

ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

ESCUELA DE INGENIERÍA

ESTUDIO DEL USO DE DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTIÓN EN LOS VEHÍCULOS A DIESEL DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

MARGARITA ELIZABETH GUAMAN MENDEZ

DIRECTOR: ING. ÁNGEL PORTILLA A.

Quito, julio de 2006

DECLARACIÓN

Yo Margarita Elizabeth Guamán Méndez, declaro bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentada para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

A través de la presente declaración cedo mis derechos de propiedad intelectual correspondientes a este trabajo, a la Escuela Politécnica Nacional, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

Margarita Elizabeth Guamán Méndez

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por la Srta. Margarita Elizabeth Guamán Méndez, bajo mi supervisión.

Ing. Ángel Portilla A.
DIRECTOR DE PROYECTO

AGRADECIMIENTOS

A Dios, la Virgen María por las bendiciones, la salud, la fortaleza que me han dado para alcanzar las metas propuestas.

Al Ing. Ángel Portilla A. por su acertada dirección en este proyecto, por su amistad y consejo oportuno, por el apoyo brindado durante este tiempo y por las diversas oportunidades que me ha dado y continua dando para trabajar en proyectos donde mi formación se va afianzando, lo que ha permitido ampliar mis conocimientos, así como el crecimiento no sólo en el campo profesional sino como ser humano que es más importante que cualquier título.

A mis padres y hermano por su apoyo incondicional, paciencia y amor, lo que me ha dado la fuerza suficiente para continuar en el camino y así obtener un logro más en mi vida.

A mis profesores los cuales me han proporcionado conocimientos y han sido ejemplo a seguir.

A las señoras secretarias de la Carrera de Ingeniería Mecánica, por su ayuda y tiempo.

Al pueblo ecuatoriano por pagar sus impuestos.

ELIZABETH

DEDICATORIA.

A mis padres y hermano por el consejo y amor dado sin esperar nada a cambio.

A mis amigas: Nelly, Adri, Mayra, Mónica y Ligia, con quienes he compartido buenos y malos momentos, gracias por formar parte de mi vida.

A mis amigos y compañeros de aula Roberto, Kléber, Alejandro, Jaime y Fredy (Toto); a mi equipo de trabajo (Diego, Andrés, Andrés, Byron y Santiago) a quienes los aprecio mucho y considero amigos.

A José Barragán, por enseñarme a vivir de la mano de Dios, sin miedos, con fé y esperanza en las personas, por su paciencia, consejo y amor, que me alientan a seguir soñando. Sin importar que termine mañana mi sueño contigo, quiero dejar algo para recordarte siempre, te lo mereces.... gracias amor!

ELIZABETH

CONTENIDO

RESUMEN

INTRODUCCION

CAPITULO I

GENERALIDADES.

1.1	MOTOR DIESEL	1
1.1.1	GENERALIDADES.....	1
1.1.2	PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO.....	1
1.1.3	ESTRUCTURA DEL MOTOR DIESEL	2
1.1.4	DESEMPEÑO MECÁNICO DEL VEHÍCULO	3
1.1.4.1	Potencia y torque.	4
1.1.4.2	Consumo de combustible.....	5
1.1.4.3	Combustión del motor diesel.....	7
1.2	COMBUSTIBLE DIESEL.	9
1.2.1	GENERALIDADES.....	9
1.2.2	PROPIEDADES.	9
1.2.2.1	Viscosidad y densidad.	9
1.2.2.2	Punto de inflamación.....	10
1.2.2.3	Contenido de azufre.....	10
1.2.2.4	Índice de cetano.....	10
1.2.2.5	Aromáticos.	11
1.2.2.6	Poder calórico.	11
1.3	EMISIONES DEL MOTOR DIESEL	11
1.3.1	ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x).....	13

