casos, manteniéndose en el límite de detección del equipo e incluso debajo del mismo. Entre los vehículos a diesel, los de mayores emisiones fueron el Volvo12 y el Scania18, que también mostraron las mayores emisiones de PM; para los otros combustibles los microbuses emiten varias veces más monóxido de carbono. En otros estudios también se ha encontrado una relación entre altas emisiones de CO y de PM en vehículos a diesel¹⁶.

¹⁶ Yanowitz, J. ; Graboski, M.S. ; Ryan, L.B.A. ; Alleman, T.L. ; and McCormick, R.L. "Chassis dynamometer study of emissions from 21 in-use heavy-duty diesel vehicles". Environmental Science and Technology ; VOL. 33 ; ISSUE: 2 ; PBD: 15 Jan 1999.



Resultados de las Pruebas



M/D: Menor al mínimo Detectable.

Figura 5.30 Emisiones de monóxido de carbono con y sin corredor en la campaña 1.

Para analizar los resultados de las emisiones de dióxido de carbono, tenemos la Figura 5.31, en donde se observa que las mayores emisiones reportadas son las del autobús Scania de 18 metros, siendo muy similares sus emisiones para la ruta Insurgentes y para el corredor; junto con éste tenemos al RTP4 y al RTP2. Entre los menores emisores tenemos al microbús a GNC y el Mercedes Benz de 10 metros.

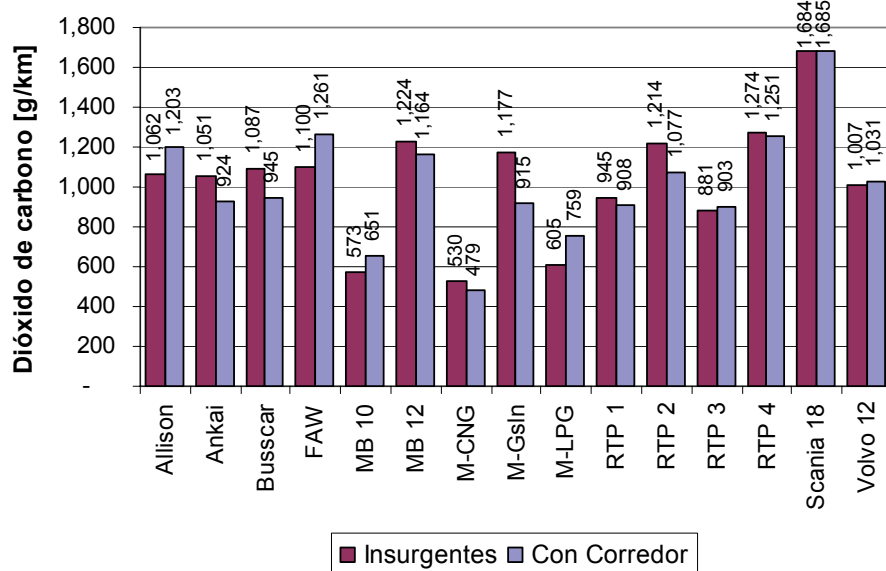


Figura 5.31 Emisiones de dióxido de carbono con y sin corredor en la campaña 1.



5.2.2.4.2 Campañas de pruebas 2 y 3.

Dado que el Metrobús inició operaciones el 20 de junio del 2005, durante las campañas 2 y 3 sólo se hicieron pruebas aplicando la ruta Corredor. En las siguientes figuras se comparan las emisiones entre estas campañas, las cuales se realizaron con un mes de diferencia, aproximadamente. Los autobuses evaluados varían con respecto a la campaña 1, ya que algunos autobuses sufrieron retrasos para llegar al país o como es el caso de los autobuses del Metrobús, no se habían adquirido y sólo se tienen en la campaña 3.

De los autobuses evaluados en las campañas 2 y 3, ver Figura 5.32, tenemos que los autobuses Volvo de 12 metros, el RTP1 y el Mercedes Benz de 11 metros mostraron emisiones de PM mayores en la campaña 3, sin embargo el autobús RTP3, el cual tenía instalado una trampa de partículas, registró emisiones menores en la campaña 3 y éstas son menores que en la campaña 1 en condiciones de corredor. El mayor emisor resultó ser el Fénix, un autobús reconstruido perteneciente a Metrobús, los menos emisores fueron el Busscar y el microbús dual utilizando gasolina. Comparando los resultados de emisiones que se tienen al aplicar la ruta Insurgentes Norte y la ruta Corredor Insurgentes, es notoria una reducción en casi todos los casos de la segunda ruta, en las emisiones de PM por tener menos paradas.

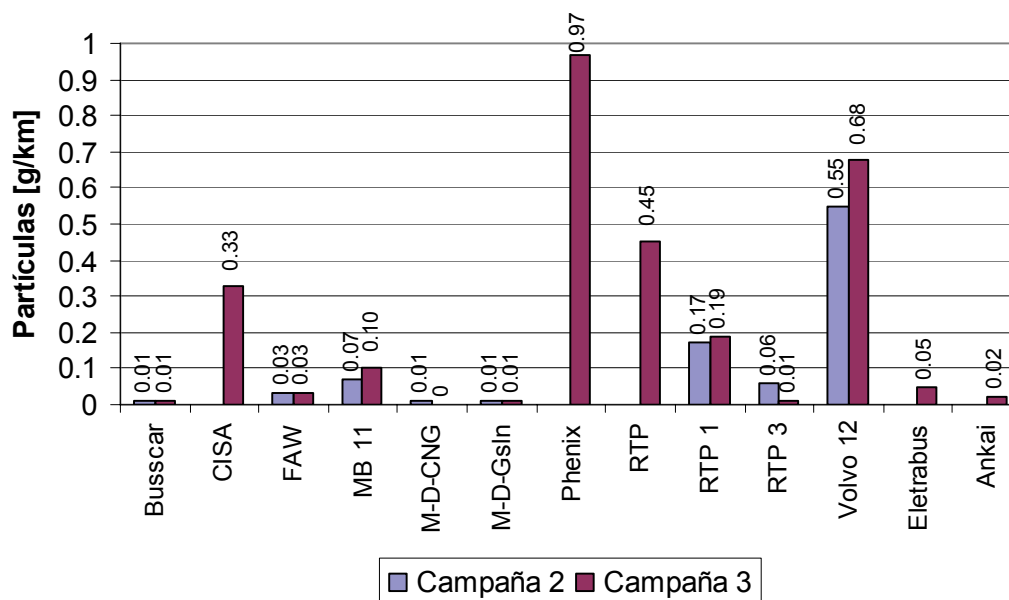


Figura 5.32 Emisiones de partículas con corredor en las campañas 2 y 3.

En la Figura 5.33 tenemos las emisiones de óxidos de nitrógeno obtenidas durante las campañas 2 y 3 y de la cual tenemos que el autobús Eletrabus tiene las mayores emisiones, seguido por el autobús articulado CISA; el autobús con las menores emisiones fue el microbús dual utilizando gasolina en la campaña 3 y utilizando GNC en la segunda campaña. Los autobuses RTP1 y RTP3 mostraron menores emisiones en la campaña 3 con relación a la campaña 2.



Resultados de las Pruebas

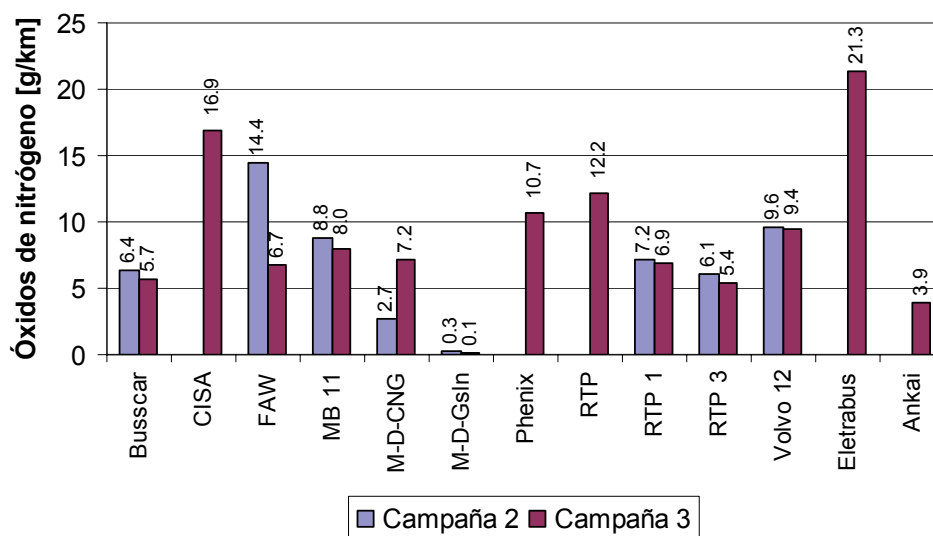


Figura 5.33 Emisiones de óxidos de nitrógeno con corredor en las campañas 2 y 3.

El autobús híbrido Eletrabús también mostró emisiones muy bajas de PM, pero también las mayores emisiones de NOx de todos los vehículos. Los autobuses RTP3 y RTP4 (ambos equipados con trampas de partículas pertenecientes a RTP) mostraron emisiones muy bajas de PM y dichas emisiones aparentemente disminuyen en el transcurso de las 3 campañas de muestreo, lo cual puede deberse al efecto de filtro de las cenizas acumuladas en el DPF.

Las emisiones de NOx de los autobuses certificados como Euro 3, Volvo12 y Scania18, también fueron bajas, pero las emisiones de PM de éstos en las campañas fueron mucho mayores que las de otros vehículos con motores similares que participaron en las pruebas. La diferencia en emisiones de PM entre el Scania18 y el de Scania de Metrobús (RTP) es notable. Ambos son vehículos de 18 metros articulados fabricados por la misma empresa y con el mismo motor (Scania DC9, 300 HP Euro 3); la emisión de PM del Scania18, 3 veces mayor, sugiere que el Scania18 no fue ajustado para la altura de la Ciudad de México o que no fue operado adecuadamente. En el caso del Volvo12 se indicó por parte de la empresa que el vehículo no fue ajustado para la Ciudad de México y que además se tuvieron problemas con el turbo cargador durante la mayor parte del programa de pruebas.

La mayoría de los vehículos mostrados en la Figura 5.34 registraron emisiones de monóxido de carbono bajas, incluso por debajo de las concentraciones presentes en el ambiente, destacando sin embargo las altas emisiones del microbús dual al utilizar gasolina como combustible tanto en la campaña 2 como en la 3. El microbús dedicado a gasolina mostró altos niveles de NOx, CO y PM, lo cual es indicio de que el convertidor catalítico de 3 vías no estaba funcionando adecuadamente. Los microbuses a GNC y GLP mostraron niveles medios de CO y NOx. Tanto con GNC como con GLP, la combinación de un convertidor catalítico en óptimas condiciones y una apropiada relación aire-combustible son capaces de reducir sustancialmente los niveles tanto de NOx y CO.

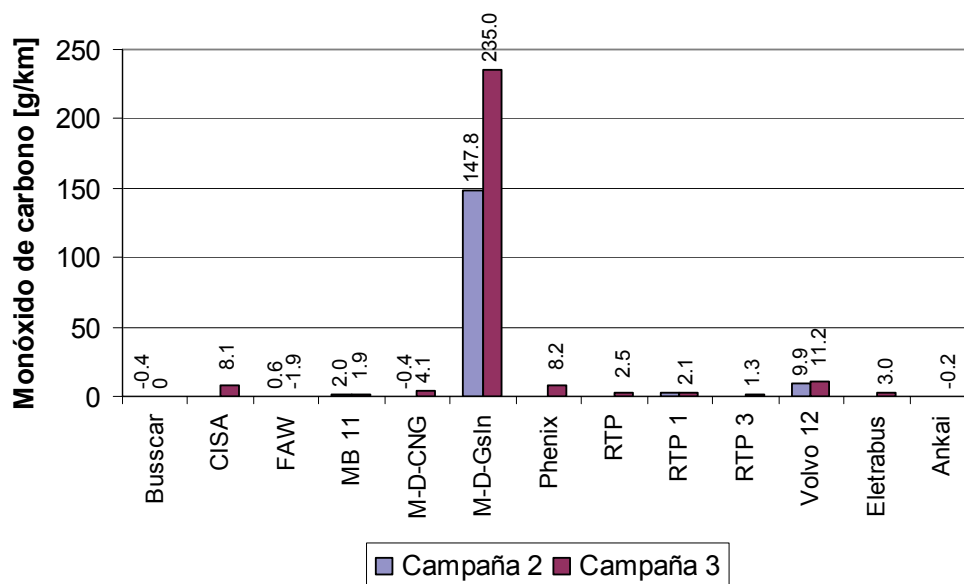


Figura 5.34 Emisiones de monóxido de carbono con corredor en las campañas 2 y 3.

En la Figura 5.34 tenemos las emisiones de dióxido de carbono, de ésta tenemos que los mayores emisores fueron los autobuses de Metrobús Fénix y RTP, los cuales participaron únicamente en la campaña 3; el microbús dual utilizando tanto gasolina como GNC fue el de menores emisiones de este gas de efecto invernadero. De los vehículos que participaron en las dos campañas, tenemos que la mayoría mostró emisiones menores en la campaña 3 o bien la variación fue mínima.

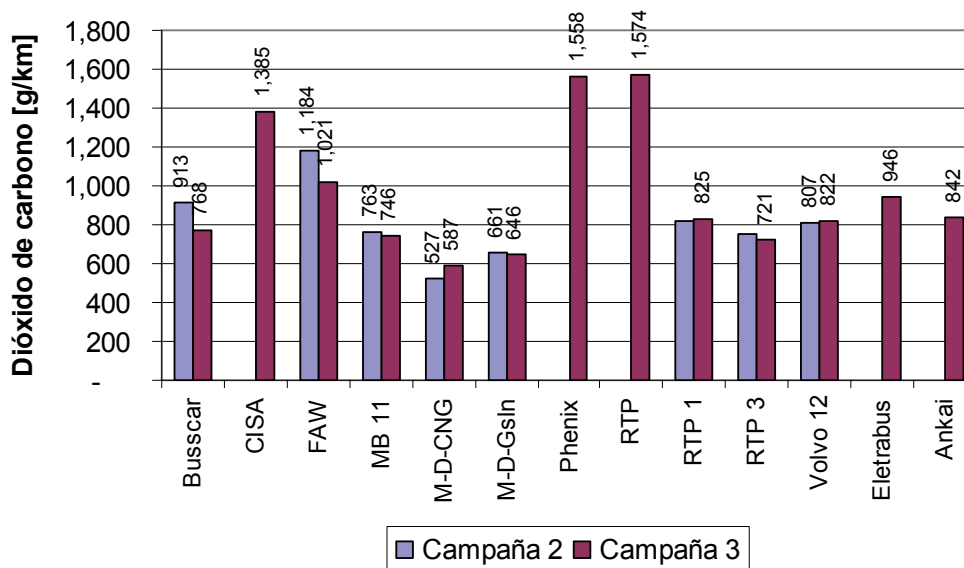


Figura 5.35 Emisiones de dióxido de carbono con corredor en las campañas 2 y 3.



El rendimiento de combustible y las emisiones de NOx fueron frecuentemente tan altas o mayores en Corredor que en la ruta Norte durante la primer campaña de pruebas, pero fueron generalmente menores en la segunda y tercer campañas. Durante la primer campaña muchos de los operadores tomaron ventaja de la ausencia de tráfico para aumentar la velocidad al aplicar la ruta Corredor, lo cual dió como resultado un aumento en el consumo de combustible. Dicha tendencia se redujo en las campañas 2 y 3, en las cuales el operador fue capaz de comparar sus velocidades con la velocidad normal del Metrobús que circulaba en el carril confinado.

5.2.2.5 Emisiones en Relación a los Pasajeros Transportados y la Distancia Recorrida para las Campañas Realizadas.

Dado que los autobuses evaluados durante las 3 campañas de medición de emisiones contaminantes utilizando el sistema RAVEM, fueron diseñados para transportar diferente número de pasajeros, se hace necesario considerar las emisiones y el consumo de combustible de acuerdo al número de pasajeros transportados y la distancia recorrida (gramos de contaminante/ pasajero-kilómetro) y comparar así su desempeño. La Tabla 5.9 muestra estos datos para los autobuses a diesel, mientras que en la Tabla 5.10 los tenemos para los autobuses a GNC y los microbuses. Dado que en las pruebas realizadas se simuló la cantidad de pasajeros al 70%, las emisiones por pasajero-kilómetro se reportan haciendo esta misma consideración.



Tabla 5.9 Emisiones de los autobuses a diesel por pasajero-kilómetro.

| Vehículo | Fecha de prueba | Ruta | No. pruebas | Pas/ Autobús | [mg/pas-km] | | | | | | [g/pas-km] | | | |
|--|-----------------|----------|-------------|--------------|-------------|-----|-------|----|-------|----|-----------------|-----|-------|-----|
| | | | | | PM | | NOx | | CO | | CO ₂ | | Comb. | |
| | | | | | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 14- Dic-2004 | Norte | 3 | 85 | 4.4 | 0.8 | 144 | 2 | 36 | 40 | 15.9 | 0.1 | 5.0 | 0.0 |
| | 14- Dic-2004 | Corredor | 3 | | 4.1 | 0.2 | 136 | 12 | M/D | 44 | 15.3 | 1.6 | 4.8 | 0.5 |
| | 26-May2005 | Corredor | 3 | | 2.9 | 0.2 | 122 | 6 | 40 | 7 | 13.7 | 0.6 | 4.3 | 0.2 |
| | 29-Sep-2005 | Corredor | 3 | | 3.2 | 0.4 | 116 | 8 | 36 | 18 | 13.9 | 0.4 | 4.4 | 0.1 |
| RTP 2 | 6- Dic-2004 | Norte | 1 | 85 | 4.7 | - | 272 | - | 20 | - | 20.4 | - | 6.4 | - |
| | 6- Dic-2004 | Corredor | 2 | | 3.9 | 0.3 | 257 | 23 | 66 | 50 | 18.1 | 0.0 | 5.7 | 0.0 |
| Volvo12 | 11-Feb-2005 | Norte | 2 | 90 | 10.7 | 0.8 | 191 | 14 | 203 | 13 | 16.0 | 2.0 | 5.1 | 0.6 |
| | 11-Feb-2005 | Corredor | 3 | | 10.1 | 1.1 | 184 | 7 | 184 | 18 | 16.4 | 0.1 | 5.2 | 0.0 |
| | 13-Jun-2005 | Corredor | 3 | | 8.7 | 1.2 | 152 | 6 | 158 | 15 | 12.8 | 0.5 | 4.1 | 0.2 |
| | 6-Sep-2005 | Corredor | 2 | | 10.7 | 0.1 | 150 | 4 | 178 | 6 | 13.0 | 0.7 | 4.2 | 0.2 |
| Scania18 | 8-Feb-2005 | Norte | 2 | 160 | 18.6 | 0.6 | 68 | 1 | 94 | 19 | 15.0 | 1.2 | 4.8 | 0.4 |
| | 8-Feb-2005 | Corredor | 3 | | 13.8 | 0.6 | 62 | 3 | 58 | 21 | 15.0 | 0.9 | 5.0 | 0.6 |
| MB 10 | 9-Nov-2004 | Norte | 3 | 80 | 2.3 | 0.1 | 89 | 6 | 26 | 6 | 10.2 | 3.6 | 3.2 | 1.1 |
| | 9-Nov-2004 | Corredor | 2 | | 2.0 | 0.2 | 103 | 1 | 34 | 3 | 11.6 | 0.2 | 3.7 | 0.1 |
| MB 11 | 24-Jun-2005 | Corredor | 3 | 85 | 1.2 | 0.1 | 147 | 5 | 34 | 16 | 12.8 | 1.0 | 4.0 | 0.3 |
| | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | | 1.7 | 0.2 | 135 | 6 | 31 | 7 | 12.5 | 1.0 | 4.0 | 0.3 |
| MB 12 | 16-Dic-2004 | Norte | 3 | 90 | 3.5 | 0.2 | 230 | 2 | 64 | 27 | 19.4 | 0.3 | 6.1 | 0.1 |
| | 16-Dic-2004 | Corredor | 3 | | 2.7 | 0.8 | 217 | 10 | 71 | 29 | 18.5 | 0.7 | 5.8 | 0.2 |
| Metrobuses a Diesel | | | | | | | | | | | | | | |
| RTP | 7-Sep-2005 | Corredor | 3 | 160 | 4.0 | 0.7 | 109 | 6 | 22 | 6 | 14.1 | 0.7 | 4.4 | 0.2 |
| CISA | 8-Sep-2005 | Corredor | 3 | 160 | 3.0 | 0.2 | 151 | 11 | 72 | 5 | 12.4 | 0.6 | 3.9 | 0.2 |
| Fénix | 9-Sep-2005 | Corredor | 3 | 160 | 8.7 | 1.2 | 95 | 3 | 73 | 11 | 13.9 | 0.5 | 4.4 | 0.2 |
| Autobuses a diesel con sistema de control de emisiones | | | | | | | | | | | | | | |
| RTP 3 | 8-Dic-2004 | Norte | 2 | 85 | 1.1 | 0.3 | 139 | 10 | 14 | 8 | 14.8 | 0.5 | 4.7 | 0.1 |
| | 8- Dic -2004 | Corredor | 3 | | 1.4 | 0.7 | 128 | 8 | 21 | 17 | 15.2 | 0.6 | 4.8 | 0.2 |
| | 23-May2005 | Corredor | 3 | | 1.0 | 0.4 | 103 | 11 | 7 | 15 | 12.7 | 1.5 | 4.0 | 0.5 |
| | 12-Sep-2005 | Corredor | 3 | | 0.2 | 0.2 | 91 | 3 | 22 | 30 | 12.1 | 0.6 | 3.8 | 0.2 |
| RTP 4 | 3- Dic -2004 | Norte | 3 | 85 | 1.2 | 0.2 | 251 | 10 | M/D | 38 | 21.4 | 0.6 | 6.7 | 0.2 |
| | 3- Dic -2004 | Corredor | 3 | | 0.7 | 0.2 | 246 | 9 | 0 | 56 | 21.0 | 1.0 | 6.6 | 0.3 |
| Allison | 6-Nov-2004 | Norte | 3 | 110 | 0.4 | 0.2 | 96 | 5 | M/D | 46 | 13.8 | 1.6 | 4.3 | 0.5 |
| | 6-Nov-2004 | Corredor | 3 | | 0.4 | 0.1 | 76 | 5 | M/D | 41 | 15.6 | 1.2 | 4.9 | 0.4 |
| Eletrabus | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | 85 | 0.8 | 0.1 | 357 | 4 | 50 | 19 | 15.9 | 0.1 | 5.0 | 0.0 |

M/D: Menor al mínimo detectable.



Resultados de las Pruebas

Tabla 5.10 Emisiones de autobuses a GNC y microbuses por pasajero-kilómetro.

| Vehiculo | Fecha de prueba | Ruta | No. pruebas | Pas/ Autobús | [mg/pas-km] | | | | | | [g/pas-km] | | | |
|------------------------------------|-----------------|----------|-------------|-----------------|-------------|-----|------|----|-------|------|-----------------|-----|-------|-----|
| | | | | | PM | | NOx | | CO | | CO ₂ | | Comb. | |
| | | | | | Prom | σ | Prom | σ | Prom | σ | Prom | σ | Prom | σ |
| Autobuses a Gas Natural Comprimido | | | | | | | | | | | | | | |
| Busscar | 3-Feb-2005 | Norte | 3 | 85 | 0.7 | 0.4 | 93 | 4 | 1 | 0 | 18.3 | 0.3 | 6.6 | 0.1 |
| | 3-Feb-2005 | Corredor | 2 | | 0.1 | 0.1 | 75 | 15 | 4 | 5 | 15.9 | 2.7 | 5.7 | 1.0 |
| | 8-Jun-2005 | Corredor | 3 | | 0.2 | 0.4 | 107 | 7 | M/D | 6 | 15.4 | 0.1 | 5.5 | 0.0 |
| | 3-Oct-2005 | Corredor | 3 | | 0.2 | 0.2 | 96 | 7 | 1 | 1 | 12.9 | 1.1 | 4.6 | 0.4 |
| FAW | 4-Feb-2005 | Norte | 3 | 120 | 0.3 | 0.2 | 98 | 4 | M/D | 10 | 13.1 | 0.7 | 4.7 | 0.3 |
| | 4-Feb-2005 | Corredor | 2 | | 0.2 | 0.0 | 117 | 22 | 60 | 99 | 15.0 | 0.3 | 5.4 | 0.1 |
| | 27-Jun-2005 | Corredor | 3 | | 0.4 | 0.4 | 171 | 8 | 7 | 12 | 14.1 | 0.5 | 5.1 | 0.2 |
| | 4-Oct-2005 | Corredor | 3 | | 0.4 | 0.1 | 80 | 10 | M/D | 27 | 12.2 | 0.4 | 4.3 | 0.2 |
| Ankai | 5-Feb-2005 | Norte | 3 | 85 | 0.3 | 0.1 | 102 | 3 | 11 | 12 | 17.7 | 0.5 | 6.3 | 0.2 |
| | 5-Feb-2005 | Corredor | 3 | | 0.3 | 0.1 | 80 | 6 | 6 | 1 | 15.5 | 0.5 | 5.6 | 0.2 |
| | 5-Oct-2005 | Corredor | 3 | | 0.3 | 0.1 | 66 | 15 | M/D | 5 | 14.2 | 1.4 | 5.1 | 0.5 |
| Microbuses | | | | | | | | | | | | | | |
| M-LPG | 24-Feb-2005 | Norte | 1 | 35 | 0.7 | - | 137 | - | 3351 | - | 24.7 | - | 10.0 | - |
| | 24-Feb-2005 | Corredor | 2 | | 0.7 | 0.3 | 186 | 9 | 3245 | 14 | 31.0 | 0.4 | 12.0 | 0.1 |
| | 11-Nov-2005 | Montev | 1 | | N/E | - | 147 | - | 2275 | - | 17.6 | - | 7.0 | - |
| M-GNC | 9-Mar2005 | Norte | 2 | 35 | 0.4 | 0.5 | 196 | 1 | 1227 | 257 | 21.6 | 1.1 | 8.4 | 0.5 |
| | 9-Mar2005 | Corredor | 1 | | 0.4 | - | 161 | - | 1637 | - | 19.6 | - | 7.9 | - |
| M-D-GNC | 3-Jun-2005 | Corredor | 3 | 35 | 0.2 | 0.3 | 108 | 7 | M/D | 16 | 21.5 | 0.4 | 7.7 | 0.1 |
| | 7-Oct-2005 | Corredor | 1 | | 0.1 | - | 294 | - | 166 | - | 24.0 | - | 8.7 | - |
| M-D-Gsln | 6-Jun-2005 | Corredor | 3 | 35 | 0.2 | 0.1 | 14 | 1 | 6031 | 447 | 27.0 | 1.7 | 11.5 | 0.5 |
| | 6-Oct-2005 | Corredor | 2 | | 0.3 | 0.1 | 4 | 1 | 9593 | 723 | 26.4 | 1.6 | 13.0 | 0.9 |
| M-Gsln | 10-Mar2005 | Norte | 1 | 35 | 8.9 | - | 390 | - | 14791 | - | 48.0 | - | 22.4 | - |
| | 10-Mar2005 | Corredor | 2 | | 6.5 | 1.4 | 362 | 12 | 10214 | 1799 | 37.4 | 2.9 | 16.8 | 1.8 |

M/D: Menor al mínimo detectable. N/E: No Estimado.

Al incluir en el análisis de las emisiones generadas al número de pasajeros, tenemos las siguientes figuras, en las cuales se comparan las emisiones promedio en las 3 campañas de prueba de los autobuses evaluados con el sistema RAVEM, agrupándolos de acuerdo con la capacidad de pasajeros y el combustible que utilizan, los que transportan hasta 40 pasajeros se refiere a los microbuses y de los autobuses tenemos desde los que tiene una capacidad de 90 pasajeros hasta los articulados que tienen la mayor capacidad, los cuales pueden transportar hasta 160 pasajeros por autobús.



En la Figura 5.36 tenemos las emisiones de partículas, en este caso dada la gran diferencia que existe en las emisiones de este contaminante entre el diesel y el GNC, este último reporta las emisiones más bajas de los combustibles evaluados, incluso menores que los autobuses híbridos. Los mayores emisores son los autobuses con capacidades de 160 pasajeros y los microbuses a gasolina.

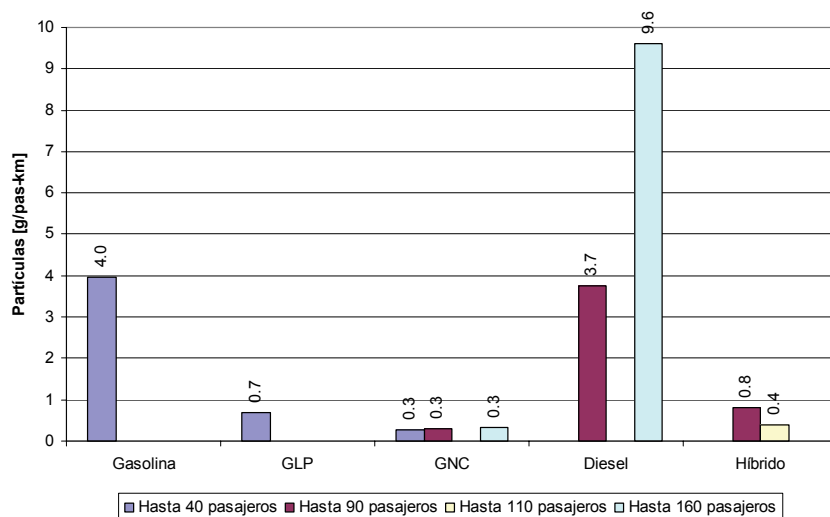


Figura 5.36 Emisiones de partículas de los autobuses a diesel con y sin corredor en la campaña 1.

De las emisiones de óxidos de nitrógeno, ver Figura 5.37, tenemos que los autobuses con las menores emisiones, son los autobuses a GNC de 90 pasajeros, seguidos de los autobuses articulados que utilizan diesel y los articulados que utilizan GNC como combustible. Para este contaminante destacan las altas emisiones del autobús híbrido con capacidad de 90 pasajeros, a las cuales siguen en magnitud las de los microbuses a gasolina y a GNC.

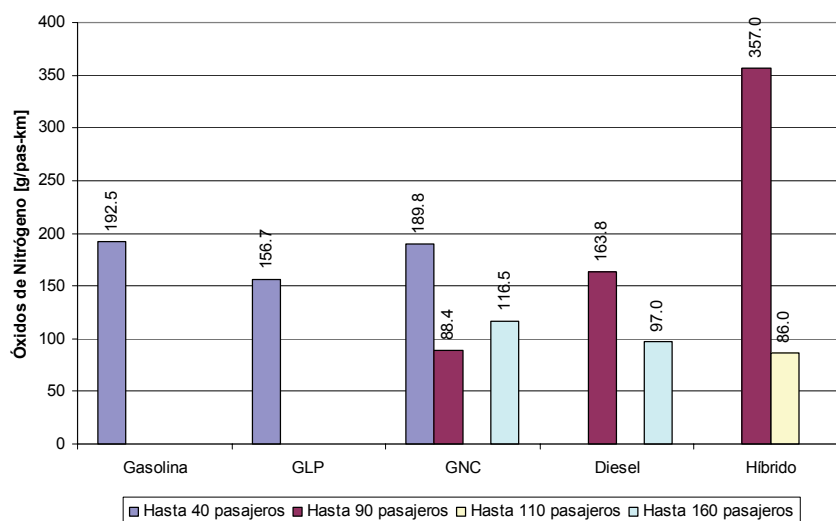


Figura 5.37 Emisiones de óxidos de nitrógeno de los autobuses a diesel con y sin corredor en la campaña 1.



Resultados de las Pruebas

Los autobuses evaluados en este proyecto se caracterizaron por tener emisiones bajas de CO y al analizar el comportamiento de dicho contaminante en relación a los pasajeros transportados, podemos ver el mismo comportamiento en la Figura 5.38, de donde destacan las altas emisiones de los microbuses utilizando gasolina, GNC y GLP. En el caso de los autobuses de 90 y de 160 pasajeros hay muy poca diferencia entre sus emisiones de monóxido de carbono y el menor emisor fue el autobús de 90 pasajeros a GNC.

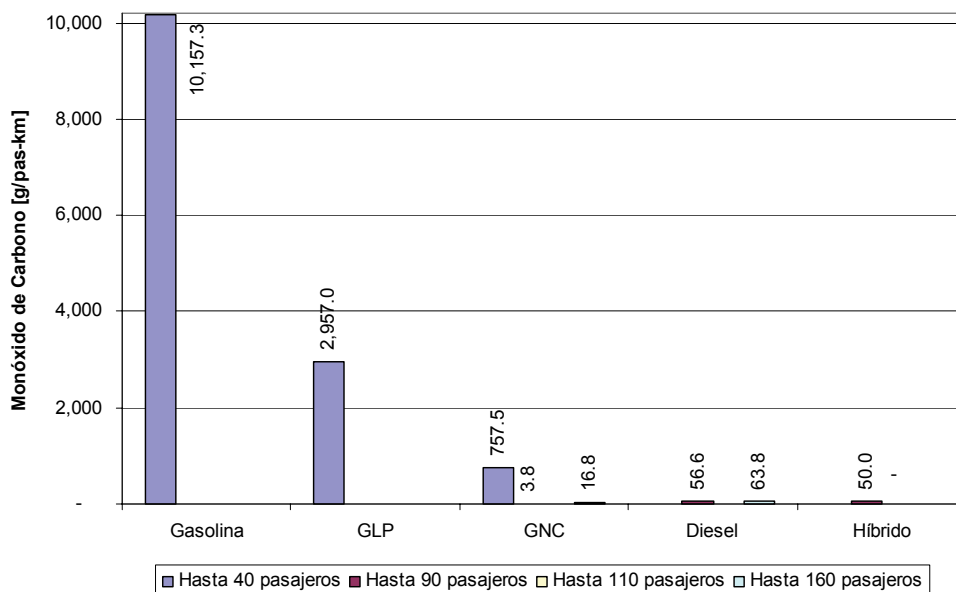


Figura 5.38 Emisiones de monóxido de carbono de los autobuses a diesel con y sin corredor en la campaña 1.

Las emisiones de dióxido de carbono se muestran en la Figura 5.39, de donde tenemos que los autobuses articulados produjeron las menores emisiones y son muy similares para los autobuses que utilizan GNC con capacidad de 90 pasajeros y los vehículos híbridos de 90 y 110 pasajeros. Al igual que en caso del monóxido de carbono, los microbuses de gasolina, GNC y GLP fueron los de mayores emisiones al calcular las emisiones con respecto a los pasajeros transportados.

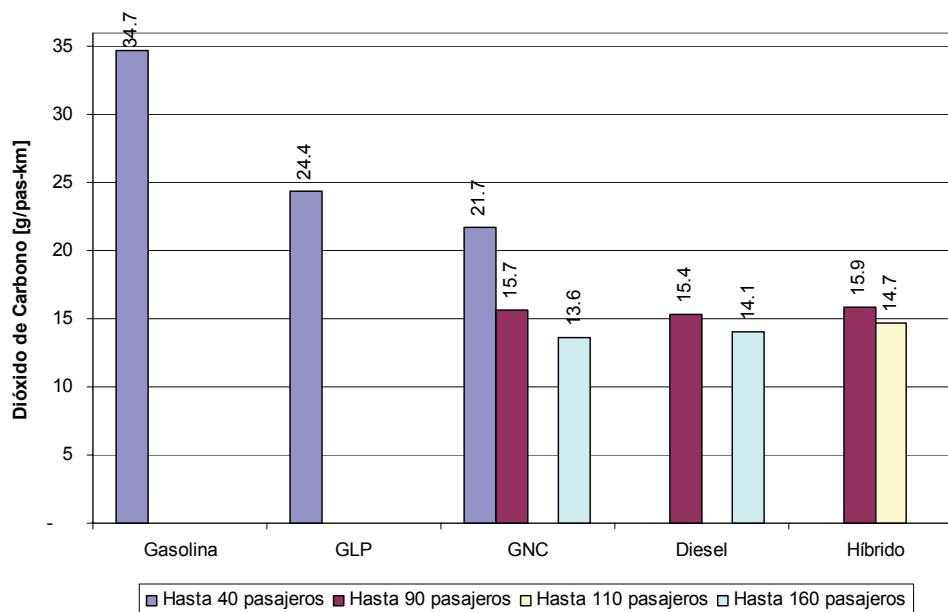


Figura 5.39 Emisiones de dióxido de carbono de los autobuses a diesel con y sin corredor en la campaña 1.

5.2.2.6 Comparativo de Emisiones de las Rutas Insurgentes y Corredor.

En Figura 5.40. se muestra un análisis estadístico de los resultados de las emisiones en las dos rutas de prueba. Para que los resultados no se vieran sesgados por el modo agresivo de manejar observado en la primera campaña, se limitó el análisis a aquellos autobuses en los que se tuvieron datos durante las 3 campañas en la ruta Insurgentes. Lo anterior limitó la muestra a 3 vehículos a diesel y 3 a GNC. Tres de los seis autobuses mostrados tienen una reducción estadística significativa en las emisiones de CO₂. La reducción promedio fue de 10% para los 3 autobuses a diesel combinados y 11% para los 3 autobuses a GNC, destacando la reducción de emisiones de monóxido de carbono para los autobuses que utilizan GNC.

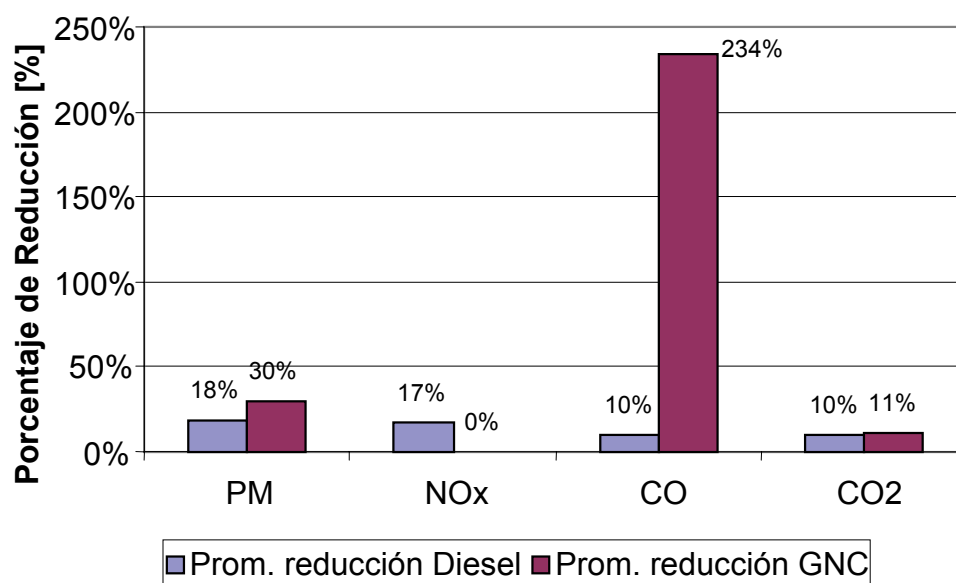


Figura 5.40 Reducción de emisiones en los autobuses de prueba, con y sin corredor.

5.2.2.7 Emisiones de los Autobuses a Diesel en Relación a la Potencia al Freno.

Para los vehículos a diesel las emisiones en gramos por Caballos de Potencia al Freno-Hora (BHP-hr por sus siglas en inglés) se estimaron con bastante precisión al dividir el consumo de combustible por kilómetro entre el consumo promedio en relación a la potencia (BSFC por sus siglas en inglés) del motor. Ya que los datos BSFC para el motor específico no estuvieron disponibles para estos autobuses se asumió un valor BSFC típico de 170 gramos por BHP-hr. Este valor está dentro del 10% del valor real BSFC para la mayoría de los motores a diesel comerciales. Los resultados de este cálculo se muestran en la Tabla 5.11.



Tabla 5.11 Estimación de las Emisiones de los Autobuses a diesel en gramos por BHP-hr.

| Vehículo | Fecha de prueba | Ruta | No. de pruebas | Emisiones [g/BHP-hr] | | | | | | | |
|--|-----------------|----------|----------------|----------------------|------|-------|-----|-------|-----|-----------------|-----|
| | | | | PM | | NOx | | CO | | CO ₂ | |
| | | | | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 14- Dic-2004 | Norte | 3 | 0.15 | 0.03 | 4.9 | 0.1 | 1.2 | 1.4 | 539 | 2 |
| | 14-Dic-2004 | Corredor | 3 | 0.15 | 0.01 | 4.8 | 0.4 | M/D | 1.6 | 541 | 58 |
| | 26-May-2005 | Corredor | 3 | 0.11 | 0.01 | 4.8 | 0.2 | 1.6 | 0.3 | 538 | 25 |
| | 29-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.12 | 0.01 | 4.5 | 0.3 | 1.4 | 0.7 | 538 | 16 |
| RTP 2 | 6-Dic-2004 | Norte | 1 | 0.12 | - | 7.2 | - | 0.5 | - | 540 | - |
| | 6-Dic-2004 | Corredor | 2 | 0.12 | 0.01 | 7.6 | 0.7 | 2.0 | 1.5 | 537 | 1 |
| Volvo12 | 11-Feb-2005 | Norte | 2 | 0.36 | 0.03 | 6.3 | 0.5 | 6.7 | 0.4 | 530 | 65 |
| | 11-Feb-2005 | Corredor | 3 | 0.33 | 0.04 | 6.0 | 0.2 | 6.0 | 0.6 | 531 | 4 |
| | 13-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.36 | 0.05 | 6.3 | 0.3 | 6.5 | 0.6 | 530 | 20 |
| | 6-Sep-2005 | Corredor | 2 | 0.43 | 0.00 | 6.1 | 0.2 | 7.2 | 0.2 | 528 | 26 |
| Scania18 | 8-Feb-2005 | Norte | 2 | 0.66 | 0.02 | 2.4 | 0.0 | 3.4 | 0.7 | 535 | 43 |
| | 8-Feb-2005 | Corredor | 3 | 0.47 | 0.02 | 2.1 | 0.1 | 2.0 | 0.7 | 512 | 29 |
| MB 10 | 9-Nov-2004 | Norte | 3 | 0.12 | 0.01 | 4.7 | 0.3 | 1.3 | 0.3 | 538 | 187 |
| | 9-Nov-2004 | Corredor | 2 | 0.09 | 0.01 | 4.8 | 0.0 | 1.6 | 0.1 | 538 | 11 |
| MB 11 | 24-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.05 | 0.00 | 6.2 | 0.2 | 1.4 | 0.7 | 538 | 42 |
| | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.07 | 0.01 | 5.8 | 0.3 | 1.3 | 0.3 | 538 | 45 |
| MB 12 | 16-Dic-2004 | Norte | 3 | 0.10 | 0.01 | 6.4 | 0.1 | 1.8 | 0.7 | 538 | 8 |
| | 16-Dic-2004 | Corredor | 3 | 0.08 | 0.02 | 6.3 | 0.3 | 2.1 | 0.8 | 537 | 20 |
| Metrobuses a Diesel | | | | | | | | | | | |
| RTP | 7-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.15 | 0.03 | 4.2 | 0.2 | 0.8 | 0.2 | 538 | 28 |
| CISA | 8-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.13 | 0.01 | 6.5 | 0.5 | 3.1 | 0.2 | 535 | 27 |
| Fénix | 9-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.33 | 0.05 | 3.7 | 0.1 | 2.8 | 0.4 | 535 | 20 |
| Autobuses a diesel con sistema de control de emisiones | | | | | | | | | | | |
| RTP 3 | 8-Dic-2004 | Norte | 2 | 0.04 | 0.01 | 5.1 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 540 | 16 |
| | 8-Dic-2004 | Corredor | 3 | 0.05 | 0.02 | 4.5 | 0.3 | 0.7 | 0.6 | 539 | 20 |
| | 23-May-2005 | Corredor | 3 | 0.04 | 0.02 | 4.4 | 0.5 | 0.3 | 0.6 | 540 | 62 |
| | 12-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.01 | 0.01 | 4.1 | 0.1 | 1.0 | 1.3 | 539 | 28 |
| RTP 4 | 3-Dic-2004 | Norte | 3 | 0.03 | 0.01 | 6.4 | 0.3 | M/D | 1.0 | 543 | 15 |
| | 3-Dic-2004 | Corredor | 3 | 0.02 | 0.01 | 6.3 | 0.2 | 0.0 | 1.4 | 540 | 24 |
| Allison | 6-Nov-2004 | Norte | 3 | 0.01 | 0.01 | 3.8 | 0.2 | M/D | 1.8 | 542 | 61 |
| | 6-Nov-2004 | Corredor | 3 | 0.02 | 0.00 | 2.6 | 0.2 | M/D | 1.4 | 541 | 42 |
| Eletrabus | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.03 | 0.00 | 12.1 | 0.1 | 1.7 | 0.6 | 538 | 2 |

M/D: Menor al mínimo detectable.



Resultados de las Pruebas

De los autobuses participantes en este proyecto tenemos vehículos que pertenecen a la normatividad EPA 1998, EPA 2004 y EURO 3; estos estándares limitan las emisiones de NOx a 4.0, 2.4, y 3.7 g/BHP-hr, respectivamente. Las emisiones de NOx de los autobuses a diesel convencionales, al menos de los evaluados dentro de este programa, mostraron una variedad sorprendente entre los diferentes fabricantes, particularmente dado que todos estarían diseñados y calibrados para cumplir con los estándares antes mencionados.

A continuación, Figura 5.41, tenemos un comparativo del promedio de las emisiones de óxidos de nitrógeno de los autobuses que utilizan diesel como combustible, agrupándolos de acuerdo con su respectiva normatividad de emisiones; se muestran el valor mínimo, el máximo y el promedio de los autobuses participantes y el valor de las 3 normatividades, los cuales se grafican como líneas horizontales, éstas nos sirven de referencia y muestran que sólo en el caso de la certificación EURO 3 se tuvo un vehículo con emisiones menores a su certificación y los vehículos de las otras dos certificaciones no cumplieron con dicho nivel en estas pruebas. En el caso de EPA 2004 sólo se tiene un autobús y se muestra con fines comparativos.

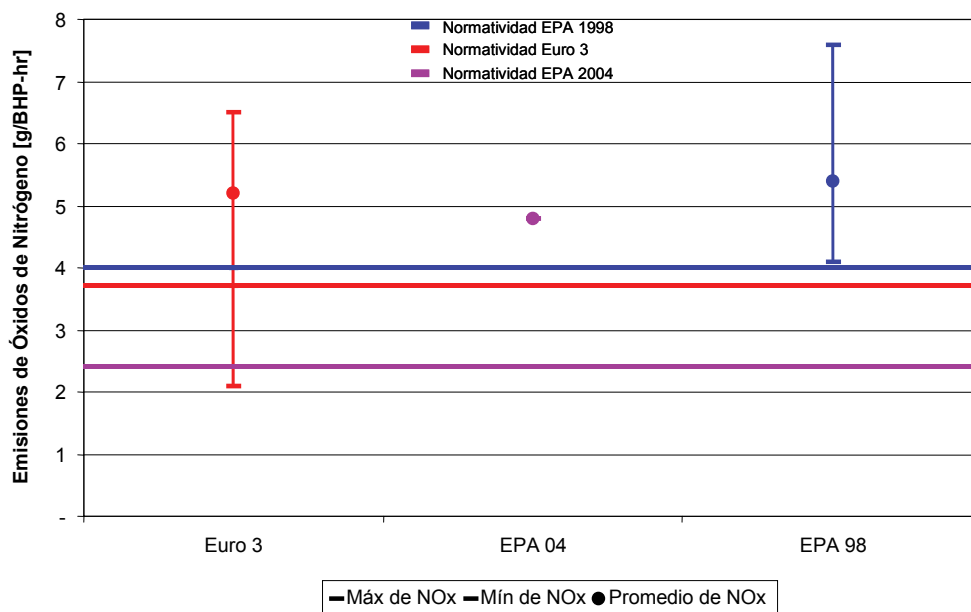


Figura 5.41 Comparativo de las emisiones de NOx, de acuerdo con la normatividad correspondiente.

Como se muestra en la Tabla 5.11 las emisiones de NOx del RTP 2 y RTP 4 (ambos autobuses marca Internacional) fueron de alrededor de 6.3 y 7.6 gramos por BHP-hr comparados con un estándar de emisión de 4.0 gramos por BHP-hr. Para el Volvo de 12 metros y para el Metrobús Volvo las emisiones NOx fueron alrededor de 6.0 a 6.5 gramos por BHP-hr. Para los autobuses Mercedes las emisiones de NOx estuvieron en un rango de 4.7 a 6.4 gramos por BHP-hr. Las emisiones de NOx del MB 10 no fueron inferiores a las del RTP 1, RTP 3 y MB 11 (los autobuses Mercedes de 11 y de 12 metros certificados a US-EPA 1998 y el de 10 metros certificado en EPA 2004). Las emisiones del RTP



estuvieron cercanas al límite de emisiones del estándar Euro 3, el autobús de demostración Scania de 18 metros estuvo muy por debajo de los niveles Euro 3. Esto último sugiere que el tiempo de inyección del Scania de demostración pudo haber estado demasiado retardado, lo que sería consistente con las emisiones excesivas de PM.

Las grandes diferencias entre los niveles de NOx medidos y los NOx reportados por certificación, pudieran encontrarse en las diferencias de estrategias de calibración (en particular las respuestas a la altitud y operaciones dinámicas) entre los diferentes fabricantes de motores. En algunos casos las diferencias son tan grandes que potencialmente podrían requerir investigarse para detectar dispositivos para “trampear” las pruebas de certificación.