1.3.2	HIDROCARBUROS (HC).....	14
1.3.3	HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (HAP)	14
1.3.4	MONOXIDO DE CARBONO (CO).....	15
1.3.5	DIÓXIDO DE AZUFRE (SO ₂)	15
1.3.6	DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	15
1.3.7	MATERIAL PARTICULADO (PM)	16
1.4	IMPACTOS DE LAS EMISIONES DE LOS MOTORES DIESEL.	16
1.4.1	SALUD.....	17
1.4.2	IMPACTO AMBIENTAL.....	20
1.5	COMBUSTIBLE DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO.....	21

CAPITULO II

PARQUE AUTOMOTOR DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

2.1	ESTRUCTURA DEL PARQUE AUTOMOTOR URBANO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO.	24
2.1.1	LA DEMANDA DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO.	24
2.1.2	PROYECCIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR EN EL DMQ.....	26
2.2	LA RED VIAL.....	29
2.3	NORMALIZACIÓN Y REGLAMENTACIÓN PARA EL TRANSPORTE URBANO.....	32
2.3.1	NORMAS	32
2.3.1.1	Norma NTE – INEN 2205:99.”Requisitos del Bus Urbano”.	33
2.3.1.2	Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2204:98. “GESTIÓN AMBIENTAL, AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE GASOLINA.”	34
2.3.1.3	Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2207:2002. “GESTIÓN AMBIENTAL, AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES	

PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE DIESEL.”	35
2.3.1.4 ISO 1585: 1992 “ROAD VEHICLES – ENGINE TEST CODE – NET POWER”	36
2.3.1.5 Norma Euro II (normas de emisiones)	36
2.3.2 REGLAMENTOS.	39
2.3.3 ORDENANZAS PARA EL DMQ.	39

CAPITULO III

DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN.	41
3.2 CONTAMINANTES NOCIVOS PARA LA SALUD Y SUS IMPACTOS.	41
3.2.1 MATERIAL PARTICULADO, EFECTOS EN LA SALUD.	42
3.2.2 ESTRATEGIA PARA LA REDUCCION DE MATERIAL PARTICULADO.	46
3.3 DISPOSITIVOS POST COMBUSTIÓN.	48
3.3.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTIÓN.	48
3.3.1.1 Catalizadores de oxidación de diesel (DOC _S)	49
3.3.1.2 Filtros Catalíticos para Diesel	51
3.3.1.3 Filtro de partículas y trampa de NO _x .	53
3.3.1.4 Filtros de partículas diesel (DPF _S)	54
3.3.1.4.1 Eficiencia de reducción del material particulado	56
3.3.1.5 Filtro CRT (continuous regeneration trap)	58
3.3.1.6 Sistemas de reducción catalítica selectivos (SCR)	62
3.3.1.7 Sistemas de recirculación de gas de escape (EGR)	63
3.3.1.8 CRT con filtro de metal sinterizado (SMF®)	64
3.3.1.9 CRT con Filtros MK (modular-combustible)	65
3.3.1.10 Reactor™ de partículas	66
3.3.1.11 Filtros de partículas Bosch.	68

3.3.1.12	Purifilter™ (Filtro de partículas diesel).....	69
3.3.2	ADITIVOS PARA POSTCOMBUSTIÓN.....	70
3.3.2.1	Filtro MA (modular-aditivo).....	72
3.3.3	POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES	73
3.4	CERTIFICACIÓN DE DISPOSITIVOS POST-COMBUSTIÓN.	74
3.4.1	PROGRAMA DE VERIFICACIÓN VERT.	74
3.4.2	PROGRAMA DE VERIFICACIÓN CARB.....	76
3.5	EFFECTO DEL AZUFRE EN LOS DISPOSITIVOS POST COMBUSTIÓN.....	80
3.5.1	EFFECTOS DEL AZUFRE EN EL DOC _s	83
3.5.2	EFFECTOS DEL AZUFRE EN LOS DPF _s	84
3.5.3	EFFECTOS DEL AZUFRE EN LOS CRT _s	85
3.5.4	EFFECTOS DEL AZUFRE EN LOS SISTEMAS SCR.	85
3.6	APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA POSTCOMBUSTIÓN	86