5.2.2.8 Emisiones de Carbonilos.

La principal preocupación ambiental respecto a las emisiones de carbonilos era por los vehículos a GNC, ya que sus motores pueden producir una cantidad importante de formaldehído. Sin embargo, los datos recolectados muestran que los convertidores catalíticos instalados funcionaron adecuadamente y se controló así la emisión de carbonilos. Al analizar la especiación de los carbonilos medidos, tenemos que la mayor emisión de formaldehído se registró en los microbuses y en el Volvo12, como se muestra en la Figura 5.42, el cual también tuvo emisiones mayores a lo usual en varias especies de aldehídos.

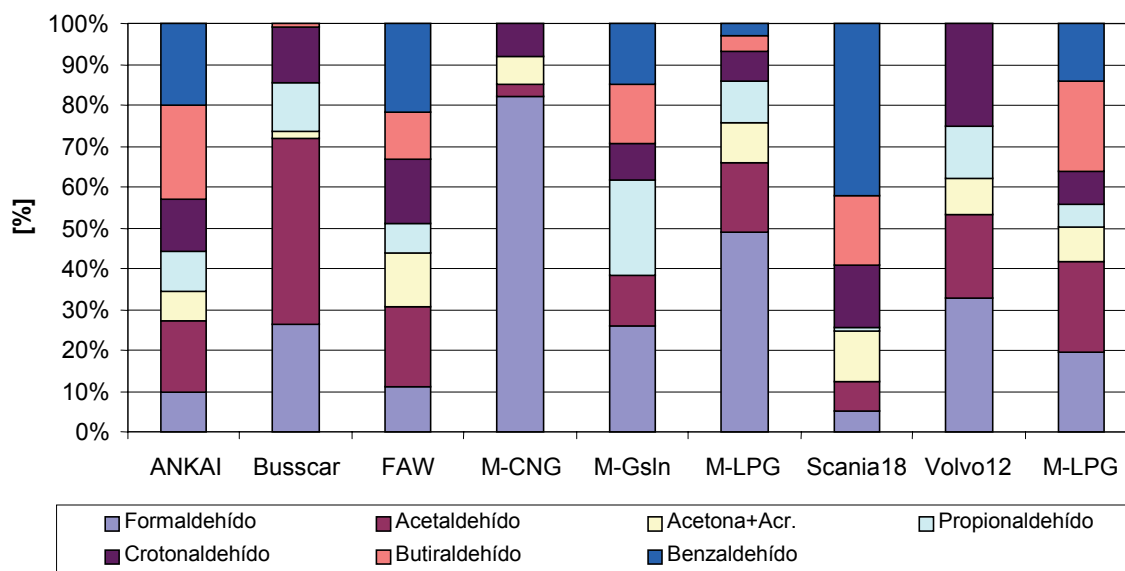


Figura 5.42 Distribución porcentual de las emisiones de carbonilos para los autobuses de prueba.

Los resultados de las pruebas de emisión de carbonilos en gramos por kilómetro recorrido se tienen en el Apéndice 1.



5.2.2.9 Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles.

El equipo para realizar la medición de Carbonilos y COV (Compuestos Orgánicos Volátiles) se adquirió posteriormente al resto del sistema RAVEM y no se tuvo disponible para su uso, sino hasta después de haber evaluado la mayoría de los vehículos de la primer campaña de muestreo, motivo por el cual se retrasó la evaluación de los autobuses a GNC y los microbuses de la primer campaña ya que se considera mucho más importante la emisión de estos contaminantes en vehículos que utilizan dicho combustible. Los resultados para las rutas Corredor e Insurgentes se muestran en la Figura 5.43 y la Figura 5.44 respectivamente.

En general, las emisiones de COV fueron bajas y mostraron una gran variación de una prueba a otra; esta variación es debida en gran parte al “ruido” generado por las altas concentraciones en el medio ambiente de fondo, las cuales fueron del mismo orden de magnitud que las concentraciones en las muestras recolectadas.

En la Figura 5.43 se muestran las especies de COV como porcentaje de la emisión total de COV para las pruebas válidas de cada autobús y tenemos que la especie predominante para los vehículos a GNC es el metano, aunque los vehículos RTP1 y Volvo de 12 metros también registraron emisiones altas de este contaminante; otras de las especies predominantes fueron el etano y el etileno en condiciones de la ruta Corredor.

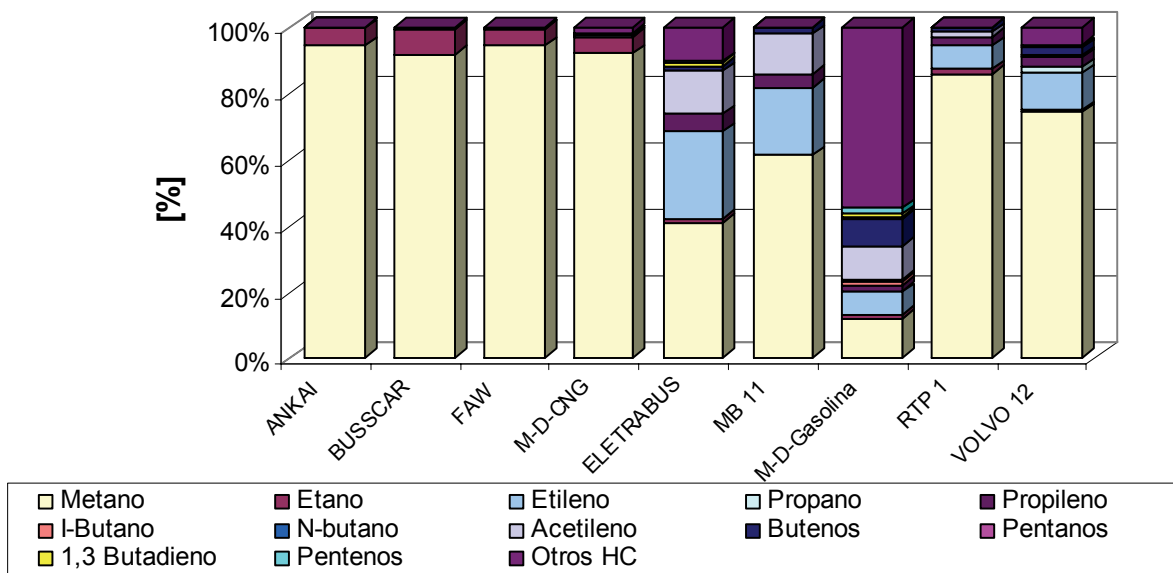


Figura 5.43 Distribución porcentual de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles para los autobuses de prueba para la ruta Corredor.

Las especies de COV para las condiciones de la ruta Insurgentes se muestran en la Figura 5.44, como porcentaje de la emisión total de COV en cada autobús para las pruebas válidas. En esta figura podemos apreciar que en el caso de los vehículos que



utilizan GNC el contaminante predominante es el metano; de los 2 autobuses a diesel, en el RTP5 predomina la emisión de metano y etileno y en el caso del Volvo de 12 metros, las mayores emisiones son de etileno y de otros hidrocarburos.

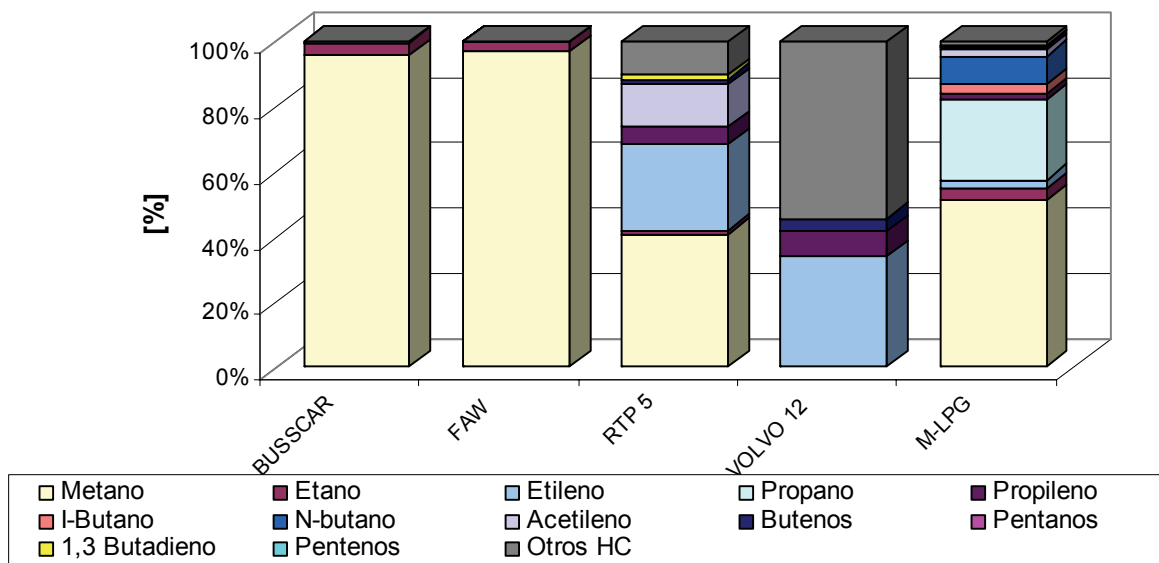


Figura 5.44 Distribución porcentual de las emisiones de compuestos orgánicos volátiles para los autobuses de prueba para la ruta Insurgentes.

En general los autobuses a GNC muestran una emisión relativamente alta de metano, uno de los gases de efecto invernadero pero de poca reactividad en la formación de ozono. Para esos autobuses, las emisiones de metano variaron desde 5 hasta 50 gramos por kilómetro. Especies más reactivas como el etileno, propileno y otros, se tuvieron en concentraciones muy bajas, lo que hizo difícil el distinguirlas de los niveles de fondo. Las emisiones tanto de metano como de COV no metánicos del autobús FAW fueron mucho mayores en la segunda y tercera campaña que en la primera. Lo cual puede deberse a cambios en la calibración del motor y/o consumo de combustible.

Las emisiones de COV de todos los autobuses a diesel fueron extremadamente bajas, lo cual hizo difícil el distinguirlas de los niveles de fondo. Las mayores emisiones de COV no metánicos se registraron en el microbús dual empleando gasolina. Junto con relativamente altos niveles de etileno, butano, penteno y otros hidrocarburos reactivos, estos vehículos mostraron la mayor emisión de 1,3 butadieno (un conocido cancerígeno). Esto es consistente con la observación común que los motores a gasolina tienden a tener emisiones mucho mayores de hidrocarburos no metánicos que los motores a diesel o a GNC.

Un error por parte del operador del cromatógrafo, dió como resultado una serie de datos inválidos para una cantidad substancial del análisis de las muestras colectadas durante la primera y segunda campañas y para las pruebas de los autobuses de Metrobús realizadas al inicio de la tercera campaña. Desafortunadamente, esto se descubrió hasta



después de haber purgado las bolsas de muestreo; de tal forma que la mayor parte de los datos validos de COV fueron colectados en la tercer campaña de pruebas. Los resultados de la especiación realizada se muestran en el Apéndice 2.

5.2.3 Ruido.

La medición de emisiones de ruido se llevó a cabo de acuerdo con la NOM-080-ECOL-1994 e ISO 5130. Este procedimiento indica que el medidor de sonido, o micrófono deberá estar colocado a una altura igual al de la salida del tubo de escape, alejado 0.5 metros de la salida, y a un ángulo de $45^\circ (\pm 10^\circ)$ de la dirección de flujo de gas de escape. Entonces, se acelera el motor tres veces hasta corte de gobernador, y se registra el pico máximo de ruido durante la aceleración. El resultado de la prueba es el promedio de los valores de ruido mínimo y máximo durante la prueba. El estándar de ruido correspondiente establecido por la NOM-080-ECOL-1994 es 95 dB(a).

Los resultados de estas mediciones se resumen en la Tabla 5.12. Solo un vehículo – el Ankai – excedió el estándar de ruido. Los autobuses RTP 3 y Vol 12 fueron notablemente más silenciosos que el resto de los vehículos evaluados, los cuales mostraron resultados altamente concentrados en una banda de alrededor de 90 dB(A).

Tabla 5.12 Resultados de Emisiones de Ruido

| Autobús | Combustible | Fecha | Medición de Ruido dB(A) | | | |
|--------------------------|--------------------------|----------|-------------------------|-------|-------|-----------|
| | | | 1 | 2 | 3 | Prom. |
| RTP 3 | D 50 | 23-Mayo | 84.2 | 86.1 | 86.2 | 85.2 |
| RTP 2 | D 350 | 23-Mayo | 91.0 | 91.2 | 90.8 | 91.1 |
| RTP 4 | D 350 | 23-Mayo | 94.9 | 93.5 | 92.8 | 94.2 |
| MB 11 | D 15 | 16-Abril | 89.3 | 87.3 | 90.3 | 89.8 |
| Ankai | GNC | 16-Abril | 104.2 | 103.8 | 102.3 | 103.3 |
| FAW | GNC | 16-Abril | 92.5 | 88.3 | 89.3 | 90.9 |
| Busscar | GNC | 16-Abril | 87.9 | 87.5 | 87.0 | 87.7 |
| MB 12 | D 50 | 16-Abril | 84.6 | 88.0 | 95.2 | 89.9 |
| Volvo 12 | D 15 | 16-Abril | 82.5 | 82.2 | 82.2 | 82.4 |
| CISA | D 350 | 8-Sep | 88.8 | 89.2 | 88.9 | 89.0 |
| Fénix Metrobús | D 350 | 9-Sep | 91.3 | 94.5 | 93.1 | 92.9 |
| Estándar mexicano | NOM-080-ECOL-1994 | | | | | 95 |

5.2.4 Opacidad.

Las mediciones de humo se llevaron a cabo de acuerdo con las prácticas recomendadas del SAE-J-1667.

“Antes de iniciar un ciclo de aceleración, el motor deberá estar en ralentí bajo normal. Desde esta posición, el operador deberá, tan rápido como le sea posible, mover el acelerador a la posición totalmente abierta. El operador deberá mantener el acelerador pisado a fondo hasta que el vehículo haya alcanzado la velocidad máxima gobernada, y



mantener el acelerador en esa posición hasta que cuatro segundos adicionales hayan pasado. Después de este periodo, se deberá dejar de pisar el acelerador y permitir al motor regresar a ralentí normal. El motor deberá permanecer en ralentí por al menos cinco segundos antes de comenzar la siguiente secuencia de aceleración. Esto permitirá que el turbocargador (en caso de existir) se desacelere a su velocidad normal durante ralentí normal, y permitirá mantener la repetibilidad entre ciclos de aceleración”

El resultado del procedimiento de prueba SAE J1667, es el promedio de tres aceleraciones sucesivas. Para que la prueba sea válida, la diferencia entre los valores máximo y mínimo deberá ser de no más de cinco por ciento de opacidad – de otra manera se deberán realizar aceleraciones adicionales hasta que una secuencia de tres cumpla los requerimientos.

Todas las pruebas de opacidad se realizaron con un opacímetro Wager 2500, utilizando la cabeza sensor de flujo parcial. Esta cabeza tiene una longitud de celda de 5 pulgadas, ó 12.7 centímetros.

Los resultados de las pruebas de opacidad se resumen en la Tabla 5.13. La tabla muestra la opacidad (medida sobre el longitud de celda de cinco pulgadas) y la correspondiente densidad de humo o valor “K” en la ley de Beer Lambert. Esto último es preferible para efectos de regulación, ya que es independiente del longitud de celda. Como la tabla muestra, todos los vehículos habrían cumplido con el límite de 2.5 m⁻¹ requerida por la ECE R24.

También se muestra, en esa tabla, las emisiones de PM en gramos por BHP-hr, medidas para cada vehículo en la ruta Insurgentes Norte. Como se muestra en la tabla, para estos grupos de autobuses, una elevada opacidad del humo en la prueba de aceleración libre generalmente está asociada a elevadas emisiones de PM en vehículos en uso, y viceversa. La prueba de aceleración libre puede entonces ser un buen indicador de las emisiones de autobuses en uso que para otro tipo de vehículos, ya que su operación está dominada por condiciones de paro-arranque.

Tabla 5.13 Resultados de mediciones de opacidad con el procedimiento SAE J1667

| Vehículo | Fecha | Opacidad [%] | "K" [m ⁻¹] | PM [g/BHP-hr] |
|----------------|-----------|--------------|------------------------|---------------|
| Allison | 11-Nov-04 | 0.5 | 0.04 | 0.02 |
| RTP 4 | 3-Dic-04 | 0.4 | 0.03 | 0.03 |
| RTP 3 | 8-Dic-04 | 2.1 | 0.17 | 0.04 |
| RTP 1 | 14-Dic-04 | 7.8 | 0.64 | 0.15 |
| MB 10 | 16-Dic-04 | 4.3 | 0.35 | 0.12 |
| Scania 18 | 8-Feb-05 | 21.0 | 1.86 | 0.66 |
| Volvo 12 | 11-Feb-05 | 22.0 | 1.96 | 0.36 |
| Eletrabus | 20-Oct-05 | 2.8 | 0.22 | 0.03 |
| RTP 2 | 3-Dic-05 | 5.9 | 0.48 | 0.12 |
| CISA Metrobús | 3-Dic-05 | 22.0 | 1.96 | 0.13 |
| Fénix Metrobús | 3-Dic-05 | 23.8 | 2.14 | 0.33 |



6. PRUEBAS DE CORRELACIÓN ENTRE LOS EQUIPOS DE MEDICIÓN EMPLEADOS.

6.1 Descripción de las Pruebas Realizadas.

Para llevar a cabo las pruebas, se midieron las emisiones de un selecto número de autobuses utilizando simultáneamente dos sistemas independientes:¹⁷ El dinamómetro móvil de la Universidad de Virginia del Oeste y el equipo portátil RAVEM.

Como se mencionó, el sistema RAVEM utiliza un método parcial de muestreo de volumen constante (CVS por sus siglas en inglés) de los gases de escape, con un muestreo isocinético proporcional de los gases de escape. Las emisiones medidas por el sistema RAVEM fueron:

Tabla 6.1 Emisiones medidas con RAVEM.

| Contaminante | Método |
|--|--|
| Óxidos de nitrógeno (NO _x) | Analizador de químiluminiscencia, en tiempo real y muestras integradas. |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | Analizador Infrarrojo no Dispersivo (NDIR por sus siglas en inglés), en tiempo real y muestras integradas. |
| Monóxido de Carbono (CO) | Analizador NDIR, en tiempo real y muestras integradas. |
| Material particulado (PM) | Integración de muestras colectadas en filtros pre pesados. |

El laboratorio móvil de la WVU utilizó un túnel de dilución de gases de escape de escala completa de acuerdo con el Código de Regulaciones Federales de los Estados Unidos, Volumen 40, sección 86. Una lista parcial de las emisiones medidas por la WVU en su laboratorio móvil se tienen en la Tabla 6.2.

Tabla 6.2 Emisiones medidas por la WVU .

| Contaminante | Método |
|--|---|
| Óxidos de nitrógeno (NO _x) | Químiluminiscencia húmeda. |
| Hidrocarburos (HC) | Detector por ionización de flama calentado (HFID). |
| Monóxido de Carbono (CO) | Analizador Infrarrojo no Dispersivo (NDIR). |
| Dióxido de carbono (CO ₂) | Analizador Infrarrojo no Dispersivo (NDIR). |
| Material particulado (PM) | Filtros cubiertos de fluoruro de carbono (Integrado) Microbalanza oscilante de elemento cónico (Continuo). |

Las emisiones integradas colectadas por la WVU fueron corregidas por emisiones de fondo. La corrección de fondo utiliza el factor de dilución de la prueba.

¹⁷ Correlation between West Virginia University and Engine, Fuel and Emissions Engineering, Inc.'s RAVEM Emissions Measurements from Transit Buses, report under contract no. GDF-SMA-GEF-SC-027-04, Mechanical Engineering Dept., West Virginia University and Engine, Fuel, and Emissions Engineering, Inc., August, 2005.



6.2 Vehículos de Prueba.

La Tabla 6.3 contiene la información de los vehículos evaluados en el programa de correlación.

Tabla 6.3 Resumen de los vehículos evaluados durante el programa de correlación.

| Nombre | Vehículo | Transmisión | Peso de prueba (lbs) | Peso bruto vehicular (lbs) | Capacidad de pasajeros | Lectura del odómetro (millas) | Motor |
|-----------|----------------|--------------------------|----------------------|----------------------------|------------------------|-------------------------------|----------------------------|
| Allison | 2004 Allison | Híbrido | 35,000 | 29,000 | 113 | 36,846 | 2002 Cummins ISB-230 |
| RTP1 | 2002 Marcopolo | 5 Velocidades Automático | 30,070 | 21,100 | 85 | 100,142 | 2002 Mercedes-Benz OM906LA |
| RTP3 | 2002 Marcopolo | 5 Velocidades Automático | 30,220 | 21,250 | 85 | 89,333 | 2002 Mercedes-Benz OM906LA |
| Scania 18 | 2004 Scania | 4 Velocidades Automático | 57,025 | 40,075 | 161 | 998 | 2004 Scania DC9-300 |

6.3 Sistema WVU.

Para asegurar la exactitud de las mediciones, el personal de los laboratorios de la WVU siguieron un conjunto de lineamientos de Aseguramiento y Control de Calidad (AC/CC). Dichos lineamientos incluyen un calendario para calibraciones y mantenimientos al dinamómetro y demás equipo de medición. Después de poner a punto el laboratorio en la Ciudad de México, los ingenieros de campo de la WVU realizaron amplias calibraciones a sus instrumentos, como se presenta en el Código de Regulaciones Federales de los Estados Unidos, Volumen 40, sección 86 sub sección N (CFR 40), el cual incluye:

- Respuesta de Metano (CFR 40 86.1321-94)
- Optimización de la respuesta del analizador de hidrocarburos (CFR 40 86.1321-90)
- Revisión de la interferencia de O₂ para el analizador de hidrocarburos
- Revisión de la interferencia de agua y CO₂ para el analizador de CO (CFR 40 86.1322-84)
- Revisión de la eficiencia del analizador de NOX (CFR 40 86.1323-84)
- Verificación del sistema CVS (inyección de propano) (CFR 40 86.1319-90)
- Revisión de fugas en los muestreadores de emisiones de gases y de partículas
- Calibración de las celdas absorbedoras de carga



6.3.1 Verificación del Sistema CVS.

Una verificación satisfactoria del sistema de muestreo de volumen constante (CVS) es crítica para obtener mediciones exactas. El sistema se verifica introduciendo una masa conocida de propano en el túnel y midiendo su recuperación con el analizador de hidrocarburos. Mientras el soplador está funcionando para introducir aire a través del túnel de dilución, se introduce una cantidad conocida de propano por la entrada del túnel. La proporción a la cual se inyecta el propano se controla utilizando un kit para inyección de propano de la empresa HORIBA que incluye un orificio calibrado, manómetro de precisión y un termopar para monitorear la temperatura de los gases. La respuesta del analizador de carbono se graba por 300 segundos y la masa de propano inyectado se compara con la recuperada en el muestreo y medida por el analizador de hidrocarburos. Esta revisión de AC/CC revela posibles fugas en el túnel de dilución / sistema CVS y verifica la calibración del sistema CVS. De acuerdo con el CFR 40, la diferencia entre la masa de propano inyectada y la recuperada no debe exceder el 2%. El personal del laboratorio realizó 2 pruebas para verificar el sistema CVS en la Ciudad de México obteniendo 1.240% y 0.503% de diferencia. Esto tiene el beneficio secundario de confirmar el adecuado funcionamiento del analizador de hidrocarburos.

6.3.2 Calibración del Analizador.

Cada analizador de emisiones es calibrado utilizando gas estándar de calibración NIST. El analizador se calibra cuando se cambia el rango de análisis, periódicamente o cuando el operador lo juzgue necesario. El procedimiento para calibrar analizadores de emisiones gaseosas involucra registrar sus respuestas a diferentes concentraciones (0%, 10%,..., 90%, 100% de la escala de concentraciones) y generando una regresión polinomial que represente de mejor forma la respuesta del analizador a la concentración del gas. El ingeniero instrumentista también revisa periódicamente la respuesta del analizador a 0% y a 100%.

6.4 Sistema RAVEM.

El RAVEM es uno de los nuevos tipos de sistemas de medición de emisiones portátiles que han empezado a ser disponibles en los últimos años. La tecnología del RAVEM fue desarrollada por la empresa Motor, Combustible e Ingeniería de Emisiones, Inc. (EF&EE por sus siglas en inglés).

El sistema RAVEM se basa en un muestreo de flujo-parcial proporcional de volumen constante (CVS por sus siglas en inglés) a partir del tubo de escape del vehículo. El principio CVS es ampliamente utilizado en la medición de emisiones vehiculares ya que los ajustes de dilución son tales, que la concentración de contaminantes en el túnel de dilución del CVS es proporcional a la tasa de flujo de masa en el escape del vehículo. La concentración de contaminantes puede medirse sin grandes problemas, mientras que medir las tasas de flujo de masa resulta costoso y difícil de medir con exactitud, especialmente en condiciones de tránsito, al circular en los caminos.



La masa total de emisiones contaminantes durante un ciclo de manejo dado, es igual a la integral de la tasa de flujo de masa de contaminantes durante dicho ciclo. En un sistema CVS, este valor integrado puede obtenerse fácilmente integrando sólo la concentración medida, la tasa de flujo de masa del CVS funciona únicamente como una constante de multiplicación. Esta integración puede llevarse a cabo tanto numéricamente como físicamente. La tasa de flujo del escape no entra directamente en el cálculo, lo cual hace innecesario su medición.

En el caso de los gases, el sistema RAVEM utiliza tanto la integración numérica como la física. Las concentraciones de NO_x, CO₂ y CO en el gas de escape diluido son registradas segundo a segundo durante cada prueba. Además, muestras integradas de los gases de escape diluidos y aire de dilución se colectan en bolsas de Tedlar® durante la prueba y son analizadas más tarde para determinar NO_x, CO₂ y CO y (opcionalmente) otros contaminantes como son carbonilos y COVs.

En el muestreo CVS para material particulado, la integración de la muestra es llevada a cabo físicamente, haciendo pasar la mezcla del escape diluida, con una tasa de flujo constante y controlada, a través de un filtro pre-pesado. El peso ganado por el filtro es después dividido por el volumen de mezcla que pasó a través de él para determinar la concentración promedio de partículas durante el ciclo de prueba.

6.5 Datos y Resultados.

En la Tabla 6.4 se presentan los datos del RAVEM y de la WVU con fines comparativos. Los ciclos de prueba utilizados fueron el Ciclo Europeo Transitorio (ETC por sus siglas en inglés) y el Ciclo de la Ciudad de México (MCS por sus siglas en inglés) excepto que para una comparación se usó sólo el modo MX1 del MCS; también se usó el Ciclo Norteamericano del Distrito Central de Negocios (CBD por sus siglas en inglés) en una prueba. De la Figura 6.1 a la Figura 6.4 se muestran las correlaciones entre las emisiones (en unidades de masa total de todo el ciclo) de los sistemas WVU y RAVEM. De la Figura 6.5 a la Figura 6.7 se tiene la relación de cada especie con las emisiones de CO₂. Todas las graficas de correlación se ajustaron para pasar por el origen, excepto para el CO (donde parece haber un desajuste constante entre los 2 conjuntos de mediciones).

Las pruebas MX0038 a la MX0048 en este programa fueron realizadas usando la sonda isocinética MX01. Como ya se mencionó anteriormente, posteriormente se encontró que esta sonda daba resultados inexactos, provocado por lo que se cree fue una fuga de presión que afectó a la línea de presión diferencial. Esto causó que el sistema de muestreo isocinético tomara más muestra en todas las condiciones de operación pero menos en ralentí. Este error de muestreo afectó directamente la medición de la masa de emisiones total, pero no afectó la relación de un contaminante con otro (dado que la proporción de todos los contaminantes son iguales sin importar si la muestra es mayor o menor). Por lo antes expuesto, los datos de la sonda MX01 se muestran por separado de la Figura 6.1 a la Figura 6.4 y quedan excluidas de las correlaciones, pero son incluidas en las correlaciones en las Figura 6.5 a la Figura 6.7.



Como una revisión independiente a la exactitud del sistema, EF&EE midió la masa de combustible consumido directamente en una prueba usando el ciclo CBD. Esta medición se realizó pesando un tanque de combustible portátil antes y después de realizar la prueba. Se tuvo cuidado antes de realizar la prueba para asegurar que las líneas de combustible tuvieran diesel. Partiendo del peso determinado, el peso del combustible consumido durante la prueba usando el ciclo CBD fue de 905 gramos. Asumiendo una composición típica del diesel de $\text{CH}_{1.85}$, las emisiones de CO_2 que corresponderían a este consumo de combustible serían 2,875 gramos. Este resultado es muy cercano con la masa de CO_2 medida por el sistema RAVEM (2,907 gramos), pero es 20% menor que los 3,620 gramos de CO_2 medidos con el sistema de la WVU durante la misma prueba. Este resultado se muestra con la leyenda *tanque de combustible* en la Figura 6.1.



Tabla 6.4 Datos de las pruebas de correlación. Los datos de NOx de la WVU son del analizador 1 o analizador NOx1.

| ID de Prueba | | | Prueba Ciclo | PM [g/prueba] | | CO ₂ [g/ prueba] | | NOx [g/ prueba] | | CO [g/ prueba] | |
|--------------|--------|------------|-----------------|---------------|-------|-----------------------------|--------|-----------------|-------|----------------|-------|
| WVU | RAVEM | Vehículo | | WVU | RAVEM | WVU | RAVEM | WVU | RAVEM | WVU | RAVEM |
| 4339-1 | MX0038 | Allison | ETC | 1.95 | 0.87 | 26,847 | 23,756 | 120.93 | 111.0 | 18.76 | -0.4 |
| 4341-1 a 3 | MX0040 | Allison | MCS | 0.86 | 0.95 | 23,770 | 20,337 | 126.50 | 110.9 | 18.50 | -2.1 |
| 4342-1 a 3 | MX0041 | Allison | MCS | 0.29 | 0.82 | 23,908 | 20,780 | 128.36 | 110.8 | 17.44 | 0.2 |
| 4346-1 | MX0042 | Allison | ETC | 0.41 | 0.41 | 27,291 | 28,254 | 130.14 | 133.6 | 9.70 | -0.1 |
| 4347-1 a 3 | MX0043 | Allison | MCS | 0.46 | 0.90 | 23,763 | 21,632 | 128.73 | 119.7 | 14.67 | 2.0 |
| 4348-1 | MX0044 | Allison | ETC | 0.38 | 0.49 | 26,191 | 27,681 | 123.00 | 122.8 | 7.20 | 0.0 |
| 4349-1 a 3 | MX0045 | Allison | MCS | 0.30 | 0.93 | 23,639 | 20,748 | 123.56 | 107.5 | 12.73 | 0.0 |
| 4353-1 a 3 | MX0047 | MB 12-592 | MCS | 4.43 | 2.97 | 16,425 | 14,726 | 132.55 | 103.4 | 74.54 | 25.2 |
| 4354-1 | MX0048 | MB 12-592 | ETC | 7.47 | 3.62 | 22,527 | 21,708 | 159.27 | 154.1 | 51.81 | 25.4 |
| 4360-1 | MX0058 | MB 12-592 | ETC | 5.84 | 3.68 | 23,100 | 19,885 | 171.34 | 163.8 | 52.71 | 24.5 |
| 4361-1 | MX0059 | MB 12-592 | ETC | 4.56 | 3.25 | 22,317 | 19,984 | 154.32 | 144.0 | 47.47 | 20.0 |
| 4362-1 a 3 | MX0061 | MB 12-592 | MCS | 4.81 | 2.83 | 16,138 | 10,764 | 128.67 | 96.7 | 81.16 | 43.8 |
| 4363-1 a 3 | MX0062 | MB 12-592 | MCS | 4.45 | 2.34 | 15,780 | 11,718 | 126.78 | 96.1 | 75.48 | 12.3 |
| 4364-1 a 3 | MX0063 | MB 12-592 | MCS | 3.93 | 2.63 | 16,258 | 12,764 | 132.71 | 97.6 | 67.89 | 20.3 |
| 4365-1 a 3 | MX0064 | MB 12-592 | MCS | 3.91 | 2.47 | 15,168 | 11,737 | 124.56 | 94.5 | 65.23 | 13.3 |
| 4399-1 | MX0073 | Allison | ETC | 0.65 | 1.93 | 22,419 | 20,288 | 111.95 | 101.7 | 13.79 | -0.1 |
| 4400-1 a 3 | MX0074 | Allison | MCS | 0.47 | 1.00 | 19,098 | 15,099 | 105.51 | 80.3 | 24.04 | 0.0 |
| 4401-1 | MX0075 | Allison | ETC | 0.19 | 0.63 | 19,519 | 17,419 | 91.47 | 81.5 | 10.84 | -1.3 |
| 4407-1 | MX0078 | MB 23-955 | MX-1 | N/A | 0.33 | 3,579 | 2,480 | 26.26 | 17.9 | 3.50 | -1.0 |
| 4408-1 a 3 | MX0079 | MB 23-955 | MCS | 1.24 | 0.25 | 15,363 | 11,166 | 110.75 | 83.4 | 11.16 | 0.0 |
| 4409-1 | MX0080 | MB 23-955 | ETC | 3.65 | 0.55 | 19,735 | 17,842 | 120.04 | 110.5 | 9.16 | -4.1 |
| 4412-1 | MX0081 | MB 23-955 | CBD | N/A | 0.44 | 3,620 | 2,907 | 24.84 | 20.3 | 2.48 | -1.4 |
| 4418-1 a 3 | MX0084 | Scania 18m | MCS | 8.75 | 4.80 | 22,679 | 18,703 | 175.06 | 143.9 | 97.19 | 28.3 |
| 4419-1 a 3 | MX0085 | Scania 18m | MCS | 8.31 | 4.74 | 23,445 | 19,056 | 177.02 | 146.4 | 99.36 | 44.8 |
| 4421-1 a 3 | MX0087 | Scania 18m | MCS | 10.16 | 5.39 | 22,938 | 18,424 | 157.77 | 133.9 | 110.54 | 47.8 |
| 4422-1 a 3 | MX0088 | Scania 18m | MCS | 9.65 | 5.97 | 23,371 | 18,709 | 156.33 | 137.2 | 104.24 | 43.8 |

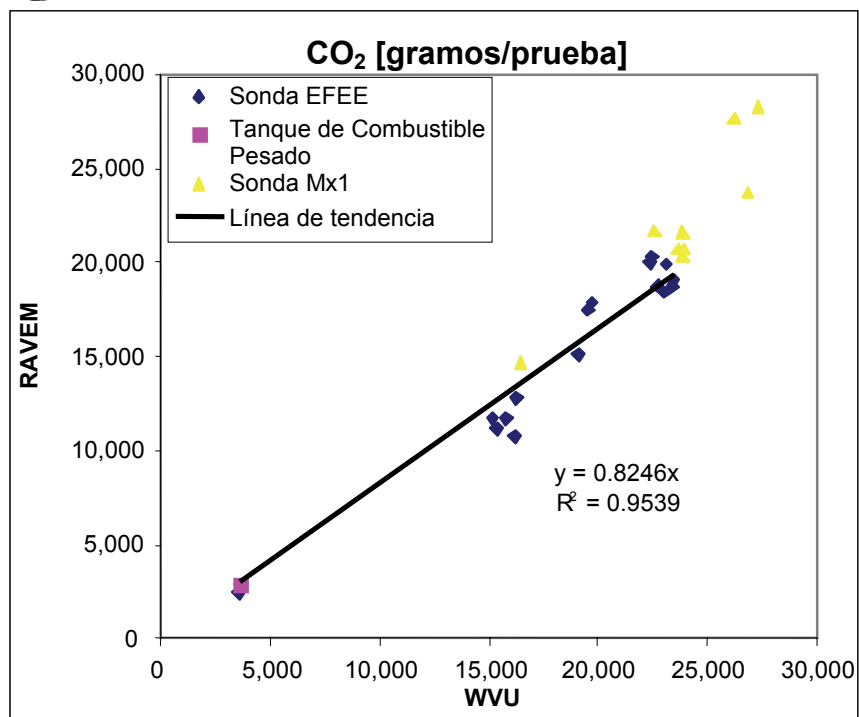


Figura 6.1 Correlación de emisiones de dióxido de carbono.

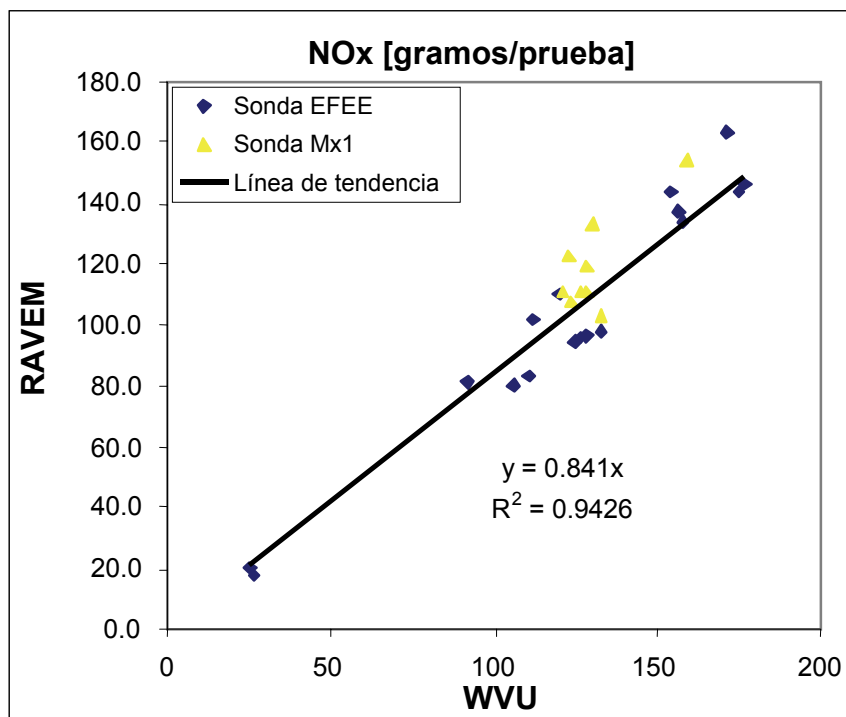


Figura 6.2 Correlación de óxidos de nitrógeno

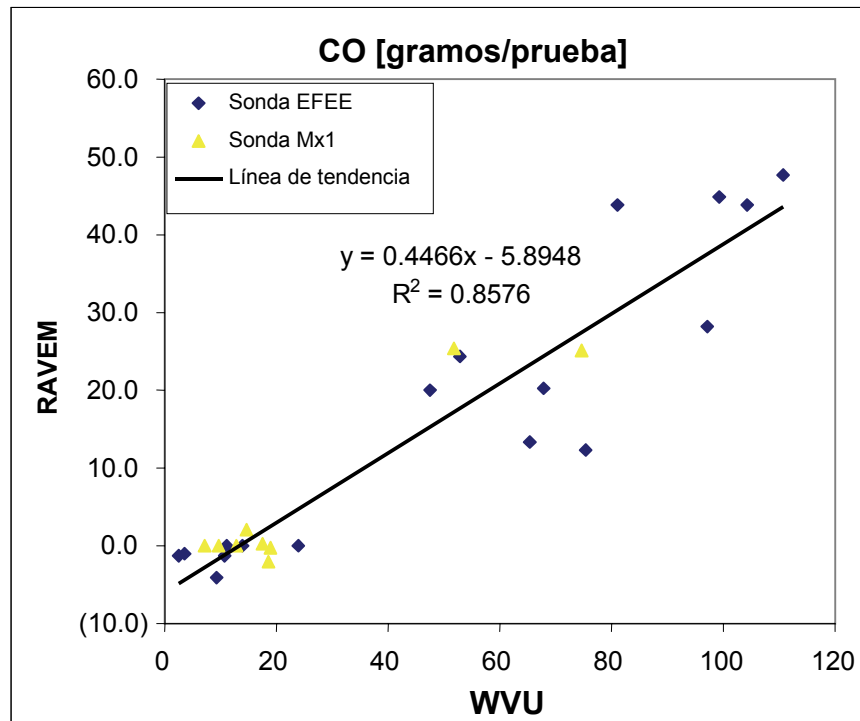


Figura 6.3 Correlación de los datos de monóxido de carbono.

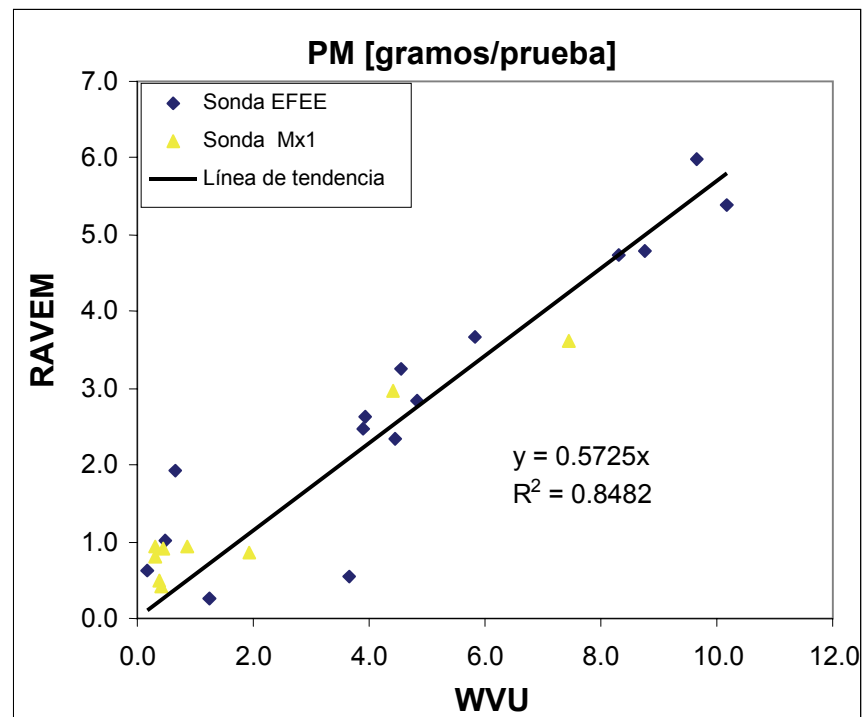


Figura 6.4 Correlación de las emisiones de material particulado.

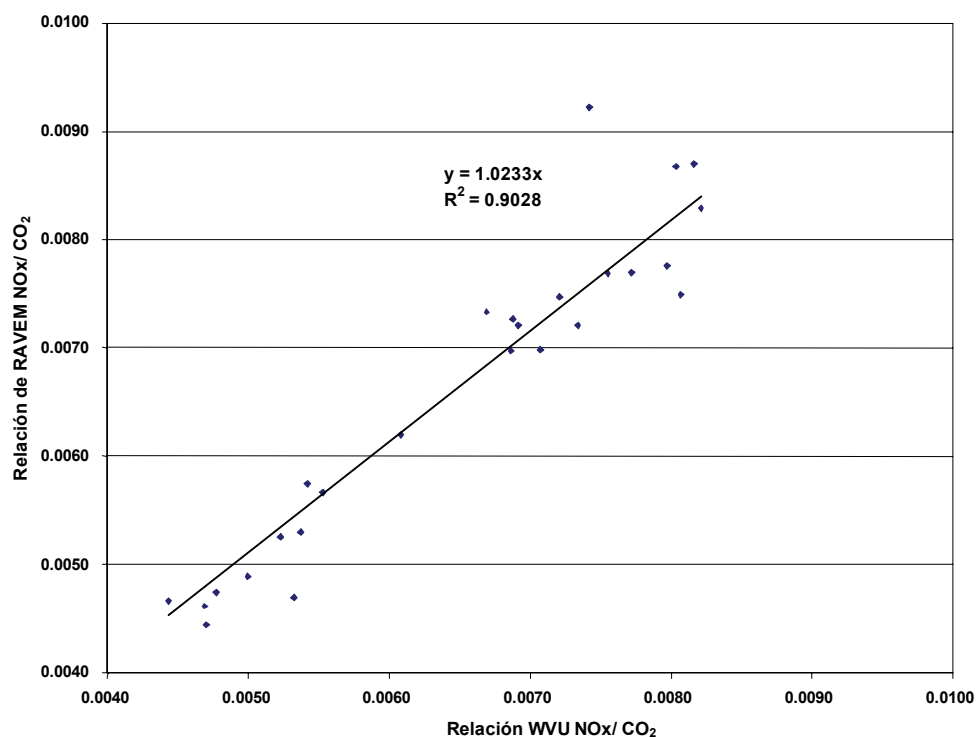


Figura 6.5 Comparación de las relaciones de NOX/CO₂.

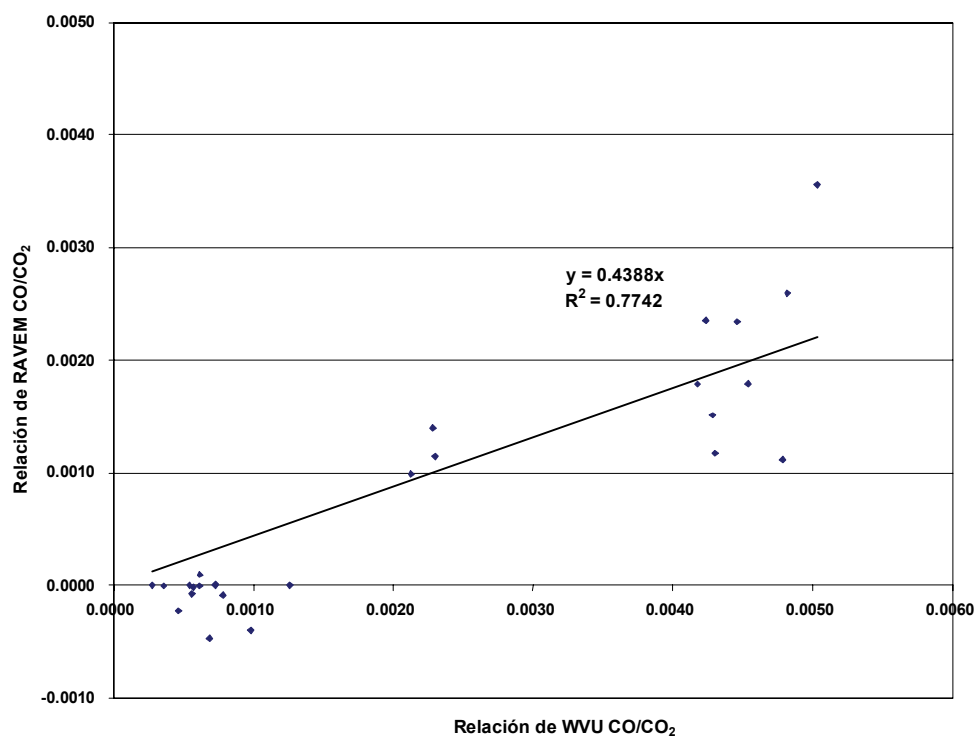


Figura 6.6 Comparación de las relaciones de CO/CO₂.

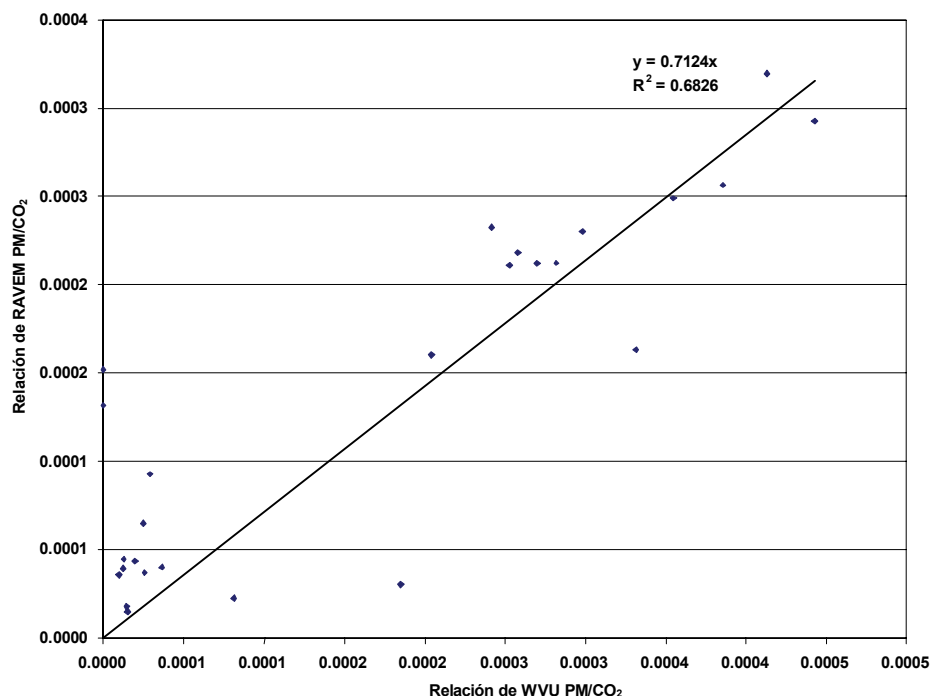


Figura 6.7 Comparación de las relaciones PM/CO₂.

Cuando se utilizaron juntos los sistemas de la WVU y el RAVEM se completaron veintiséis (26) pruebas. De éstas, 8 fueron utilizando la sonda defectuosa, y se representan con la leyenda *Sonda Mx1* de la Figura 6.1 a la Figura 6.4. El resto de las pruebas validas se representan con la leyenda *Sonda EFEE* y se incluyen en el análisis de regresión de cada figura.