CAPITULO IV

SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTIÓN

4.1	INTRODUCCIÓN.....	88
4.2	SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO POSTCOMBUSTIÓN	88
4.2.1	ANÁLISIS COSTO – BENEFICIO (C/B).....	88
4.2.1.1	Costos totales.....	89
4.2.1.1.1	Costos fijos de la aplicación de un dispositivo postcombustión en el DMQ.....	89
4.2.1.1.2	Costos variables de la aplicación de dispositivos postcombustión en el DMQ	91
4.2.1.2	Valoración económica de la reducción de emisiones de PM ₁₀	92
4.2.1.2.1	Efectos:	92
4.2.1.2.2	Beneficios:.....	93

4.2.1.3	Estimación de la reducción de PM ₁₀ del parque automotor diesel del DMQ.....	94
4.2.1.4	Estimación del beneficio económico de la reducción de PM ₁₀ del parque automotor diesel del DMQ.	99
4.2.2	SELECCIÓN TÉCNICA DEL DISPOSITIVO POSTCOMBUSTIÓN.	102
4.2.2.1	Características técnicas del parque vehicular.....	103
4.2.2.2	Mantenimiento.....	104
4.2.2.3	Combustible.	104
4.2.2.4	Caracterización de las rutas	105
4.2.2.5	Identificación de los dispositivos factibles para la flota del DMQ.....	105
4.2.3	APLICACIÓN DE DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTIÓN EN EL DMQ.	106

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1	CONCLUSIONES.....	108
5.2	RECOMENDACIONES.....	110

BIBLIOGRAFIA.....112

ANEXO.....115

ÍNDICE DE TABLAS

CAPITULO I

Tabla 1.1 Rangos típicos de materiales tóxicos, presentes en las emisiones del motor pesado de diesel.....	13
Tabla 1.2 Principales compuestos gaseosos de las emisiones diesel, producto de su transformación atmosférica y efectos biológicos	18
Tabla 1.3 Vida media atmosférica de la ED después de su transformación con OH, O ₃ , NO ₃ y HO ₂	19
Tabla 1.4 Principales compuestos particulados de las emisiones diesel, productos de sus transformaciones atmosféricas y efectos biológicos	20
Tabla 1.5 Requisitos del diesel 1	21
Tabla 1.6 Requisitos del diesel 2.	22
Tabla 1.7 Requisitos del diesel 2 de bajo contenido de Azufre para uso automotriz. .	22

CAPITULO II

Tabla 2.1 Principales zonas de circulación del Servicio de Transporte Público.....	25
Tabla 2.3 Transporte Urbano a Diesel. Principales marca de motores existentes.....	27
Tabla 2.2 Vehículos de Transporte Urbano, año-modelo	28
Tabla 2.4 Evolución Red vial urbana 1760 – 2001	30
Tabla 2.5 Límites de emisiones para vehículos livianos. Capacidad < 2.5 Ton ó >6 Personas.	37
Tabla 2.6 Límites de emisiones para vehículos de pasajeros. Capacidad > 2.5 Ton ó > 6 Personas, vehículos de carga < 3.5 Ton.....	38

CAPITULO III

Tabla 3.1 Resultados del uso del filtro de partículas CRT®, en vehículos diesel pesados, prueba transeúnte FTP.....	62
Tabla 3.2 Características de los filtros MK.....	66
Tabla 3.3 Porcentajes de reducción de las diferentes tecnologías probadas en programas Retrofit en otros países.....	73
Tabla 3.4 Lista de tecnologías verificadas.....	78
Tabla 3.5 Experiencia de la utilización de dispositivos postcombustión.....	86