Los datos de CO₂ son una buena representación del consumo de combustible. Las emisiones medidas por el RAVEM fueron, en promedio, 18% menores que las registradas por la WVU. Esto se estableció preparando una grafica de correlación entre los datos del RAVEM y la WVU de la cual se obtiene una regresión lineal forzando la intercepción al origen. Los datos de CO₂ también mostraron cierta dispersión con respecto a la regresión lineal. El mayor porcentaje de diferencia entre las emisiones de CO₂ medidas por la WVU y el RAVEM fue de 33%. Como se notó en un principio, la medición de la masa del combustible consumida durante la prueba de correlación coincidió bastante con la medición de CO₂ obtenida con el RAVEM y fue 20% menor que el CO₂ medido por la WVU.

Subsecuentemente a este programa de pruebas, se realizaron pruebas de consumo de combustible durante las pruebas de emisiones a bordo, tanto en autobuses a GNC y a diesel. Los resultados se muestran en la tabla 3 y se aprecia una buena concordancia ($\pm 5\%$) entre los resultados del RAVEM y el consumo de combustible medido mediante el cambio de peso del tanque de combustible removible, ver Tabla 6.5.



Tabla 6.5 Resultados de la prueba de recuperación de combustible para el sistema RAVEM

| Prueba Archivo | Prueba Fecha/Hora | Vehículo | Prueba Ciclo | Combustible | | Calc./ Pesado |
|----------------|-------------------|--------------------------|----------------------|-------------|--------|------------------|
| | | | | Calc. | Pesado | |
| MX0017 | 10/30/04 12:55 | RTP 23-955* | Modulo 23 | 1,161 | 1,317 | 88.1% |
| MX0023 | 10/31/04 19:17 | RTP 23-955* | Módulo 23 | 965 | 1,305 | 74.0% |
| MX0081 | 11/12/04 21:23 | RTP 23-955** | CBD | 914 | 905 | 101.0% |
| MX0193 | 1/7/05 12:34 | RTP 23-0992 ⁺ | Modulo 23 ralenti | 941 | 1,040 | 90.5% |
| MX0194 | 1/7/05 13:04 | RTP 23-0992 ⁺ | Ralenti continuo | 1,014 | 980 | 103.5% |
| MX0203 | 1/10/05 9:35 | RTP 23-1003 | Insurgentes Norte | 7,871 | 8,196 | 96.0% |
| MX0282 | 2/3/05 2:42 | Busscar GNC | Insurgentes Corredor | 6,932 | 6,750 | 102.7% |
| MX0288 | 2/4/05 4:06 | FAW GNC | Insurgentes Corredor | 10,353 | 10,000 | 103.5% |
| MX0289 | 2/4/05 5:36 | FAW GNC | Insurgentes Corredor | 9,229 | 8,800 | 104.9% |

* Prueba con sonda MX01 defectuosa

** Prueba de correlación con la UWV

⁺ Posiblemente afectada por fuga en el sistema de combustible

A lo largo del programa de pruebas, la WVU utilizó 2 analizadores de NO_x. En todos los casos, cuando ambos analizadores se encontraban en el modo de NO_x (contrario a lo común, en donde se opera uno en modo de NO_x y otro en modo de NO), la concordancia entre los 2 analizadores fue sobresaliente. Para fines de comparación entre la WVU y el RAVEM, se le dió a los NO_x el mismo tratamiento que al CO₂ utilizando el primer analizador de NO_x (NO_x1). Los NO_x fueron 16% menor en el RAVEM que en la WVU y la diferencia más grande fue de 32%.

La correlación entre las emisiones de monóxido de carbono medidas por el RAVEM y las de la WVU fue más pobre que la obtenida en el caso de los NO_x y el CO₂. El CO es un contaminante difícil de medir en forma exacta en motores diesel gobernados electrónicamente porque se caracterizan principalmente por tener bajas emisiones de CO, con concentraciones pico de CO intermitentes. Adicionalmente, la medición del CO se ve sujeta a interferencias tanto por el CO₂ como por vapor de agua y los analizadores responden en forma diferente a dichas interferencias. Las concentraciones de CO medidas en este programa de pruebas fueron extremadamente bajas. Como productos normales de la combustión, ambos, el CO₂ y el vapor de agua estaban presentes en los gases de escape en concentraciones mucho mayores que las concentraciones de CO medidas (aunque ambos sistemas de medición incluyen equipo para remover el vapor de agua de la muestra que llega al analizador de CO, no se espera que sean 100% efectivos). Así, no es de sorprender que las concentraciones de CO medidas por los dos sistemas analíticos fueran diferentes. Para las pruebas en las que la WVU registró menos de 25 g/ciclo de CO, la mayoría de las veces el sistema RAVEM reportó valores cero o negativos, lo que sugiere que las diferencias observadas son, al menos, en parte por la diferente respuesta de los equipos a las especies que interfieren la medición.

La correlación entre el RAVEM y la WVU en cuanto a las emisiones de material particulado fue regular ($R^2 = 0.85$), con mediciones de RAVEM siendo aproximadamente 43% menor, en promedio, que la WVU. La correlación entre las mediciones con TEOM y las de filtro hechas por la WVU dieron mejor correlación ($R^2 = 0.98$) que entre la medición con filtro de la WVU y las mediciones de PM con RAVEM ($R^2 = 0.86$).



Al hacer una revisión a los datos de NO_x y CO₂ se encontraron diferencias similares entre RAVEM y la WVU. Esto sugiere que los dos sistemas difieren como consecuencia de la medición del flujo (e.g. medición de la tasa de flujo del CVS) más que a diferencias en los analizadores. Se reexaminaron los datos relacionando todas las especies con respecto a la masa de CO₂, lo cual equivale a examinar las emisiones en unidades específicas de combustible. La relación NO_x/CO₂ medida por el RAVEM y la WVU fue, en promedio, muy cercana con una pendiente de 1.02 ($R^2 = 0.90$). La correlación del CO no mejoró substancialmente al relacionarla con el CO₂, sugiriendo que existió una segunda causa para la discrepancia en los métodos empleados por la WVU y el RAVEM.

La comparación de la relación PM/CO₂ no mostró mejora sustancial en la correlación cuando se compara con la masa de PM, pero la pendiente de la línea de correlación aumentó de 0.57 a 0.71. El 20% de diferencia entre las dos pendientes es muy similar a la relación de las emisiones de NO_x y CO₂ para los 2 sistemas siendo atribuible a la misma diferencia en la medición del flujo. El restante 29% de diferencia en las mediciones de PM es similarmente debido a diferencias en los sistemas de muestreo de partículas. Pruebas recientes de correlación entre el sistema RAVEM de la empresa EF&EE y sistemas CVS de flujo completo realizadas en la Universidad de California en Riverside, mostraron que los datos del RAVEM promediaron un 25% menos que el sistema CVS de flujo completo; mientras que las mediciones de CO₂ y NO_x fueron casi las mismas entre ambos sistemas.

No es de sorprender que pueda existir una diferencia sistemática en las masas de PM obtenidas porque se sabe que su captura es altamente sensible a los filtros empleados, la temperatura de la superficie del filtro y la velocidad en la superficie del filtro. También, la naturaleza de la dilución y la relación de dilución afecta la formación de las partículas. También existen diferencias importantes en las relaciones superficie – volumen entre los dos sistemas, proporcionando una mayor oportunidad para pérdidas de PM debidas a su deposición en las paredes del túnel. Descartando la diferencia en la medición del flujo CVS, la diferencia restante es similar a la observada entre la TOEM de la WVU y las mediciones con filtro.

También se encontró que el mayor porcentaje de diferencia entre la WVU y el sistema RAVEM se registró con las masas de PM más bajas. Cuando la masa de PM es baja pueden tenerse errores por las limitaciones en el equipo empleado para pesar los filtros y en los artefactos creados para el muestreo y el sistema de dilución.



7. EVALUACIÓN ECONÓMICA COMPARATIVA DE LA FLOTA DE AUTOBUSES.

7.1 Introducción.

En este capítulo se pretende establecer una comparación entre las diferentes tecnologías de autobuses que fueron evaluados en la pruebas con el Laboratorio Móvil de la Universidad del Oeste de Virginia (WVU, por sus siglas en inglés) y las tres campañas de medición con el Sistema a bordo RAVEM (por sus siglas en inglés), cuya disponibilidad de información sobre consumos de combustibles y mantenimientos proporcionados por las diferentes armadoras de autobuses, permitieron realizar una comparación de carácter económico.


El análisis económico se realizó tomando en cuenta los aspectos de costos de consumo de combustible, costos de mantenimiento y valor comercial de la unidad. Cabe mencionar que algunos autobuses fueron prototipos por lo que el valor comercial del mismo fue estimado.

Para efectos del presente estudio de análisis económico se tomaron en cuenta las diferentes alternativas tecnológicas evaluadas (Diesel 350, 50 y 15 ppm), Gas Natural Comprimido e Híbridos Diesel-Eléctrico. En la mayoría de los autobuses participantes provistos por las diferentes armadores, presentaron estándares ambientales EPA 1998, 2004 y EURO III.


Algunos de los autobuses probados fueron prototipos o contaban con dispositivos anticontaminantes (trampa de partículas, convertidor catalítico), por lo que su evaluación contribuye a mejorar la tecnología y a asegurar un mejor desempeño de los diferentes productos ofertados por los proveedores de las tecnologías.

Flota Vehicular.

Los autobuses evaluados con el Laboratorio Móvil de WVU, y las tres campañas de medición con el Sistema a bordo RAVEM fueron los siguientes:

| Autobús RTP1 | |  |
|---------------------------|---------------------------------|--|
| Marca | Mercedes Benz 2002 (RTP 12-592) | |
| Motor | OM 906-LA | |
| Estándar de emisiones | EPA 1998 | |
| Tipo de combustible | D50 | |
| Número de pasajeros | 85 | |
| Costo de Comercialización | \$ 600,000.00 | |






| Autobús RTP2 | |  |
|---------------------------|----------------------------------|--|
| Marca | International 2002 (RTP 23-995) | |
| Motor | DT466E | |
| Estándar de emisiones | EPA 1998 | |
| Tipo de combustible | D350 | |
| Número de pasajeros | 80 | |
| Costo de Comercialización | \$ 600,000.00 | |
| Autobús RTP3 | |  |
| Marca | Mercedes Benz 2002 (RTP 12-569) | |
| Motor | OM906-LA | |
| Estándar de emisiones | EPA 1998+ DPF | |
| Tipo de combustible | D50 | |
| Número de pasajeros | 85 | |
| Costo de Comercialización | \$ 600,000.00 | |
| Autobús RTP4 | |  |
| Marca | International 2002 (RTP 23-1022) | |
| Motor | DT466E | |
| Estándar de emisiones | EPA 1998+DPF | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 80 | |
| Costo de Comercialización | \$ 600,000.00 | |



| Autobús Volvo 12 | |  |
|---------------------------|-----------------------|--|
| Marca | Volvo 12m | |
| Motor | D7C | |
| Estándar de emisiones | EURO III | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 91 | |
| Costo de Comercialización | \$ 800,000.00 | |
| Autobús Scania 15 | |  |
| Marca | Scania 15m | |
| Motor | DSC9-260 | |
| Estándar de emisiones | EURO III | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 139 | |
| Costo de Comercialización | \$ 2.270.043 | |
| Autobús Scania 18 | |  |
| Marca | Scania 18m articulado | |
| Motor | DC9 | |
| Estándar de emisiones | EURO III | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 160 | |
| Costo de Comercialización | \$ 2,883,568.00 | |



| Autobús MB10 | |  |
|---------------------------|------------------------------|--|
| Marca | Mercedes Benz 10m (Boxer) | |
| Motor | OM924-LA | |
| Estándar de emisiones | EPA 2004 | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 87 | |
| Costo de Comercialización | \$ 700,000.00 | |
| Autobús MB11 | |  |
| Marca | Mercedes Benz 11.4m (Torino) | |
| Motor | OM924-LA | |
| Estándar de emisiones | EPA 2004 | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 80 | |
| Costo de Comercialización | \$ 760,000.00 | |
| Autobús MB12 | |  |
| Marca | Mercedes Benz 12.4m (Torino) | |
| Motor | OM924-LA | |
| Estándar de emisiones | N/A | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 90 | |
| Costo de Comercialización | \$ 800,000.00 | |





| Autobús Scania | |  |
|---------------------------|-----------------------|--|
| Marca | Articulado (Metrobús) | |
| Motor | DC9 | |
| Estándar de emisiones | EURO III | |
| Tipo de combustible | D350 | |
| Número de pasajeros | 160 | |
| Costo de Comercialización | \$ 2,741,491.00 | |
| Autobús Volvo | |  |
| Marca | Articulado (Metrobús) | |
| Motor | DH12-340 | |
| Estándar de emisiones | EURO III | |
| Tipo de combustible | D350 | |
| Número de pasajeros | 160 | |
| Costo de Comercialización | \$ 2,761,214.00 | |
| Autobús Fénix | |  |
| Marca | Articulado | |
| Motor | N/A | |
| Estándar de emisiones | --- | |
| Tipo de combustible | D350 | |
| Número de pasajeros | 160 | |
| Costo de Comercialización | N/D | |



| Autobús Allison | |  |
|---------------------------|---|--|
| Marca | Gillig/Allison Híbrido Diesel-Eléctrico | |
| Motor | ISB | |
| Estándar de emisiones | Híbrido+DPF | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 113 | |
| Costo de Comercialización | \$ 3,128,690.00 | |
| Autobús Eletrabús | |  |
| Marca | Eletrabús Híbrido Diesel-Eléctrico | |
| Motor | NA | |
| Estándar de emisiones | Híbrido+EURO II | |
| Tipo de combustible | D15 | |
| Número de pasajeros | 80 | |
| Costo de Comercialización | \$ 2,147,050.00 | |
| Autobús Busscar | |  |
| Marca | Busscar | |
| Motor | B5.9-230G | |
| Estándar de emisiones | EPA2004+ CC 2Vías | |
| Tipo de combustible | GNC | |
| Número de pasajeros | 91 | |
| Costo de Comercialización | \$ 1,441,800.00 | |



| Autobús FAW | |  |
|---------------------------|--------------------|---|
| Marca | FAW AMI Articulado | |
| Motor | C8.3G | |
| Estándar de emisiones | EPA2004+ CC 2Vías | |
| Tipo de combustible | GNC | |
| Número de pasajeros | 140 | |
| Costo de Comercialización | \$ 2,242,800.00 | |
| Autobús ANKAI | |  |
| Marca | Anhui Ankai | |
| Motor | B5.9-230G | |
| Estándar de emisiones | EPA2004+ CC 2Vías | |
| Tipo de combustible | GNC | |
| Número de pasajeros | 90 | |
| Costo de Comercialización | \$ 1,441,800.00 | |

7.2 Metodología del análisis.

Para el análisis económico comparativo de las diferentes tecnologías de autobuses evaluados en este estudio sólo se cuantificaron siguientes aspectos:

- Costos de consumo de combustible.
- Costos de mantenimiento.

El análisis de costos de consumo de combustible para cada autobús se realizó con base en los datos de rendimiento obtenidos durante las pruebas llevadas a cabo con el Laboratorio Móvil de la Universidad de Virginia del Oeste, las tres campañas de medición con el Sistema a bordo RAVEM y con las obtenidas durante las pruebas de campo. Para efectos de este análisis se promediaron los tres rendimientos obtenidos durante las diferentes pruebas realizadas.



Para análisis de costos de mantenimiento, se obtuvo un costo por kilómetro recorrido, considerando un recorrido anual de 80,000 km en el corredor vial de Insurgentes. Para tal efecto se consideraron los mantenimientos preventivos y correctivos proporcionados por las empresas armadoras de las alternativas consideradas en el presente estudio, las cuales consideraban las partidas de aceites, filtros, componentes electrónicos, sistemas de enfriamiento, en su caso baterías y la mano de obra asociada a los mantenimientos.

Durante la evaluación de los autobuses durante todo el proyecto se utilizaron tres tipos de combustibles diesel: convencional de 350 ppm de S, el cual se comercializa en cualquier expendio de combustible en la ZMVM, el de 50 ppm de S donado exclusivamente para este proyecto por Petróleos Mexicanos (PEMEX) y el de 15 ppm de S donado por la empresa Shell. Asimismo se utilizó Gas Natural Comprimido donado por la empresa Combustibles Ecológicos Mexicanos (ECOMEX).

En la Tabla 7.1 se muestra el precio de los cuatro combustibles; en el caso de los diesel de bajo contenido de S el precio aproximado fue determinado mediante un sobreprecio en el combustible.

Tabla 7.1 Precio combustibles Diesel y Gas Natural comprimido.

| Combustible | Precio (\$/l) |
|-------------------------------------|---------------|
| Diesel de 350 ppm S ¹ | 5.31 |
| Diesel de 50 ppm S ² | 6.37 |
| Diesel de 15 ppm de S ³ | 7.2 |
| Gas Natural Comprimido ⁴ | 4.53 |

Fuentes: 1 Profeco, precio a Diciembre de 2005.

2 New York City Transit Hybrid and CNG Transit Buses: Interim Evaluation Results.- Enero 2005.

3 Centro de Transporte Sustentable.

4 Combustibles Ecológicos Mexicanos.

Para efectos del presente estudio se compararon las diferentes tecnologías con características similares empleando diferentes tipos de combustibles y dimensiones similares.

En primer término se compararon los autobuses con características similares a los del servicio de transporte público de pasajeros que actualmente circulan en la Ciudad de México.

En la Tabla 7.2 y la Tabla 7.3 se muestra el Costo Integral por kilómetro recorrido para cada tecnología, el cual cuantifica el consumo de combustible y los costos de mantenimiento. Cabe mencionar que los rendimientos de combustible para cada caso se promediaron para obtener un costo promedio por consumo de combustible



Tabla 7.2 Costos integrales de consumo de combustible y mantenimiento.

| Identificación de la flota | Unidad | Autobuses Diesel | | | | | | | |
|---|--------|--------------------------|--------------------------|---------------|--------------|-----------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|
| | | Autobús RTP1 | Autobús RTP2 | Autobús Vol12 | Autobús Sc15 | Autobús Sc18 | Autobús MB10 | Autobús MB11 | Autobús MB12 |
| Marca | | Mercedes Benz RTP 12-592 | International RTP 23-995 | Volvo 12m | Scania 15m | Scania 18m articulado | Mercedes Benz 10m Boxer | Mercedes Benz 11.4m Torino | Mercedes Benz 12.4m Torino |
| Motor | | OM 906-LA | DT466E | D7C | DSC9 | DC9 | OM924-LA | OM924-LA | OM924-LA |
| Control de emisiones | | EPA 1998 | EPA 1998 | EURO III | EURO III | EURO III | EPA 2004 | EPA 2004 | N/D |
| Tipo de combustible | | D50 | D350 | D15 | D15 | D15 | D15 | D15 | D15 |
| Número de pasajeros | | 85 | 80 | 91 | 139 | 160 | 87 | 80 | 90 |
| Costo por litro | \$/lt | 6.37 | 5.31 | 7.20 | 7.20 | 7.20 | 7.20 | 7.20 | 7.20 |
| Rendimiento WVU | km/lt | 2.36 | N/D | 1.94 | 1.52 | 1.50 | 2.71 | N/D | N/D |
| Rendimiento RAVEM | km/lt | 3.02 | 2.30 | 2.82 | N/D | 1.52 | 4.29 | 3.48 | 2.20 |
| Rendimiento Campo | km/lt | N/D | N/D | 2.35 | 1.93 | N/D | N/D | 2.45 | 2.29 |
| Cargo consumo de combustible por km WVU | \$/km | 2.70 | N/D | 3.71 | 4.74 | 4.80 | 2.66 | N/D | N/D |
| Cargo consumo de combustible por km RAVEM | \$/km | 2.11 | 2.31 | 2.55 | N/D | 4.75 | 1.68 | 2.07 | 3.27 |
| Cargo consumo de combustible por km Campo | \$/km | N/D | N/D | 3.06 | 3.72 | N/D | N/D | 2.94 | 3.15 |
| Costo promedio por consumo de combustible | \$/km | 2.41 | 2.31 | 3.11 | 4.23 | 4.77 | 2.17 | 2.50 | 3.27 |
| Costo total por mantenimiento: | \$/km | 0.29 | 0.29 | 0.537 | 0.31 | 0.31 | 0.29 | 0.29 | 0.29 |
| Costo integrado por km | \$/km | 2.70 | 2.60 | 3.64 | 4.54 | 5.09 | 2.46 | 2.80 | 3.57 |
| Costo integrado por 80000 km al año | \$ | 215,795.26 | 208,349.03 | 291,473.60 | 363,453.63 | 406,832.02 | 196,745.95 | 223,600.88 | 285,306.62 |
| Costo de adquisición del autobus | \$ | 600,000 | 600,000 | 800,000 | 2,270,043 | 2,883,568 | 700,000 | 760,000 | 800,000 |



Tabla 7.3 Costos integrales de consumo de combustible y mantenimiento (Cont.).

| Identificación de la flota | Unidad | Autobuses Diesel Metrobus | | | Autobuses Diesel con Control de emisiones Adicional | | | | Autobuses Gas Natural Comprimido | | |
|---|--------|---------------------------|-----------------|----------------|---|---------------------------|---|------------------------------------|----------------------------------|--------------------|-------------------|
| | | Autobús Scania | Autobús Volvo | Autobús Fénix | Autobús RTP3 | Autobús RTP4 | Autobús Allison | Autobús Eletrabus | Autobús Busscar | Autobús FAW | Autobús ANKAI |
| Marca | | RTP-Articulado | CISA-Articulado | RTP-Articulado | Mercedes Benz RTP 12-569 | International RTP 23-1022 | Gillig/Allison Híbrido Diesel-Eléctrico | Eletrabus Híbrido Diesel-Eléctrico | Busscar | FAW AMI Articulado | Anhui Ankai |
| Motor | | DC9 | DH12-340 | N/D | OM906-LA | DT466E | ISB | NA | B5.9-230G | C8.3G | B5.9-230G |
| Control de emisiones | | EURO III | EURO III | N/D | EPA 1998+ DPF | EPA 1998+DPF | Híbrido+DPF | Híbrido+EURO II | EPA2004+ CC 2Vías | EPA2004+ CC 2Vías | EPA2004+ CC 2Vías |
| Tipo de combustible | | D350 | D350 | D350 | D50 | D15 | D15 | D15 | GNC | GNC | GNC |
| Número de pasajeros | | 160 | 160 | 160 | 85 | 80 | 113 | 80 | 91 | 140 | 90 |
| Costo por litro | \$/lt | 5.31 | 5.31 | 5.31 | 6.37 | 7.20 | 7.20 | 7.20 | 4.53 | 4.53 | 4.53 |
| Rendimiento WVU | km/lt | N/D | N/D | N/D | 2.39 | N/D | 2.25 | N/D | 1.57 | 1.18 | N/D |
| Rendimiento RAVEM | km/lt | 1.67 | 1.89 | 1.68 | 3.23 | 2.09 | 2.40 | 2.78 | 1.66 | 1.35 | 1.64 |
| Rendimiento Campo | km/lt | N/D | 1.35 | N/D | N/D | N/D | N/D | 1.74 | 2.68 | 1.34 | 1.33 |
| Cargo consumo de combustible por km WVU | \$/km | N/D | N/D | N/D | 2.67 | N/D | 3.20 | N/D | 2.89 | 3.84 | N/D |
| Cargo consumo de combustible por km RAVEM | \$/km | 3.18 | 2.81 | 3.17 | 1.97 | 3.44 | 3.00 | 2.59 | 2.72 | 3.35 | 2.76 |
| Cargo consumo de combustible por km Campo | \$/km | N/D | 3.93 | N/D | N/D | N/D | N/D | 4.15 | 1.69 | 3.38 | 3.39 |
| Costo promedio por consumo de combustible | \$/km | 3.18 | 2.81 | 3.17 | 2.32 | 3.44 | 3.10 | 3.37 | 2.43 | 3.52 | 3.08 |
| Costo total por mantenimiento : | \$/km | 0.505 | 0.455 | 0.34 | 0.29 | 0.29 | 0.24 | 0.24 | 0.338 | 0.436 | 0.338 |
| Costo integrado por km | \$/km | 3.68 | 3.27 | 3.50 | 2.61 | 3.73 | 3.34 | 3.61 | 2.77 | 3.96 | 3.41 |
| Costo integrado por 80000 km al año | \$ | 294,768.19 | 261,595.18 | 280,344.58 | 208,837.50 | 298,492.17 | 267,031.16 | 288,581.80 | 221,753.03 | 316,675.89 | 273,111.42 |
| Costo de adquisición del autobus | \$ | 2,741,491 | 2,761,214 | N/D | 600,000 | 600,000 | 3,128,690 | 2,147,050 | 1,441,800 | 2,242,800 | 1,441,800 |



En la Figura 7.1, se muestra el análisis que se realizó entre los diferentes tipos de alternativas y se observa que el autobús MB10 con diesel convencional presentó un costo integrado por km de 2.46 pesos. En lo que corresponde a los autobuses de la RTP evaluados con trampas de partículas y diesel convencional, 50 y 15 ppm de S (RTP1, RTP2, RTP3) podemos observar que en general presentaron un costo integrado promedio de 2.63 pesos por km, esto debido a los buenos programas de mantenimiento que la RTP le da a sus unidades, incrementándose un 27% en el RTP4 por el uso de diesel de 15 ppm de S.

Con lo que respecta a los autobuses híbridos podemos observar que el Allison presentó un costo integrado por km de 3.34 pesos comparado con los 3.61 pesos del autobús híbrido Eletrabús. Los autobuses a GNC Busscar y Ankai presentaron un costo integrado por km de 2.77 y 3.41 pesos respectivamente.



Figura 7.1 Costo Integrado por kilómetro.

Otro tipo de alternativas que se evaluaron durante el proyecto fueron autobuses articulados, en la siguiente tabla se muestran los resultados obtenidos. En este estudio comparativo se contó con 5 diferentes alternativas, un autobús Scania de 18 metros, dos autobuses perteneciente al Sistema Metrobús, los pertenecientes a RTP, el Scania y el Fénix el cual es un autobús totalmente remozado para brindar apoyo en caso de eventualidades en el sistema, uno perteneciente a la empresa CISA (Corredor Insurgentes, S.A.), el Volvo y por último un autobús chino dedicado a GNC FAW.

En la Figura 7.2 podemos observar que de las alternativas diesel el autobús CISA presentó el costo integrado más bajo con 3.27 pesos. En lo que respecta al autobús chino FAW, éste mostró un costo integrado 20% mayor que la tecnología diesel.

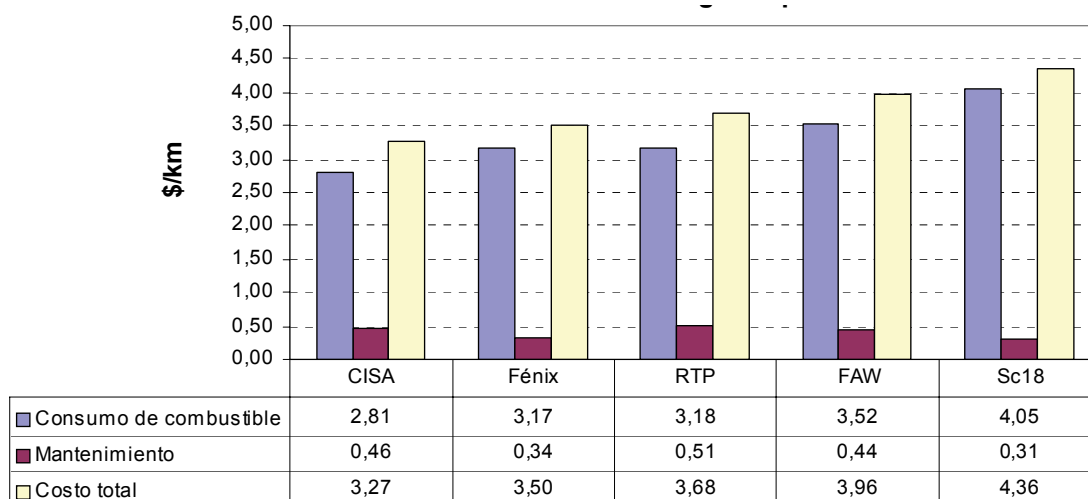


Figura 7.2 Costo Integrado por kilómetro

Como podemos observar se evaluaron dos autobuses Scania de iguales características físicas y mecánicas, el perteneciente a RTP y el SC18. La diferencia en el costo integrado por kilómetro se debió a que este último presentó un bajo rendimiento de combustible ya que no presentó un adecuado mantenimiento durante su evaluación.



8. CONCLUSIONES.

De las pruebas realizadas en dinamómetro de chasis por la WVU, 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. 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 CH_4 a la par que varía la proporción aire-combustible. 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 será alta también, ya que las dos emisiones se generan en zonas de la cámara de combustión que son “demasiado ricas de combustible”.

Dada la gran influencia que tiene el peso del vehículo al determinar el rendimiento de combustible y las emisiones, los autobuses más ligeros con capacidades de pasajeros similares, generalmente mostrarán un consumo de combustible y emisiones menores.

El diesel de bajo azufre no redujo significativamente las emisiones de PM. El diesel de bajo azufre reduce el ácido sulfúrico (masa de sulfato en las PM), pero esto representa una pequeña fracción de la masa total de las PM. El beneficio que se obtiene es permitir el uso de trampas de partículas para diesel en el sistema de escape del autobús ya que estas trampas no funcionan bien a menos que se utilice diesel con bajo contenido de azufre. De los resultados obtenidos tenemos también un aumento en las emisiones de hidrocarburos al utilizar diesel con 15 ppm de azufre.

Al analizar las emisiones provenientes de los autobuses, tanto de los prototipos como de los que normalmente circulaban por la Avenida de los Insurgentes, medidos bajo condiciones de manejo típicas, utilizando el sistema RAVEM, tenemos que las emisiones de PM provenientes de los autobuses que utilizaron GNC como combustible y las de aquellos autobuses equipados con trampas de partículas para diesel, fueron muy bajas, mientras que aquellas provenientes de los autobuses que no contaban con dichas trampas tuvieron grandes variaciones.

Las emisiones de NO_x de autobuses a diesel también mostraron variaciones, muchos de éstos aparentemente excedieron los estándares de emisión de NO_x en circulación para los cuales fueron certificados en dinamómetros de chasis. En lo que respecta a los microbuses (de este tipo de vehículo se contó con unidades que utilizaron gasolina, GLP y GNC), las emisiones de NO_x y PM fueron bajas en general, pero las emisiones de CO fueron mucho mayores que para los vehículos que utilizan diesel o GNC.

Cuando se realizaron las pruebas de emisiones simulando la operación en el carril confinado, no se registró reducción en el consumo de combustible por kilómetro recorrido, comparando con la circulación en condiciones de tránsito normal.



De los resultados obtenidos en este estudio también debemos concluir, que dada la limitación del tamaño de muestra de los vehículos probados así como el corto tiempo de duración de las pruebas de campo (un año aproximadamente), es difícil señalar tendencias en lo que se refiere a la curva de deterioro mostrado en los equipos de control de las emisiones (trampas de partículas), ya que solo se empleó un autobús Mercedes Benz - Torino de 11.4 metros con trampa y un bus de iguales características sin el equipo para valorar las diferencias en el potencial de emisiones entre una unidad y otra. Por lo anterior, es recomendable que en un futuro estudio, se amplíe el periodo de pruebas de desempeño a un periodo mínimo de 500,000 kilómetros de recorrido con evaluaciones de emisiones semestrales para definir con más precisión la curva de desempeño del equipo de control y con ello detectar la tasa de deterioro de las trampas tanto por el uso de diesel con una concentración de 15 ppm como el de 50 ppm de azufre.

Es importante hacer énfasis en que no se pueden tomar como representativos de la flota vehicular actual, los resultados obtenidos en este estudio, ya que fueron muy pocas las unidades evaluadas. Por lo que se recomienda la medición de al menos 10 unidades por cada tipo de combustible para microbuses y autobuses en circulación.



9. LECCIONES APRENDIDAS.

Durante el desarrollo de las pruebas de emisiones que conformaron la llamada Componente 3, se suscitaron diversos contratiempos, los cuales no se habían contemplado en un inicio.

A continuación se enlistan los más importantes y se deben considerar en futuros proyectos similares al presente.

- Los autobuses no siempre llegaron a tiempo al lugar de resguardo, provocando retrasos en la realización de las pruebas.
- Durante la selección de los vehículos o prototipos a evaluar asegurar que estos cumplan con condiciones eléctrico-mecánicas funcionales, a fin de evitar retrasos por fallas en la ejecución de las pruebas y asegurar que se completen los ciclos de prueba preestablecidos.
- Establecer una adecuada coordinación institucional entre los diferentes actores involucrados para la realización de las pruebas, las cuales por su naturaleza requirieron una gran participación interinstitucional e interdisciplinaria.
- Prever fondos para pagar por el uso de unidades para pruebas, cuando se contemple evaluar vehículos de sectores de transporte público privado, ya que resulta difícil convencerlos para el préstamo de unidades.
- Prever retrasos en la importación de autobuses al país, por parte de las autoridades fiscales.
- Prever retrasos en la importación del equipo de medición y refacciones al país, por parte de las autoridades fiscales.
- Contar con un stock de refacciones para los autobuses y equipos asociados a la medición de emisiones.
- Contar con personal técnico calificado para la solución de problemas que llegarán a presentarse en los vehículos.
- Realizar pruebas para asegurar la calidad de los diferentes combustibles utilizados en el proyecto, desde su origen pasando por el traslado y hasta llegar a su depósito final.
- Tener un buen control de calidad en el transporte y almacenamiento de los combustibles utilizados (diesel convencional y de bajo contenido de azufre), ya que en algunas ocasiones estos fueron contaminados.





10. GLOSARIO.

| | |
|-----------------------|--|
| BHP-hr | Break Horse Power – hora. |
| BRT | Bus Rapid Transit (Autobús de Tránsito Rápido). |
| CARB | California Air Resources Board (Asociación de Recursos del Aire de California). |
| CBD | Central Business District (Ciclo de Manejo del Distrito Central de Negocios) |
| CFR | Code of Federal Regulations (Código de Norma Federal). |
| Ciclo de Manejo | Perfil de tiempo contra velocidades, que representa una forma típica de conducir en una ciudad. |
| CO | Monóxido de Carbono. |
| CO ₂ | Dióxido de Carbono. |
| COV | Compuestos Orgánicos Volátiles. |
| CVS | Constant Volume Sampling (Sistema de Muestreo a Volumen Constante). |
| Dinamómetro de Chasis | Sistema que simula carga a un vehículo de prueba para representar condiciones reales de funcionamiento y medir así las emisiones contaminantes que se generan. |
| EPA 1998 | Estándar de emisiones otorgada por la Agencia de Protección al Ambiente de Estados Unidos de Norteamérica (EPA por sus siglas en inglés) en el año 1998 para vehículos pesados que utilizan diesel como combustible. |
| ETC | European Transit Cycle (Ciclo Europeo Transitorio). |
| EURO III | Estándar de emisiones reconocido por la Unión Europea a partir de 1999 para vehículos pesados a diesel. |
| GEF | Global Environmental Fund (Fondo Mundial para Medio Ambiente). |
| GLP | Gas Licuado del Petróleo. |
| GNC | Gas Natural Comprimido. |
| GPS | Global Positioning System (Sistema de Posicionamiento Global). |
| HC | Hidrocarburos. |



| | |
|------------------|--|
| IMECA | Índice Metropolitano de Calidad del Aire. |
| MCS | Mexico City Schedule (Ciclo de Manejo de la Ciudad de México). |
| N ₂ O | Óxido Nitroso. |
| NOx | Óxidos de Nitrógeno. |
| Opacidad | La condición en la cual una materia impide parcial o totalmente el paso del haz de luz. |
| PHRD | Program for Human Resources Development (Programa para el Desarrollo de Recursos Humanos). |
| PITV | Programa Integral de Transporte y Vialidad, 2002 – 2006. |
| PM | Material Particulado. |
| ppm | Partes por millón. |
| PROAIRE | Programa para Mejorar la Calidad del Aire en el Valle de México, 2002 – 2010. |
| RAMA | Red Automática de Monitoreo Atmosférico. |
| RAVEM | Ride Along Vehicle Emissions Measurement (Sistema de Medición de Emisiones Vehiculares a Bordo). |
| SAE | Society of Automotive Engineers (Sociedad de Ingenieros Automotrices). |
| SETRAVI | Secretaría de Transportes y Vialidad. |
| SMA | Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. |
| TEOM | Tampered Element Oscillating Microbalance (Microbalanza Oscilante de Elemento Cónico). |
| Venturi | Medidor de flujo basado en la reducción del diámetro, velocidad y presión de la tubería que lo transporta. |
| ZMVM | Zona Metropolitana del Valle de México. |



11. APÉNDICES.

11.1 Apéndice 1: Emisiones de Carbonilos medidas con el sistema RAVEM.

Tabla 11.1 Emisiones de carbonilos.

| Vehículo | Fecha de prueba | Ruta | No. pruebas | Emisiones de aldehídos [g/km] | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|----------|-------------|-------------------------------|-------|--------------|-------|--------------|-------|-----------------|-------|
| | | | | Formaldehído | | Acetaldehído | | Acetona+Acr. | | Propionaldehído | |
| | | | | Prom | σ | Prom | σ | Prom | σ | Prom | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 26-May-2005 | Corredor | 3 | 0.015 | 0.009 | 0.013 | 0.030 | 0.021 | 0.008 | 0.008 | 0.013 |
| | 29-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.005 | 0.002 | M/D | 0.007 | M/D | 0.010 | 0.004 | 0.005 |
| Volvo12 | 11-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.055 | 0.027 | 0.034 | 0.039 | 0.015 | 0.027 | 0.021 | 0.020 |
| | 11-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.041 | 0.027 | 0.101 | 0.006 | 0.075 | 0.107 | 0.051 | 0.072 |
| | 13-Jun-2005 | Corredor | 1 | 0.049 | - | 0.108 | - | M/D | - | 0.052 | - |
| | 8-Oct-2005 | Corredor | 2 | 0.001 | 0.005 | M/D | 0.009 | 0.006 | 0.007 | 0.001 | 0.06 |
| Scania18 | 8-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.011 | 0.010 | 0.016 | 0.016 | 0.027 | 0.018 | 0.002 | 0.025 |
| | 8-Feb-2005 | Corredor | 3 | 0.017 | 0.014 | 0.006 | 0.018 | 0.012 | 0.031 | 0.023 | 0.025 |
| MB 11 | 24-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.011 | 0.004 | 0.017 | 0.008 | 0.028 | 0.037 | 0.009 | 0.036 |
| | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.010 | 0.002 | M/D | 0.002 | 0.000 | 0.012 | 0.004 | 0.002 |
| RTP 3 | 23-May-2005 | Corredor | 3 | 0.015 | 0.005 | 0.000 | 0.016 | 0.006 | 0.017 | 0.023 | 0.011 |
| | 12-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.024 | 0.018 | M/D | 0.010 | 0.003 | 0.007 | 0.004 | 0.012 |
| Eletrabus | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.004 | 0.003 | M/D | 0.003 | M/D | 0.007 | M/D | 0.007 |
| Metrobuses a Diesel | | | | | | | | | | | |
| RTP | 7-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.004 | 0.002 | 0.007 | 0.009 | 0.004 | 0.011 | 0.005 | 0.012 |
| CISA | 8-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.004 | 0.004 | 0.005 | 0.012 | 0.007 | 0.011 | 0.007 | 0.010 |
| Fénix | 9-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.015 | 0.008 | 0.002 | 0.019 | 0.005 | 0.004 | M/D | 0.006 |
| Autobuses a Gas Natural Comprimido | | | | | | | | | | | |
| Busscar | 3-Feb-2005 | Norte | 1 | 0.033 | - | 0.057 | - | 0.002 | - | 0.015 | - |
| | 8-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.017 | 0.011 | 0.033 | 0.026 | 0.023 | 0.015 | 0.005 | 0.036 |
| | 3-Oct-2005 | Corredor | 0 | 0.005 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.003 | 0.005 | M/D | 0.005 |
| FAW | 4-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.021 | 0.029 | 0.038 | 0.028 | 0.025 | 0.048 | 0.014 | 0.014 |
| | 4-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.036 | 0.006 | 0.058 | 0.011 | 0.017 | 0.003 | 0.001 | 0.014 |
| | 27-Jun-2005 | Corredor | 2 | 0.024 | 0.018 | 0.026 | 0.037 | 0.028 | 0.003 | 0.009 | 0.013 |
| | 4-Oct-2005 | Corredor | 3 | 0.012 | 0.001 | 0.007 | 0.010 | M/D | 0.006 | M/D | 0.000 |
| ANKAI | 5-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.022 | 0.003 | 0.040 | 0.015 | 0.016 | 0.035 | 0.022 | 0.039 |
| | 5-Feb-2005 | Corredor | 3 | 0.018 | 0.012 | 0.025 | 0.004 | 0.035 | 0.015 | 0.046 | 0.022 |
| | 5-Oct-2005 | Corredor | 2 | 0.008 | 0.009 | M/D | 0.001 | 0.007 | 0.012 | 0.010 | 0.013 |
| Microbuses | | | | | | | | | | | |
| M-LPG | 24-Feb-2005 | Norte | 1 | 0.066 | - | 0.023 | - | 0.013 | - | 0.014 | - |
| | 24-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.071 | 0.020 | 0.028 | 0.018 | 0.009 | 0.012 | 0.006 | 0.002 |
| | 11-Nov-2005 | Montevid | 1 | 0.007 | - | 0.008 | - | 0.003 | - | 0.002 | - |
| M-CNG | 9-Mar-2005 | Norte | 2 | 0.050 | 0.030 | 0.002 | 0.003 | 0.004 | 0.006 | 0.000 | 0.000 |
| | 9-Mar-2005 | Corredor | 1 | 0.017 | - | M/D | - | 0.002 | - | M/D | - |
| M-Gsln | 10-Mar-2005 | Norte | 1 | 0.049 | - | 0.024 | - | 0.000 | - | 0.044 | - |
| | 10-Mar-2005 | Corredor | 2 | 0.068 | 0.089 | 0.022 | 0.008 | 0.025 | 0.036 | 0.003 | 0.004 |
| M-D-CNG | 3-Jun-2005 | Corredor | 2 | 0.010 | 0.001 | 0.009 | 0.040 | 0.019 | 0.007 | M/D | 0.005 |
| | 7-Oct-2005 | Corredor | 1 | M/D | - | 0.006 | - | 0.000 | - | 0.000 | - |
| M-D-Gsln | 6-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.004 | 0.004 | 0.005 | 0.012 | 0.008 | 0.007 | 0.002 | 0.004 |
| | 6-Oct-2005 | Corredor | 2 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.005 | 0.001 | 0.001 | 0.003 |

M/D: Menor al mínimo detectable. σ : Desviación estándar. Acr.: Acroleína.



Tabla 11.1 Emisiones de carbonilos. (final)

| Vehículo | Fecha de prueba | Ruta | No. pruebas | Emisiones de aldehídos [g/km] | | | | | |
|---------------------|-----------------|------------|-------------|-------------------------------|-------|---------------|-------|--------------|-------|
| | | | | Crotonaldehído. | | Butiraldehído | | Benzaldehído | |
| | | | | Prom | σ | Prom | σ | Prom | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 26-May-2005 | Corredor | 3 | 0.023 | 0.017 | 0.011 | 0.048 | 0.022 | 0.012 |
| | 29-Sep-2005 | Corredor | 3 | M/D | 0.005 | 0.002 | 0.002 | M/D | 0.012 |
| Volvo12 | 11-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.042 | 0.072 | M/D | 0.132 | M/D | 0.067 |
| | 11-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.139 | 0.141 | 0.137 | 0.005 | M/D | 0.200 |
| | 13-Jun-2005 | Corredor | 1 | 0.048 | - | 0.078 | - | 0.050 | - |
| | 8-Oct-2005 | Corredor | 2 | 0.003 | 0.000 | 0.009 | 0.002 | 0.001 | 0.007 |
| Scania18 | 8-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.033 | 0.029 | 0.038 | 0.101 | 0.092 | 0.056 |
| | 8-Feb-2005 | Corredor | 3 | 0.013 | 0.011 | 0.010 | 0.030 | 0.048 | 0.054 |
| MB 11 | 24-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.040 | 0.034 | 0.009 | 0.001 | 0.019 | 0.020 |
| | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | M/D | 0.002 | 0.003 | 0.006 | 0.006 | 0.009 |
| RTP 3 | 23-May-2005 | Corredor | 3 | 0.007 | 0.010 | M/D | 0.014 | M/D | 0.015 |
| | 12-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.006 | 0.008 | 0.001 | 0.016 | 0.009 | 0.017 |
| Eletrabus | 28-Sep-2005 | Corredor | 3 | M/D | 0.020 | 0.001 | 0.005 | 0.007 | 0.015 |
| Metrobuses a Diesel | | | | | | | | | |
| RTP | 7-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.004 | 0.006 | 0.002 | 0.004 | 0.011 | 0.021 |
| CISA | 8-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.012 | 0.011 | M/D | 0.003 | 0.006 | 0.008 |
| Fénix | 9-Sep-2005 | Corredor | 3 | 0.004 | 0.004 | 0.009 | 0.006 | M/D | 0.005 |
| Metrobuses a Diesel | | | | | | | | | |
| Busscar | 3-Feb-2005 | Norte | 1 | 0.017 | - | 0.001 | - | M/D | - |
| | 8-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.010 | 0.020 | 0.018 | 0.010 | 0.028 | 0.034 |
| | 3-Oct-2005 | Corredor | 3 | 0.003 | 0.006 | 0.009 | 0.000 | M/D | 0.018 |
| FAW | 4-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.030 | 0.040 | 0.022 | 0.029 | 0.042 | 0.027 |
| | 4-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.012 | 0.005 | 0.005 | 0.000 | 0.005 | 0.007 |
| | 27-Jun-2005 | Corredor | 2 | M/D | 0.008 | 0.029 | 0.017 | 0.033 | 0.000 |
| | 4-Oct-2005 | Corredor | 3 | M/D | 0.012 | M/D | 0.007 | 0.008 | 0.007 |
| ANKAI | 5-Feb-2005 | Norte | 3 | 0.029 | 0.019 | 0.052 | 0.019 | 0.045 | 0.033 |
| | 5-Feb-2005 | Corredor | 3 | 0.005 | 0.030 | 0.032 | 0.021 | M/D | 0.012 |
| | 5-Oct-2005 | Corredor | 2 | 0.006 | 0.009 | M/D | 0.003 | 0.004 | 0.001 |
| Microbuses | | | | | | | | | |
| M-LPG | 24-Feb-2005 | Norte | 1 | 0.010 | - | 0.005 | - | 0.004 | - |
| | 24-Feb-2005 | Corredor | 2 | 0.013 | 0.019 | 0.000 | 0.002 | 0.013 | 0.015 |
| | 11-Nov-2005 | Montevideo | 1 | 0.003 | - | 0.008 | - | 0.005 | - |
| M-CNG | 9-Mar-2005 | Norte | 2 | 0.005 | 0.007 | M/D | 0.009 | M/D | 0.001 |
| | 9-Mar-2005 | Corredor | 1 | 0.000 | - | M/D | - | 0.013 | - |
| M-Gsln | 10-Mar-2005 | Norte | 1 | 0.017 | - | 0.028 | - | 0.028 | - |
| | 10-Mar-2005 | Corredor | 2 | 0.007 | 0.009 | 0.002 | 0.002 | 0.007 | 0.008 |
| M-D-CNG | 3-Jun-2005 | Corredor | 2 | 0.009 | 0.007 | 0.011 | 0.002 | 0.036 | 0.002 |
| | 7-Oct-2005 | Corredor | 1 | M/D | - | M/D | - | M/D | - |
| M-D-Gsln | 6-Jun-2005 | Corredor | 3 | 0.003 | 0.005 | 0.005 | 0.010 | 0.010 | 0.007 |
| | 6-Oct-2005 | Corredor | 2 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 0.001 | 0.004 | 0.001 |

M/D: Menor al mínimo detectable.