CAPITULO IV

Tabla 4.1 Estimación de costos de tecnologías post combustión.....	89
Tabla 4.2 Costo total fijo de compra e instalación del dispositivo postcombustión y su sistema de control, en Suiza y California pronosticados para los años 2003 a 2005.....	90
Tabla 4.3 Costo total fijo de compra e instalación del dispositivo postcombustión y su sistema de control para el DMQ.....	90
Tabla 4.4 Costo anual de operación y mantenimiento de dispositivos postcombustión en Suiza y California pronosticados para los años 2003 a 2005.....	91
Tabla 4.6 Resultados del estudio realizado (kilómetros recorridos diariamente por ruta).....	95
Tabla 4.5 Costos variables del uso de dispositivos postcombustión en el DMQ.....	92
Tabla 4.7 Proyección del parque automotor diesel del DMQ.....	96
Tabla 4.8 Proyección de las emisiones de PM10 del parque automotor diesel, hasta el 2014.....	97
Tabla 4.9 Proyección de la reducción de PM ₁₀ , para el periodo 2005 – 2014, al aplicar dispositivos postcombustión con eficiencias de 50 y 85%, sobre la línea base de emisiones.....	98
Tabla 4.10 Determinación del beneficio económico que se lograría con la aplicación de dispositivos postcombustión en el DMQ, 2005 – 2010.....	100
Tabla 4.11 Relación Costo – Beneficio de la aplicación del programa retrofit.....	100

Tabla 4.12 Datos Técnicos de las marcas de autobuses representativos del DMQ.	103
Tabla 4.13 Requerimientos de los dispositivos con relación al contenido de azufre en el combustible.....	105
Tabla 4.14 Características técnicas de los dispositivos preseleccionados para un programa retrofit en el DMQ.	107

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPITULO I

Figura 1.1 Motor Diesel.....	3
Figura 1.2 Curva de desempeño del motor Mercedes - Benz	5
Figura 1.3 Resistencias externas del vehículo en una pendiente	6
Figura 1.4 Contenido de azufre del diesel del Distrito Metropolitano de Quito, hasta mayo de 2004.....	23

CAPITULO II

Figura 2.1 Distribución del servicio de transporte público por su modalidad.	27
Figura 2.2 Distribución de marcas de vehículos a diesel existentes en el DMQ.....	29
Figura 2.3 Evolución Red vial urbana en el DMQ.1760 – 2001	30
Figura 2.4 Red Vial actual del DMQ.....	31

CAPITULO III

Figura 3.1 Partículas emitidas por el motor Diesel	42
Figura 3.2 Distribución del número de partículas en función del diámetro, modificado de EPA, 1996.....	43
Figura 3.3 Material particulado existente en le ambiente (Fuente A. Mayer).....	45

Figura 3.4 Distribución de las partículas en el cuerpo humano,	46
Figura 3.5 Catalizadores de oxidación de diesel. Fleetward	49
Figura 3.6 Conversión de Gases en un Catalizador de Oxidación de Diesel.....	50
Figura 3.7 Reducción de contaminantes con el uso del Catalizador de Oxidación de Diesel	51
Figura 3.8 Filtro Catalítico.....	52
Figura 3.9 Eficiencia del filtro catalítico	52
Figura 3.10 Filtro de partículas diesel.	55
Figura 3.11 Estructura del filtro de partículas diesel.....	56
Figura 3.12 Distribución de la cantidad de partículas diesel.....	56
Figura 3.13 Eficiencia del DPF en pruebas realizadas en Chile.....	57
Figura 3.14 Estructura del CRT.	58
Figura 3.15 Funcionamiento del CRT.	59
Figura 3.16 Efecto del uso del CRT en las emisiones de gases contaminantes.....	60
Figura 3.17 Comparación de las emisiones de varias tecnologías de motor de bus urbano.	61
Figura 3.18 Emisiones de NO ₂ debido al uso del CRT en un motor a diesel para bus urbano.	61
Figura 3.19 Filtro SCR - MECA.....	63
Figura 3.20 CRT con filtro de metal sinterizado (SMF).....	64
Figura 3.21 CRT con filtro MK.....	65
Figura 3.22 Reactor TM de partículas diesel (Fuente Fleetguard Inc. © 2005)	67
Figura 3.23 Reducción lograda por el Reactor TM de partículas (Fuente: Fleetguard Inc. © 2005).....	67
Figura 3.24. Filtro de partículas Bosch.....	68
Figura 3.25. Montaje Purifilter TM . Sección de entrada, cuerpo central del filtro y sección de salida.	70
Figura 3.26. Resultados obtenidos en 50 buses urbanos modelo 1996, en pruebas realizadas por la EPA US.	70