11.2 Apéndice 2: Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles medidas con el sistema RAVEM.

Tabla 11.2 Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles por especie.

| Vehículo | Fecha de prueba | Ruta | No. de pruebas | Emisiones de COV [g/km] | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-------------|----------------|-------------------------|-------|-------|-------|---------|-------|---------|-------|-----------|-------|
| | | | | Metano | | Etano | | Etileno | | Propano | | Propileno | |
| | | | | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 30-Sep-05 | Corredor | 3 | 0.06 | 0.14 | 0.001 | 0.002 | 0.005 | 0.006 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 0.002 |
| RTP 5 | 30-Jun-05 | Norte | 2 | 0.33 | 0.05 | 0.009 | 0.001 | 0.213 | 0.016 | 0.000 | 0.002 | 0.043 | 0.002 |
| RTP 6 | 29-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.05 | 0.04 | 0.001 | 0.000 | 0.029 | 0.000 | 0.004 | 0.007 | 0.007 | 0.000 |
| VOLVO 12 | 11-Feb-05 | Norte | 2 | 0 | 0.03 | 0.000 | 0.000 | 0.027 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.000 |
| | 11-Feb-05 | Corredor | 2 | 0.37 | 0.37 | 0.003 | 0.003 | 0.040 | 0.040 | 0.009 | 0.009 | 0.010 | 0.010 |
| | 13-Jun-05 | Corredor | 1 | 0 | - | 0.000 | - | 0.016 | - | 0.000 | - | 0.005 | - |
| MB 11 | 28-Sep-05 | Corredor | 2 | 0.03 | 0.01 | 0.000 | 0.000 | 0.010 | 0.002 | neg. | 0.000 | 0.002 | 0.000 |
| ELETRABUS | 28-Sep-05 | Corredor | 2 | 0.33 | 0.05 | 0.009 | 0.001 | 0.213 | 0.016 | 0.000 | 0.002 | 0.043 | 0.002 |
| Autobuses a Gas Natural Comprimido | | | | | | | | | | | | | |
| BUSSCAR | 03-Feb-05 | Norte | 3 | 10.02 | 0.31 | 0.390 | 0.013 | 0.029 | 0.009 | 0.013 | 0.005 | 0.002 | 0.002 |
| | 03-Feb-05 | Corredor | 2 | 5.16 | 5.23 | 0.107 | 0.138 | 0.012 | 0.001 | 0.014 | 0.040 | 0.000 | 0.003 |
| | 08-Jun-05 | Corredor | 2 | 24.19 | 33.47 | 2.432 | 1.045 | 0.024 | 0.007 | 0.086 | 0.011 | 0 | 0.000 |
| | 03-Oct-05 | Corredor | 3 | 4.36 | 3.51 | 0.267 | 0.207 | 0.007 | 0.004 | 0.010 | 0.007 | 0.001 | 0.001 |
| FAW | 04-Feb-05 | Norte | 3 | 10.57 | 5.97 | 0.328 | 0.171 | 0.004 | 0.016 | 0 | 0.016 | 0 | 0.002 |
| | 27-Jun-05 | Corredor | 2 | 11.08 | 6.21 | 0.371 | 0.325 | 0.011 | 0.011 | 0.014 | 0.003 | 0.000 | 0.001 |
| | 04-Oct-05 | Corredor | 2 | 51.93 | 2.38 | 3.122 | 0.193 | 0.178 | 0.013 | 0.136 | 0.019 | 0.004 | 0.003 |
| ANKAI | 05-Oct-05 | Corredor | 2 | 8.25 | 5.11 | 0.462 | 0.356 | 0.022 | 0.012 | 0.015 | 0.012 | 0.001 | 0.001 |
| Microbuses | | | | | | | | | | | | | |
| M-LPG | 11-Nov-05 | Montevideo* | 1 | 0.25 | - | 0.071 | - | 0.240 | - | 2.772 | - | 0.170 | - |
| | 11-Nov-05 | RTP-23** | 1 | 0.34 | - | 0.085 | - | 0.323 | - | 2.931 | - | 0.189 | - |
| M-D-CNG | 06-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.80 | 0.52 | 0.050 | 0.028 | 0.002 | 0.000 | 0.002 | 0.002 | 0 | 0.001 |
| | 07-Oct-05 | Corredor | 1 | 4.60 | - | 0.237 | - | 0.043 | - | 0.009 | - | 0.008 | - |
| M-D-Gasolina | 03-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.13 | 0.32 | 0.026 | 0.019 | 0.125 | 0.124 | 0 | 0.007 | 0.026 | 0.047 |
| | 06-Oct-05 | Corredor | 2 | 0.65 | 0.70 | 0.037 | 0.035 | 0.329 | 0.297 | 0.007 | 0.009 | 0.084 | 0.072 |



Tabla 11.2 Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles por especie. (Cont.)

| Vehículo | Fecha de prueba | Ruta | No. de pruebas | Emisiones de COV [g/km] | | | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-------------|----------------|-------------------------|------|----------|-------|-----------|-------|---------|-------|----------|-------|
| | | | | I-Butano | | N-butano | | Acetileno | | Butenos | | Pentanos | |
| | | | | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 30-Sep-05 | Corredor | 3 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0.001 | 0.001 | 0.005 | 0.001 | 0.001 | 0 | 0.001 |
| RTP 5 | 30-Jun-05 | Norte | 2 | 0 | 0.00 | 0 | 0.000 | 0.105 | 0.015 | 0.013 | 0.000 | 0 | 0.006 |
| RTP 6 | 29-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.001 | 0.001 | 0.007 | 0.010 | 0.002 | 0.001 | 0 | 0.004 |
| VOLVO 12 | 11-Feb-05 | Norte | 2 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| | 11-Feb-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.003 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.009 | 0.009 | 0.003 | 0.003 |
| | 13-Jun-05 | Corredor | 1 | 0 | - | 0.000 | - | 0.000 | - | 0.003 | - | 0.000 | - |
| MB 11 | 28-Sep-05 | Corredor | 2 | 0 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0 | 0.000 |
| ELETRABUS | 28-Sep-05 | Corredor | 2 | 0 | 0.00 | 0 | 0.000 | 0.105 | 0.015 | 0.013 | 0.000 | 0 | 0.006 |
| Autobuses a Gas Natural Comprimido | | | | | | | | | | | | | |
| BUSSCAR | 03-Feb-05 | Norte | 3 | 0.00 | 0.00 | 0.002 | 0.002 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 | 0.001 | 0.002 |
| | 03-Feb-05 | Corredor | 2 | 0 | 0.00 | 0.004 | 0.014 | 0.018 | 0.005 | 0 | 0.000 | 0 | 0.009 |
| | 08-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.01 | 0.00 | 0.012 | 0.006 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.011 |
| | 03-Oct-05 | Corredor | 3 | 0.00 | 0.00 | 0.001 | 0.001 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.000 | 0.000 |
| FAW | 04-Feb-05 | Norte | 3 | 0 | 0.00 | 0 | 0.004 | 0 | 0.020 | 0 | 0.001 | 0 | 0.018 |
| | 27-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.000 | 0.001 | 0.001 |
| | 04-Oct-05 | Corredor | 2 | 0.01 | 0.00 | 0.010 | 0.003 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.000 | 0.002 | 0.002 |
| ANKAI | 05-Oct-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0.006 | 0 | 0.001 | 0 | 0.001 | 0 | 0.007 |
| Microbuses | | | | | | | | | | | | | |
| M-LPG | 11-Nov-05 | Montevideo* | 1 | 0.31 | - | 0.991 | - | 0.199 | - | 0.073 | - | 0.005 | - |
| | 11-Nov-05 | RTP-23** | 1 | 0.33 | - | 1.035 | - | 0.300 | - | 0.070 | - | 0.000 | - |
| M-D-CNG | 06-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.001 | 0.002 | 0 | 0.035 | 0 | 0.002 | 0.001 | 0.023 |
| | 07-Oct-05 | Corredor | 1 | 0.00 | - | 0.001 | - | 0.000 | - | 0.005 | - | 0.002 | - |
| M-D-Gsln | 03-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.08 | 0.11 | 0.029 | 0.035 | 0.644 | 0.901 | 0.372 | 0.354 | 0 | 0.064 |
| | 06-Oct-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.020 | 0.019 | 0.013 | 0.011 | 0.162 | 0.171 | 0.043 | 0.037 |



Tabla 11.2 Emisiones de Compuestos Orgánicos Volátiles por especie. (final)

| Vehículo | Fecha de prueba | Ruta | No. de pruebas | Emisiones de COV [g/km] | | | | | | | |
|------------------------------------|-----------------|-------------|----------------|-------------------------|------|----------|-------|----------|-------|------------|-------|
| | | | | 1,3 Butadieno | | Pentenos | | Otros HC | | HCNM Total | |
| | | | | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 30-Sep-05 | Corredor | 3 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.058 | 0.001 | 0.045 |
| RTP 5 | 30-Jun-05 | Norte | 2 | 0.01 | 0.00 | 0.002 | 0.000 | 0.083 | 0.031 | 0.472 | 0.063 |
| RTP 6 | 29-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.114 | M/D | 0.121 |
| VOLVO 12 | 11-Feb-05 | Norte | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.043 | 0.055 | 0.080 | 0.052 |
| | 11-Feb-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.002 | 0.002 | 0 | 0 | 0.029 | 0.029 |
| | 13-Jun-05 | Corredor | 1 | 0.00 | - | 0.000 | - | 0.026 | - | 0.051 | - |
| MB 11 | 28-Sep-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.032 | 0.006 | 0.028 |
| ELETRABUS | 28-Sep-05 | Corredor | 2 | 0.01 | 0.00 | 0.002 | 0.000 | 0.083 | 0.031 | 0.472 | 0.063 |
| Autobuses a Gas Natural Comprimido | | | | | | | | | | | |
| BUSSCAR | 03-Feb-05 | Norte | 3 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.007 | 0.007 | 0.447 | 0.037 |
| | 03-Feb-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.015 | 0.145 | 0.056 |
| | 08-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0.001 | 0 | 0.480 | 2.220 | 0.565 |
| | 03-Oct-05 | Corredor | 3 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.021 | 0.025 | 0.311 | 0.243 |
| FAW | 04-Feb-05 | Norte | 3 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0 | 0.011 | 0.301 | 0.248 |
| | 27-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.003 | 0.000 | 0.401 | 0.339 |
| | 04-Oct-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0.000 | 0.000 | 0.006 | 0.001 | 3.469 | 0.234 |
| ANKAI | 05-Oct-05 | Corredor | 2 | 0.00 | 0.00 | 0 | 0.001 | 0 | 0.200 | 0.335 | 0.166 |
| Microbuses | | | | | | | | | | | |
| M-LPG | 11-Nov-05 | Montevideo* | 1 | 0.00 | - | 0.006 | - | 0.004 | - | 0.000 | - |
| | 11-Nov-05 | RTP-23* | 1 | 0.00 | - | 0.001 | - | 0 | - | 0 | - |
| M-D-CNG | 06-Jun-05 | Corredor | 2 | 0 | 0.00 | 0 | 0.036 | 0 | 0.314 | 0 | 0.334 |
| | 07-Oct-05 | Corredor | 1 | 0.00 | - | 0.001 | - | 0.105 | - | 0.411 | - |
| M-D-Gsln | 03-Jun-05 | Corredor | 2 | 0.02 | 0.01 | 0.097 | 0.114 | 2.316 | 2.662 | 3.680 | 4.208 |
| | 06-Oct-05 | Corredor | 2 | 0.02 | 0.01 | 0.030 | 0.024 | 1.233 | 0.866 | 1.980 | 1.559 |

* Ruta alterna en la avenida Montevideo.

** Modulo No. 23 de la Red de Transporte de Pasajeros.



11.3 Apéndice 3: Políticas Ambientales Aplicadas al Transporte Público de Pasajeros de Alta Capacidad en la Ciudad de México.

11.3.1 Introducción.

Los diferentes medios de transporte siempre han tenido una importancia estratégica y se han ido adaptando en función del tamaño de la población, de la extensión geográfica de la ciudad y del entorno tecnológico de cada época. Actualmente, este sector es el que mayor cantidad de gases contaminantes emite ya que las fuentes móviles son responsables de la emisión del 80% de los óxidos de nitrógeno, 40% de los hidrocarburos y 36% de las partículas menores a 10 micras.

Estos altos porcentajes en la emisión de contaminantes es una consecuencia de una serie de factores entre los que destacan los enormes consumos de energía, ya que la flota vehicular de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), demanda 18 y 4.5 millones de litros diarios de gasolina y diesel respectivamente, así como la tecnología vehicular en que es aprovechada dicha energía.

Respecto al consumo de energéticos, este es una consecuencia de las necesidades de movilidad de la población ya que en la ZMVM diariamente se realizan 20.57 millones de viajes, de los cuales el 66.5% se realizan en el Distrito Federal (D.F) en tanto que en los municipios conurbados se realiza el 33.5% restante, y se estima que para el año 2020 se generarán un total de 28.5 millones de viajes por día, de los cuales el 61.5% corresponderán al D.F.

Proyección de Viajes en la ZMVM (1994-2020)
(Miles de viajes al día)

| AMBITO GEOGRÁFICO | 1994 | % | 2020 | % |
|---|----------|-------|----------|-------|
| <i>Distrito Federal</i> | 13,673.1 | 66.5 | 17,426.3 | 61.5 |
| Viajes al interior del Distrito Federal | 11,598.6 | 56.4 | 41,647.3 | 51.7 |
| En delegaciones | 4,977.4 | 24.2 | 6,398.1 | 22.6 |
| Entre delegaciones | 6,621.1 | 32.2 | 8,249.2 | 29.1 |
| Viajes metropolitanos | 2,074.5 | 10.1 | 2,778.9 | 9.8 |
| <i>Municipios conurbados del Estado de México</i> | 6,900.6 | 33.5 | 10,914.3 | 38.5 |
| Viajes al interior de la ZMEM | 4,744.1 | 23.1 | 8,101.7 | 28.6 |
| En municipios | 3,168.0 | 15.4 | 5,340.8 | 18.8 |
| Entre municipios | 1,576.0 | 7.7 | 2,760.8 | 9.7 |
| Viajes metropolitanos | 2,156.5 | 10.5 | 2,812.6 | 9.9 |
| <i>Total viajes en la ZMVM</i> | 20,573.7 | 100.0 | 28,340.6 | 100.0 |
| Total viajes internos | 8,145.5 | 39.6 | 11,738.9 | 41.4 |
| Total viajes entre delegaciones/municipios | 8,197.2 | 39.8 | 11,010.1 | 38.8 |
| Total de viajes metropolitanos | 4,231.1 | 20.6 | 5,591.6 | 19.2 |

Fuente: Programa Integral de Transporte y Vialidad 1995 - 2000 (SETRAVI - GDF)



Si se considera que cada viaje puede realizarse en dos ó más medios de transporte, el número de tramos de viajes realizados diariamente es de 29.2 millones, en donde el principal medio de transporte es el de los colectivos seguidos por el automóvil particular.

Tramos de Viaje de los Residentes de la ZMVM
Según modo de Transporte

| MODO DE TRANSPORTE | TRAMOS DE VIAJE | PORCENTAJE |
|--------------------|-------------------|----------------|
| Colectivo | 16,106,994 | 55.08% |
| Automóvil | 4,871,561 | 16.66% |
| Metro | 3,906,076 | 13.36% |
| Autobús urbano | 1,952,299 | 6.68% |
| Autobús RTP | 1,026,881 | 3.51% |
| Suburbano | 743,533 | 2.54% |
| Taxi | 220,166 | 0.75% |
| Bicicleta | 167,767 | 0.57% |
| Trolebús | 21,008 | 0.07% |
| Motocicleta | 225,111 | 0.77% |
| Otro transporte | | |
| TOTAL | 29,241,396 | 100.00% |

Fuente: INEGI, Encuesta de origen destino de los viajes de los residentes de la ZMCM, 1994. (No se incluyen los viajes de niños menores de 6 años)

Con relación a los modos de transporte, la ZMVM se caracteriza por proveer una gran cantidad de opciones de transporte al usuario, las cuales han crecido bajo un esquema de oferta - demanda, por lo cual no están integrados dentro de un sistema modal de transporte urbano, por el contrario, se aglutinan en su operación diaria, convirtiéndose en elementos competidores entre sí, lo cual ha beneficiado a aquellos medios de transporte más flexibles, por encima de los más eficientes.

De esta forma, la participación de los distintos modos de transporte se ha visto modificada en los últimos años, la situación se ha intensificado a partir de 1986, ante el avance de los colectivos, y la disminución porcentual de la participación de los modos de capacidad unitaria media (autobuses o trolebuses), y de alta capacidad (Metro y tren ligero)

Colectivos

Es un modo de baja capacidad unitaria que se expandió casi por toda el área metropolitana invadiendo rutas troncales y alimentadoras. Por su crecimiento desmesurado, los colectivos son fuente de conflictos cotidianos debido a su desorganización y a la falta de control en la prestación del servicio, con una fuerte participación en los corredores troncales y, por tanto, con problemas de integración con otros modos de transporte.



Este sector se caracteriza por estar constituido por unidades a gasolina carentes de sistemas anticontaminantes de última generación tales como el convertidor catalítico, presentan serios problemas de mantenimiento motriz por lo que representan no sólo un problema ambiental sino también un grave problema de seguridad para la Ciudad.

El parque vehicular total de este sector es apenas mayor al 1% de la flota automotriz de la ZMVM, pero son responsables de la emisión de más del 13% de las emisiones totales generadas por las fuentes móviles.

Taxis

Ante la insuficiencia de otros modos de transporte, los taxis se han convertido en una modalidad en rápida expansión que presentan dificultades para una operación integrada, y acusan problemas de sustitución y de renovación de flota. Su participación en la emisión de contaminantes es cercana al 8% a pesar de solamente atender el 2.6% de los viajes persona – día.

Autobuses

Este servicio se presta mediante dos esquemas distintos, el primero es un servicio de tipo gubernamental y el otro se refiere a las concesiones otorgadas a diversas empresas que ya ofertan este servicio. A través de los microbuses y autobuses se realizan más de 19 millones de tramos de viaje, lo que representa un 64% del total de segmentos de traslado que en el área metropolitana se efectúan.

Automóviles particulares

Los automóviles particulares son responsables de la emisión de casi el 42% de las emisiones del sector transporte. Esto es una consecuencia de la existencia de un elevado porcentaje de vehículos con sistema de carburación mecánico (más del 34% en la ZMVM) que emiten hasta 21 veces más contaminantes que las unidades seminuevas y del alto número de unidades que diariamente circulan en las principales avenidas del Valle de México (cerca de 3.6 millones de vehículos), mismos que afectan la velocidad crucero de la Ciudad de México situándola en cerca de 33 kilómetros por hora.

Metro y otros transportes eléctricos

El Metro sigue siendo la columna vertebral del sistema de transporte público en la Ciudad de México, aún cuando su participación en la captación de viajes se ha reducido gradualmente en los últimos diez años. En este sentido, cabe recalcar que en la última década la demanda de servicio se ha mantenido constante a pesar de haberse incrementado la oferta.

La Red de Servicio de Trolebús cuenta con 15 Líneas con una longitud de operación 453.85 Kms, beneficiando a una población de más de 380 colonias de 9 delegaciones del Distrito Federal, la flota vehicular programada en la red es de 405 trolebuses, los cuales operan a un intervalo de paso promedio de 5 minutos, todas dentro del Distrito Federal.



El Tren Ligero forma parte de la red del Servicio de Transportes Eléctricos del Distrito Federal, el cual opera en el Sur de la Ciudad de México prestado un servicio de transporte no contaminante a la población de las Delegaciones Coyoacán, Tlalpan y Xochimilco, brindando su servicio a través de 16 estaciones y 2 terminales, mediante 16 trenes dobles acoplados con doble cabina de mando con capacidad máxima de 374 pasajeros por unidad.

11.3.2 Antecedentes.

El gobierno del DF ha planteado la necesidad de una reforma global del sistema de transporte público de superficie, mediante la implantación de un sistema de transporte que garantice menores emisiones contaminantes críticas por unidad de viaje y que ofrezca un servicio moderno y eficiente para los usuarios de transporte público.

A principios del 2002, el Gobierno del Distrito Federal, a través de la Secretaría del Medio Ambiente, inició negociaciones con el Banco Mundial con la finalidad de gestionar recursos del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF, por sus siglas en inglés) para el desarrollo de una estrategia integral de transporte climáticamente más amigable en la Ciudad de México, que fortalezca los esfuerzos del gobierno de la Ciudad al permitir la implementación y realización de proyectos y medidas vinculados e incluidos en el PROAIRE 2002-2010 y consideradas como acciones prioritarias en el Programa Integral de Transporte y Vialidad (PITV) 2000-2006.

Como resultado de dichas negociaciones, en octubre del 2002 el GEF, a través del Banco Mundial como agencia ejecutora, aprobó un financiamiento para apoyar la implantación del “Proyecto Introducción de Medidas Ambientalmente Amigables en Transporte”(PIMAAT). El proyecto promovió el uso sostenible de transporte en corredores estratégicos en la Ciudad de México. La integración de estos corredores permitirá el uso más eficiente y climáticamente amigable del transporte público, incluyendo el transporte no motorizado.

En el marco del PIMAAT, se desarrolló el sistema “Corredores de Transporte Público de Pasajeros del Distrito Federal”-Sistema Metrobús y se llevaron a cabo Pruebas de Tecnologías de Autobuses de alta capacidad (Híbridos diesel-eléctricos, gas natural comprimido, diesel de bajo contenido de azufre y diesel convencional de última tecnología).

- **Metrobús**

El Sistema Metrobús representa una mejora significativa, del transporte público de pasajeros convencional, al implicar una renovación tecnológica en vialidades importantes en la Ciudad de México, a partir del desarrollo de bases técnicas acordes con características específicas de demanda, socio-urbanas y ambientales. En ese mismo sentido las reformas al marco de regulación efectuadas a propósito de su implementación, hacen del servicio de transporte una actividad eficiente, favoreciendo el uso más racional de los recursos y garantizando la sostenibilidad del sistema en el tiempo, con calidad y de manera autosuficiente.

Los beneficios del sistema se empezaron a obtener desde junio del 2005, a partir del inicio de operaciones del Metrobús Insurgentes, hasta hoy el único corredor del sistema. A



partir de entonces se atienden alrededor de 250,000 pasajeros diarios; se retiraron de la vialidad a 350 unidades obsoletas de transporte público, las cuales fueron sustituidas por 102 autobuses articulados de alta capacidad. Derivado de la operación eficiente del corredor se estima que habrá un ahorro de 8,905,223 horas-hombre, lo que representará un ahorro económico de 232,070,106 pesos.

Así mismo en el ámbito internacional el Metrobús Insurgentes contribuirá en la mitigación de los efectos del cambio climático global, al lograrse una reducción de los índices de contaminación globales de la ciudad de alrededor de 35,000 toneladas anuales de bióxido de carbono equivalentes. Con la venta de bonos de carbono derivados de dicha reducción de contaminantes, formalizada en octubre de 2005, el Metrobús Insurgentes se convirtió en el primer proyecto de transporte en el mundo aprobado por la convención marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático, en el contexto de su Mecanismo de Desarrollo Limpio, cumpliéndose así con el principal objetivo de su creación.

- **Pruebas de Tecnologías de Autobuses**

La llamada Componente 3: Pruebas de Tecnologías de Autobuses, consiste en una serie de pruebas comparativas para autobuses que utilizaron diferentes combustibles y tipos de motores (Híbridos, Gas Natural Comprimido y Diesel) y los vehículos normales; se compararon las ventajas técnicas, económicas, ambientales y de clima bajo la operación en condiciones reales de manejo de la ZMVM.

Estas pruebas permitieron la identificación de las tecnologías más viables para ser utilizadas en el Distrito Federal. La evaluación tuvo un carácter ambiental, definiéndose así cuál tecnología resulta menos agresiva para el medio ambiente y cuál es aquella que, desde el punto de vista operativo, puede ser introducida de manera realista.

Dicha evaluación se llevó a cabo bajo un estricto control de parámetros de operación y mediante el uso del Sistema Portátil de Medición de Emisiones Vehiculares (RAVEM, por sus siglas en inglés) que es propiedad de la Secretaría del Medio Ambiente del Gobierno del Distrito Federal. Este equipo fue instalado en el interior del autobús de prueba y permitió medir en tiempo real las emisiones, mientras el autobús circulaba en el corredor. Este equipo se utilizó durante 2004 y 2005, en donde se evaluaron las emisiones generadas por autobuses de bajas emisiones en condiciones reales de operación y manejo dentro de la Ciudad de México.

11.3.3 Situación Actual.

En el Distrito Federal el servicio de transporte vía autobuses se presta mediante dos esquemas distintos, el primero es un servicio de tipo gubernamental y el otro se refiere a las concesiones otorgadas a diversas empresas que ya ofertan este servicio, el tipo de unidades que se utilizan son autobuses de mediana y alta capacidad que emplean como combustible diesel y que cuentan con una certificado de emisiones EPA98 y EuroIII.



En este contexto, el modo de transporte prevaleciente son los autobuses y microbuses y es precisamente en este ámbito en el que RTP prevalece con carácter estratégico. Tal situación, se hace notar en el cuadro siguiente:

| Empresa / Agrupación | C O N C E P T O | | | |
|--|-----------------|----------|--------------------------------|------------------------------------|
| | Cantidad | Unidades | Recorridos (vueltas que da) | Unidades promedio por recorrido |
| Empresas Concesionadas (autobuses) | 10 | 1,225 | 97 | 13 |
| Agrupaciones A.C. (microbuses y autobuses) | 109 | 27,441 | 1,066 | 26 |
| Red de Transporte de Pasajeros (autobuses) | 1 | 1,325 | 97 | 14 |
| Total: | 120 | 29,991 | 1,260 | 24 |

Fuente: Red de Transporte de Pasajeros RTP. 2006

Del cuadro anterior, se hace referencia a los aspectos siguientes:

- En cuanto a la cantidad de agrupaciones y empresas, RTP representa sólo el 1% del total.
- Por lo que respecta al parque vehicular, las unidades de RTP representan el 8.5% del total de la Ciudad.
- Por lo que se refiere a los derroteros (rutas), RTP cuenta con recorridos prácticamente en toda la Ciudad, en tanto que cada agrupación o empresa atiende una zona geográfica definida.
- En cuanto a la presencia de los servicios de autobuses por ruta, se tiene una proporción de casi 2 concesionadas por 1 de RTP, sin embargo esta situación se potencializa si consideramos la cantidad de recorridos, encontrándose una proporción de casi 20 unidades concesionadas por una de RTP.
- El 31% del parque vehicular de la Ciudad, pertenece a 5 agrupaciones; como se muestra en el siguiente cuadro:

| No. de Ruta | Unidades | Recorridos | Unidades promedio por recorrido |
|-------------|----------|------------|------------------------------------|
| 1 | 3,265 | 93 | 35 |
| 2 | 2,230 | 53 | 42 |
| 3 | 1,204 | 58 | 21 |
| 14 | 1,069 | 49 | 22 |
| 18 | 1,537 | 90 | 17 |
| Total: | 9,305 | 343 | 27 |

Fuente: Red de Transporte de Pasajeros RTP. 2006

Actualmente el Sistema de transporte Metrobús cuenta con una flota de 102 autobuses articulados, 67 unidades son propiedad de Corredor Insurgentes, S.A. CISA, y 35 unidades son operadas por la Red de Transporte de Pasajeros del Gobierno del Distrito Federal, RTP.