Figura 3.27 Sistema de filtración de partículas diesel con aditivo.....	71
Figura 3.28. Descripción de un sistema de filtro de partículas diesel.	72
Figura 3.29 Influencia del contenido de azufre del combustible. Pruebas a motor pesado 1200 rpm a carga de 50%	81
Figura 3.30. Influencia del azufre en el combustible en la efectividad del dispositivo retrofit. Pruebas de un motor a diesel pesado sobre FTP	82
Figura 3.31. Efecto del contenido de azufre en el diesel en las emisiones de PM usando el sistema SCR – IVECO.....	85

CAPITULO IV

Figura 4.1. Relación B/C que se obtiene con la aplicación de dispositivos postcombustión en el DMQ, en 3 escenarios.....	101
--	-----

RESUMEN

En el capítulo 1, se presentan las características del motor diesel, los gases contaminantes emitidos por éste durante su proceso de combustión, así como las características del diesel 1, diesel 2 y diesel premium que se expenden en el Ecuador.

En el capítulo 2, se presentan las características del parque automotor diesel, normas, reglamentos y ordenanzas municipales que deben cumplir para su libre circulación dentro del Distrito Metropolitano de Quito.

En el capítulo 3, se analizan: los efectos que produce el Material Particulado de tipo urbano (PM_{10}) en la salud, producto de su inhalación. Los dispositivos postcombustión como alternativa para la disminución de los gases contaminantes en especial el PM_{10} , emitidos por los vehículos a diesel, sus características físicas y tecnológicas, aplicaciones y resultados obtenidos en diversos programas.

En el capítulo 4, se realiza el análisis de la relación Costo – Beneficio, la misma que permite determinar si la aplicación de dispositivos postcombustión es viable en el Distrito Metropolitano de Quito. Se hace el análisis comparativo de las características tecnológicas de los dispositivos existentes en el mercado y que han sido probados, con esto se logra determinar los dispositivos que generarían buenos resultados en la reducción de PM_{10} y con las características del parque automotor existente.

PRESENTACIÓN

El transporte urbano de pasajeros, es una importante actividad, puesto que permite la movilidad de personas y sus bienes, por lo que debe ser seguro y eficiente. En los últimos años este sector presenta un crecimiento acelerado, trayendo consigo problemas en cuanto al deterioro de las condiciones ambientales de la ciudad, así como la salud de sus habitantes. Es atribución y obligación de las autoridades municipales de la ciudad garantizar una efectiva prestación del servicio de transporte urbano de pasajeros, siendo necesario para ello controlar que las unidades que prestan su servicio estén en condiciones óptimas de funcionamiento y debidamente habilitados, es decir que cumplan con las ordenanzas y normativas vigentes. Como medida de control las autoridades crean los centros de revisión y control vehicular, donde se determina el estado mecánico del vehículo.

Características propias del sector de transporte urbano a diesel, es su envejecimiento acelerado debido al servicio que prestan, lo que provoca un incremento en su costo operacional por un aumento en el consumo de combustible, los frecuentes problemas mecánicos obligan a reemplazar el tipo de mantenimiento utilizado, además se convierte en una fuente de contaminación ambiental, debido a los gases tóxicos (CO, CO₂, NO_x, SO₂ e hidrocarburos, incluidos los hidrocarburos policíclicos aromáticos (HPA), Material Particulado (PM)) que sale del tubo de escape al medio. Estudios recientes han comprobado que la exposición continua a estos gases, son la causa de muertes prematuras, decadencia de las personas que sufren de asma y otras enfermedades respiratorias, y hasta cáncer.