11.3.4 Normas Ambientales Vigentes para Vehículos a Diesel en México.

Actualmente las normas que aplican a los vehículos a diesel son las siguientes:

- **NOM-044-SEMARNAT-1993:** Que establece los límites máximos permisibles de emisión de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), partículas suspendidas totales (PST) y opacidad de humo provenientes del escape de motores nuevos que usan diesel como combustible y que se utilizarán para la propulsión de vehículos automotores con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos. En la tabla siguiente se muestran los límites establecidos en la norma.

Límites máximos permisibles de emisión en motores nuevos utilizados en vehículos con peso bruto vehicular mayor de 3,857 kilogramos que usan diesel como combustible

| Año- modelo del motor | Niveles máximos permisibles de emisión [g/bhp-h] | | | |
|--|---|------|-----|------|
| | HC | CO | NOx | PST |
| 1993 | 1.3 | 15.5 | 5.0 | 0.25 |
| 1994-1997 | | | | |
| Autobús urbano extra-pesado | 1.3 | 15.5 | 5.0 | 0.07 |
| Autobús urbano mediano-pesado, ligero-pesado y otros | 1.3 | 15.5 | 5.0 | 0.01 |
| 1998 en adelante | | | | |
| Autobús urbano extra-pesado | 1.3 | 15.5 | 4.0 | 0.05 |
| Autobús urbano mediano-pesado, ligero-pesado y otros | 1.3 | 15.5 | 4.0 | 0.10 |

- **NOM-045- SEMARNAT -1996:** Que establece los niveles máximos permisibles de opacidad del humo proveniente del escape de vehículos automotores en circulación que usan diesel o mezclas que incluyan diesel como combustible.

Niveles máximos permisibles de opacidad

| Peso bruto vehicular | Año modelo | Coefficiente de absorción de luz (m^{-1}) | Porcentaje de opacidad (%) |
|----------------------|--------------------|---|----------------------------|
| Hasta 2,727 Kg* | 1995 y anteriores | 1.99 | 57.61 |
| | 1996 y posteriores | 1.07 | 37.04 |
| Mayores 2,727 Kg** | 1990 y anteriores | 1.99 | 57.61 |
| | 1991 y posteriores | 1.27 | 42.25 |

*En función del año-modelo del vehículo. **En función del año-modelo del motor



- **NOM-077- SEMARNAT -1995:** Que establece el procedimiento de medición para la verificación de los niveles de emisión de la opacidad del humo proveniente del escape de los vehículos automotores en circulación que usan diesel como combustible.

El método para la medición es el de la aceleración libre, consistente en una prueba estática del vehículo acelerando el motor, desde su régimen de velocidad de marcha lenta hasta su velocidad máxima sin carga. La medición de las emisiones de humo se realiza durante el periodo de aceleración del motor, utilizando un opacímetro.

- **NOM-086 SEMARNAT- 1993:** Especificaciones sobre protección ambiental que deben reunir los combustibles fósiles líquidos y gaseosos que se usan en fuentes fijas y móviles.

En particular para el diesel vehicular se establecen las especificaciones fisicoquímicas que deberá tener el combustible que se comercialice en la ZMVM, este combustible deberá cumplir con un contenido máximo de azufre en peso del 0.05% y el número de cetano deberá ser de 48 como mínimo.

11.3.5 Normas Ambientales Internacionales.

Estandares de emisión para vehículos con Motor diesel

| Año Contaminante | Hidrocarburos (HC) | Monóxido de Carbono (CO) | Oxidos de Nitrógeno (NOx) | Partículas |
|---------------------|-----------------------|-----------------------------|------------------------------|------------|
| 1993* | 1,3 | 15,5 | 5 | 0,25 |
| 1994-1997* | 1,3 | 15,5 | 5 | 0,1 |
| 1998-2003* | 1,3 | 15,5 | 4 | 0,1 |
| EPA98* | 1,3 | 15,5 | 4 | 0,1 |
| EPA04* | 0,5 | 15,5 | 2 | 0,1 |
| EUROIII** | 0,66 | 2,1 | 5 | 0,1 |
| EUROIV** | 0,46 | 1,5 | 3,5 | 0,02 |

* en g/bhp-hr

** en g/kw-hr

pbv mayor a 3,587 kg

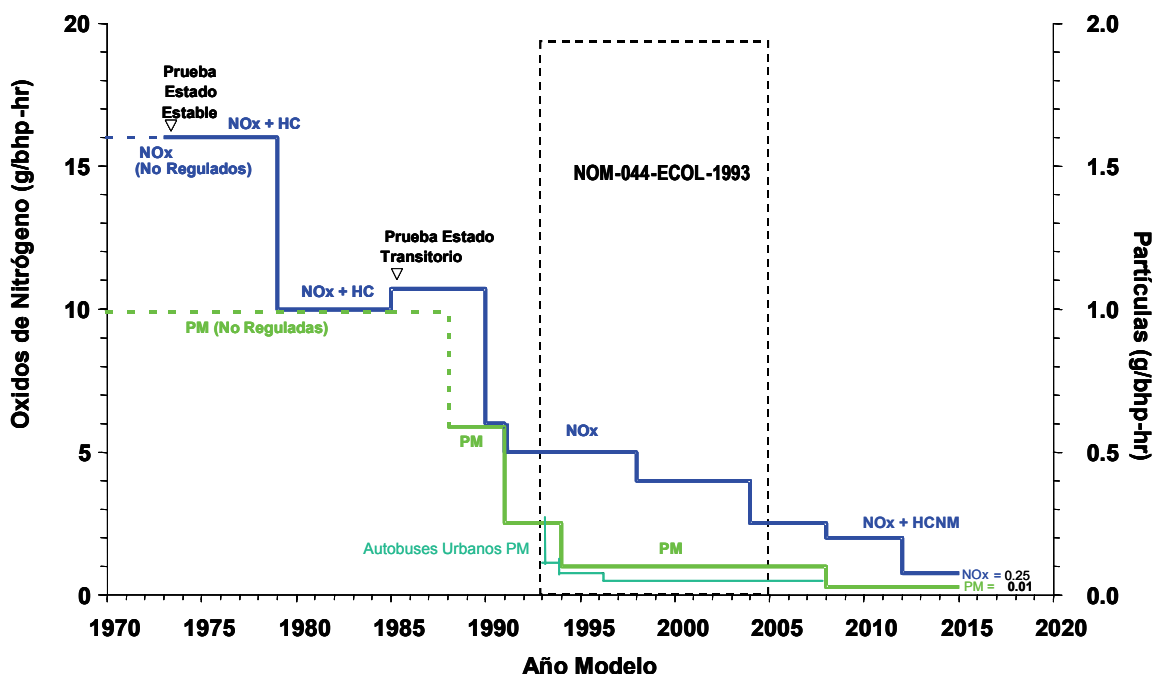
Fuente: Directive 2001/27/EC y 40 CFR section 50,10

Los niveles de emisión por modelo en diferentes tipos de pruebas: europeos y norteamericano (transitorio y estacionario) es el siguiente:

Los cambios en la tecnología han dado como resultado que los vehículos actuales, tengan niveles de emisión mucho más bajos a los que se tenían en años anteriores. En la siguiente figura, se aprecia que los motores a diesel actuales han evolucionado a tal punto que han reducido las emisiones de los óxidos de nitrógeno en más del 70% y las partículas en un 90%.



Mapa de emisiones en México



Fuente: SMA.-DGGAA.-DIP.-2005

En México, la evolución de la normatividad para los vehículos diesel, ha sido un reflejo de la tendencia normativa norteamericana, sin embargo actualmente se ha permitido la introducción de motores y tecnologías de control de emisiones desarrolladas en Europa.

11.3.6 Pruebas de Tecnologías de Autobuses.

En total se evaluaron 14 autobuses equipados con sistemas de propulsión a diesel, gas natural e híbrido (diesel-eléctrico), incluyendo los 3 modelos de autobuses articulados que pertenecen a Metrobús. Estos vehículos fueron operados en condiciones normales de la Ciudad de México durante el tiempo que permanecieron en el país.

Para los vehículos a diesel, las emisiones en circulación en términos de gramos por BHP-hr se estimaron con relativa exactitud, dividiendo el consumo de combustible entre los kilómetros por consumo de combustible para frenado específico (BSFC por sus siglas en inglés). Dado que no se tiene BSFC específico para cada motor de los autobuses de prueba, se asumió un BSFC de 170 gr/BHP-hr. Dicho valor debe estar adentro del 10% del BSFC actual para la mayoría de los motores diesel en uso. El resultado de aplicar estos cálculos se muestra en la siguiente tabla.



| Vehículo | Fecha de Prueba | Ruta de Manejo | Núm de Test | Emisiones – g/BHP-hr | | | | | | | |
|---|-----------------|----------------|-------------|----------------------|------|-------|-----|-------|-----|-----------------|-----|
| | | | | PM | | NOx | | CO | | CO ₂ | |
| | | | | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ | Prom. | σ |
| Autobuses a Diesel | | | | | | | | | | | |
| RTP 1 | 14-Dec-2004 | Norte | 3 | 0.15 | 0.03 | 4.9 | 0.1 | 1.2 | 1.4 | 539 | 2 |
| | 14-Dec-2004 | Corredor | 3 | 0.15 | 0.01 | 4.8 | 0.4 | Neg. | 1.6 | 541 | 58 |
| | 26-may-05 | Corredor | 3 | 0.11 | 0.01 | 4.8 | 0.2 | 1.6 | 0.3 | 538 | 25 |
| | 29-sep-05 | Corredor | 3 | 0.12 | 0.01 | 4.5 | 0.3 | 1.4 | 0.7 | 538 | 16 |
| RTP 2 | 6-Dec-2004 | Norte | 1 | 0.12 | - | 7.2 | - | 0.5 | - | 540 | - |
| | 6-Dec-2004 | Corredor | 2 | 0.12 | 0.01 | 7.6 | 0.7 | 2.0 | 1.5 | 537 | 1 |
| Vol 12 | 11-feb-05 | Norte | 2 | 0.36 | 0.03 | 6.3 | 0.5 | 6.7 | 0.4 | 530 | 65 |
| | 11-feb-05 | Corredor | 3 | 0.33 | 0.04 | 6.0 | 0.2 | 6.0 | 0.6 | 531 | 4 |
| | 13-jun-05 | Corredor | 3 | 0.36 | 0.05 | 6.3 | 0.3 | 6.5 | 0.6 | 530 | 20 |
| | 06-sep-05 | Corredor | 2 | 0.43 | 0.00 | 6.1 | 0.2 | 7.2 | 0.2 | 528 | 26 |
| Sc 18 | 08-feb-05 | Norte | 2 | 0.66 | 0.02 | 2.4 | 0.0 | 3.4 | 0.7 | 535 | 43 |
| | 08-feb-05 | Corredor | 3 | 0.47 | 0.02 | 2.1 | 0.1 | 2.0 | 0.7 | 512 | 29 |
| MB 10 | 09-nov-04 | Norte | 3 | 0.12 | 0.01 | 4.7 | 0.3 | 1.3 | 0.3 | 538 | 187 |
| | 09-nov-04 | Corredor | 2 | 0.09 | 0.01 | 4.8 | 0.0 | 1.6 | 0.1 | 538 | 11 |
| MB 11 | 24-jun-05 | Corredor | 3 | 0.05 | 0.00 | 6.2 | 0.2 | 1.4 | 0.7 | 538 | 42 |
| | 28-sep-05 | Corredor | 3 | 0.07 | 0.01 | 5.8 | 0.3 | 1.3 | 0.3 | 538 | 45 |
| MB 12 | 16-Dec-2004 | Norte | 3 | 0.10 | 0.01 | 6.4 | 0.1 | 1.8 | 0.7 | 538 | 8 |
| | 16-Dec-2004 | Corredor | 3 | 0.08 | 0.02 | 6.3 | 0.3 | 2.1 | 0.8 | 537 | 20 |
| Metrobuses a Diesel | | | | | | | | | | | |
| RTP | 07-sep-05 | Corredor | 3 | 0.15 | 0.03 | 4.2 | 0.2 | 0.8 | 0.2 | 538 | 28 |
| CISA | 08-sep-05 | Corredor | 3 | 0.13 | 0.01 | 6.5 | 0.5 | 3.1 | 0.2 | 535 | 27 |
| Fénix | 09-sep-05 | Corredor | 3 | 0.33 | 0.05 | 3.7 | 0.1 | 2.8 | 0.4 | 535 | 20 |
| Autobuses a Diesel con Control de Emisiones Adicional | | | | | | | | | | | |
| RTP 3 | 8-Dec-2004 | Norte | 2 | 0.04 | 0.01 | 5.1 | 0.4 | 0.5 | 0.3 | 540 | 16 |
| | 8-Dec-2004 | Corredor | 3 | 0.05 | 0.02 | 4.5 | 0.3 | 0.7 | 0.6 | 539 | 20 |
| | 23-may-05 | Corredor | 3 | 0.04 | 0.02 | 4.4 | 0.5 | 0.3 | 0.6 | 540 | 62 |
| | 12-sep-05 | Corredor | 3 | 0.01 | 0.01 | 4.1 | 0.1 | 1.0 | 1.3 | 539 | 28 |
| RTP 4 | 3-Dec-2004 | Norte | 3 | 0.03 | 0.01 | 6.4 | 0.3 | Neg. | 1.0 | 543 | 15 |
| | 3-Dec-2004 | Corredor | 3 | 0.02 | 0.01 | 6.3 | 0.2 | 0.0 | 1.4 | 540 | 24 |
| Allison | 06-nov-04 | Norte | 3 | 0.01 | 0.01 | 3.8 | 0.2 | Neg. | 1.8 | 542 | 61 |
| | 06-nov-04 | Corredor | 3 | 0.02 | 0.00 | 2.6 | 0.2 | Neg. | 1.4 | 541 | 42 |
| Eletrabus | 28-sep-05 | Corredor | 3 | 0.03 | 0.00 | 12.1 | 0.1 | 1.7 | 0.6 | 538 | 2 |

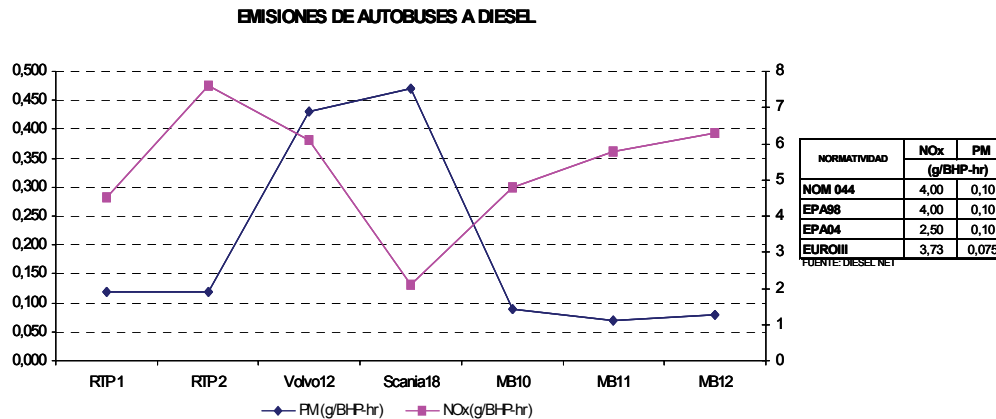
Emisiones de los autobuses a diesel (estimado) en gramos por BHP-hr

Como se muestra en la tabla las emisiones de NOx en circulación de los autobuses RTP2 y RTP4 equivalen a 6.3 a 7.6 gramos por BHP-hr, comparado con el estándar de emisión correspondiente de 4.0 g/BHP-hr.

En las siguientes graficas se hace un comparativo de los resultados de las emisiones durante las pruebas en campo y las registradas en la certificación de emisiones del país de origen de cada autobús.



Cabe mencionar que en la actualidad la normatividad para vehículos a diesel en circulación en algunos países únicamente contemplan pruebas estáticas para la medición del coeficiente de absorción de luz. Sin embargo se están llevando a cabo estudios en Australia para la realización de una prueba en dinamómetro con lo cual se podría evaluar otros contaminantes característicos de los vehículos a diesel.



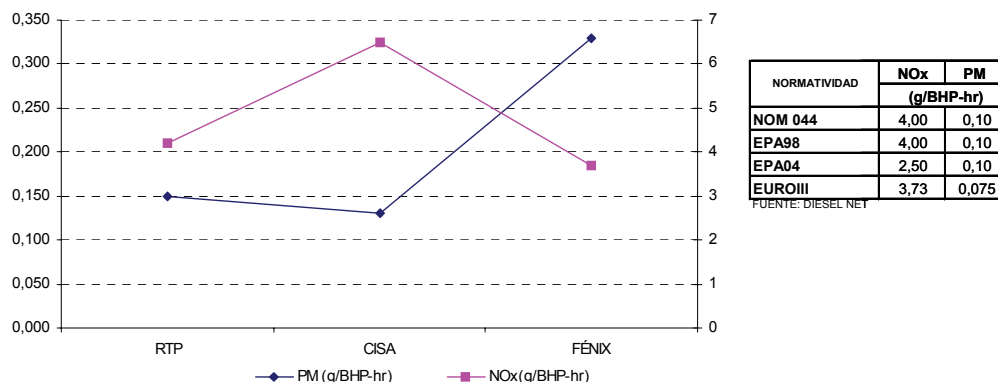
Los autobuses RTP1, RTP2, MB11 y MB12 presentaron una certificación de emisiones EPA1998, el MB10 EPA2004 y los autobuses Volvo12 y Scania18 EUROIII. En la grafica se muestran los resultados de emisión de NOx y PM registrados por el sistema RAVEM en gramos por BHP-hr. En las emisiones de NOx los autobuses registraron valores superiores a los establecidos en su certificación de emisión, no así para el Scania18 que registro una emisión menor a su certificado de 2.1 g/BHP-hr.

En el caso de las PM los autobuses MB10, MB11 y MB12 registraron valores por debajo de los establecido en su certificación con 0.09, 0.07y 0.08 g/BHP-hr respectivamente, no así para el resto de los autobuses.

En la siguiente grafica se compararon las emisiones de los autobuses articulados que actualmente circulan por el corredor vial Insurgentes perteneciente al sistema Metrobús, el autobús Scania perteneciente a la Red de Transportes de Pasajeros(RTP), el Volvo perteneciente a las empresa Corredor Insurgentes S.A. (CISA) ambos con certificación EUROIII y el Fénix de RTP que es un autobús articulado con mas de 10 años de antigüedad remozado en su totalidad para brindar un servicio en caso de eventualidades en el corredor, este no cuenta con sistemas de control de emisiones, únicamente se ajusto el motor para un mejor desempeño.

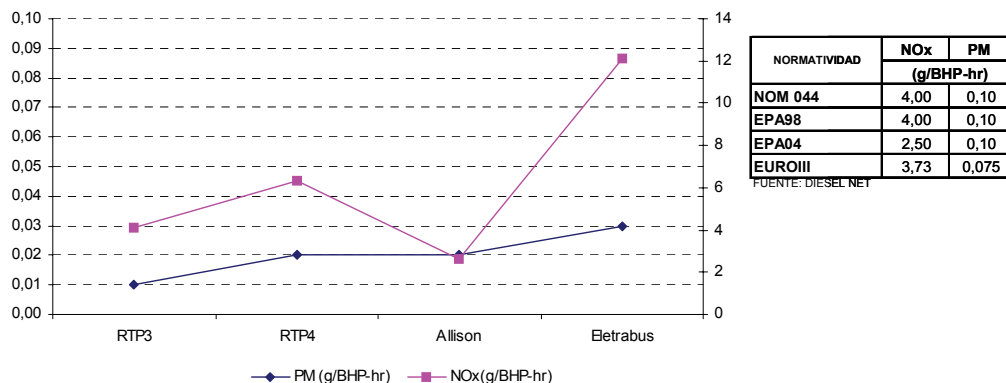


EMISIONES DE AUTOBUSES A DIESEL METROBÚS



Los autobuses RTP y CISA pertenecientes al sistema Metrobús registran valores superiores a los establecidos en su certificación de país de origen en ambos contaminantes registrando en PM 0.15 y 0.13 g/BHP-hr y en NOx 4.2 y 6.5 g/BHP-hr respectivamente.

EMISIONE DE AUTOBUSES A DIESEL CON SISTEMAS DE CONTROL DE EMISIONES



Los autobuses RTP3 y RTP4 cuentan con una certificación de emisiones EPA1998 más un filtro de partículas para diesel (DPF por sus siglas en inglés), el Allison es un autobús híbrido(diesel-eléctrico) más un DPF y el autobús Eletrabus híbrido (diesel-eléctrico), cabe mencionar que para este tipo de tecnología no se tiene referencia alguna de normatividad.

Los valores registrados para PM en todos los autobuses se encuentra por debajo de lo establecido en su certificación de emisiones de cada autobús. Cabe mencionar que para poder utilizar una trampa de partículas es necesario emplear diesel de bajo contenido de azufre (50 ó 15 ppm de S). La utilización de estos dispositivos anticontaminantes permite reducir considerablemente las emisiones de material particulado como se observa en la grafica.

Con respecto a las emisión de NOx el autobús híbrido Eletrabus registro un valor de 12.1 g/BHP-hr, muy por arriba de los límites permitidos en la normatividad vigente aplicable para los autobuses diesel.



11.3.7 Conclusiones.

En el desarrollo de las pruebas se observó que el utilizar "trampas de PM" con diesel de bajo contenido de azufre redujo significativamente las emisiones de material particulado.

Las emisiones de NOx de los autobuses a diesel mostraron variaciones considerables, muchos de éstos aparentemente excedieron los estándares de emisión de NOx para los cuales fueron certificados en dinamómetro de chasis bajo condiciones de prueba controlados. Presumiblemente los motores en algunos casos prototipos no estaban calibrados a la altitud (la baja presión atmosférica) de la Ciudad de México.

Con respecto a la normatividad en nuestro país los vehículos a diesel reciben un trato ambiental muy distinto al de sus similares a diesel en otros países. En el caso de las unidades nuevas, las normas de límites máximos de emisión son acreditables mediante la presentación de los documentos del país de origen, toda vez que por muchos años no existió algún laboratorio en territorio nacional.

Respecto a las unidades a diesel cuando las mismas ya se encuentran en circulación, la norma establece condiciones que facilita enormemente la manipulación tanto de los componentes del motor como del procedimiento de prueba, con el fin de bajar las emisiones de las unidades cuyos motores requerirían de algún mantenimiento. De esta forma, es común que estas unidades presenten bajas emisiones sólo durante el proceso de verificación de sus emisiones vehiculares.

La importancia de continuar realizando este tipo de estudios a tecnologías de bajas emisiones bajo condiciones normales de operación y tráfico característicos de la Ciudad de México permitirán en un futuro mejorar la política ambiental, así como actualizar los programas ambientales en la ZMVM para mejorar la calidad del aire como son:

Introducción de vehículos limpios.- Incorporación a la brevedad posible las tecnologías automotrices más modernas y menos contaminantes en los vehículos nuevos que se fabriquen, importen y comercialicen en la ZMVM.

Mejoramiento de las características ecológicas de los combustibles.- Mejoramiento de la calidad de los combustibles, principalmente para uso vehicular, de tal forma que permitan la introducción de nuevas tecnologías automotrices más limpias y la incorporación de equipos de reducción de emisiones en los vehículos en circulación que requieran de estos combustibles limpios.

Reducción de emisiones de vehículos en circulación.- Actualización normativa para fijar niveles más estrictos y programas para garantizar el mantenimiento preventivo y correctivo de los sistemas motrices y de control de emisiones de los vehículos.

Mejoramiento continuo del Programa de Verificación Vehicular Obligatoria.- Asegurar que los vehículos en circulación cumplan con la normatividad vigente en materia de emisiones.

Promoción del uso de combustibles alternos.- Fomento del uso de combustibles alternativos en vehículos del sistema de transporte público de pasajeros.



Impulso del sistema de transporte de pasajeros limpio y eficiente.- Renovar las unidades de transporte concesionado de pasajeros de mediana capacidad por vehículos nuevos de alta capacidad para mejorar la calidad del servicio de transporte de la ciudad; asegurar la vigencia de las concesiones cumpliendo con las normas para la prestación del servicio, ofrecer seguridad al público usuario y reducir los índices de contaminación.

Impulsar la renovación de la flota vehicular de la RTP dirigidas a disminuir la contaminación mejorando el aprovechamiento de sus recursos.- Garantizar que los vehículos que prestan el servicio público de transporte urbano en el DF reúnan las características básicas de calidad, seguridad, economía y protección al ambiente para los usuarios.