Debido al pequeño tamaño del PM, a este se le asocia con un mayor impacto negativo en la salud humana, por lo que se están buscando métodos de reducción, para esto se han diseñado programas de control, donde se plantean alternativas tecnológicas y económicas para el sector del transporte como: Reemplazar las normas para vehículos nuevos por normas más exigentes, reducir las emisiones de buses existentes a través del uso de dispositivos de postcombustión, generar incentivos para vehículos de baja emisión; así como

una reducción continua del contenido de azufre del combustible, ya que este es causante directo de parte de la emisión de partículas finas de diámetro $<2.5 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{2.5}$) y ultrafinas de diámetro $>1 \mu\text{m}$ ($\text{PM}_{1.0}$).

El presente trabajo hace un estudio sobre las diversas tecnologías postcombustión existentes en el mercado, su aplicación en otros países y los resultados obtenidos, además se plantea la factibilidad de su aplicación en el Distrito Metropolitano de Quito.

CAPITULO 1

GENERALIDADES

1.1 MOTOR DIESEL

Se presenta un breve estudio acerca del motor diesel, se define su principio básico de funcionamiento, sistemas, aplicaciones, ventajas y desventajas de su uso y el tipo de gases contaminantes que genera.

1.1.1 GENERALIDADES

Se define como motor de combustión interna a la máquina que obtiene energía mecánica directamente de la energía química producida por un combustible que arde dentro de una cámara de combustión, parte principal de un motor. Hay cuatro tipos: el motor cíclico Otto (motor convencional de gasolina), el motor diesel (que suele consumir gasóleo), el motor rotatorio y la turbina de combustión.

El motor diesel inventado y patentado por Rudolf Diesel en 1892, es un motor de combustión interna, constituyendo su principal diferencia el sistema de alimentación y la forma en la que se realiza la combustión, su desarrollo ha apuntado a obtener mayor potencia con menos combustible. “En la actualidad un motor Diesel utiliza solo un 70% del combustible que utilizaría un motor a gasolina de características similares para una misma potencia. Sin embargo la robustez necesaria lo hace más costoso y pesado”¹.

1.1.2 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO

Un motor diesel funciona mediante la ignición de la mezcla aire-combustible sin chispa. El inicio de la combustión procede de la elevación de la temperatura debido a la compresión del aire. El combustible diesel se inyecta en la parte superior de la cámara de combustión a gran presión, de forma que se atomiza, éste se mezcla con el aire a alta temperatura y presión. Esta combustión ocasiona que el gas contenido en la cámara se expanda, impulsando al pistón

¹ http://www.gencat.net/mediamb/cast/aire/e_auto.

hacia abajo con una considerable fuerza lo que produce su movimiento lineal. La biela transmite este movimiento al eje del cigüeñal, lo que hace que dé la vuelta, ofreciendo par o torque al extremo final del cigüeñal.

El funcionamiento del motor diesel depende del sistema de inyección de combustible, ya que éste entrega el combustible a los cilindros, debido a ésta característica, éste sistema se encuentran en constante estudio y por ende en desarrollo, además una mejora en su diseño da como resultado mejor funcionamiento del motor, disminución en la emisión de gases contaminantes, así como del ruido producido por el motor.

1.1.3 ESTRUCTURA DEL MOTOR DIESEL

El motor diesel para su funcionamiento consta de los siguientes sistemas:

- Bloque del motor.
- Sistema de arranque.
- Sistema de combustible.
- Sistema de enfriamiento.
- Sistema de lubricación.
- Sistema de admisión de aire.
- Sistema de escape.
- Sistema de precalentamiento.

Estos sistemas en combinación, permiten poner en marcha el motor diesel. El sistema de arranque pone en marcha el motor; el sistema de combustible alimenta al motor; el sistema de enfriamiento controla la temperatura del motor, el sistema de lubricación se encarga de disminuir la fricción, prevenir el desgaste y enfriar; el motor recibe aire a través del sistema de admisión de aire y los gases quemados se descargan a través del sistema de escape.²

² J.M. Alonso, TÉCNICAS DEL AUTOMÓVIL, editorial Paraninfo, Madrid España, 2001

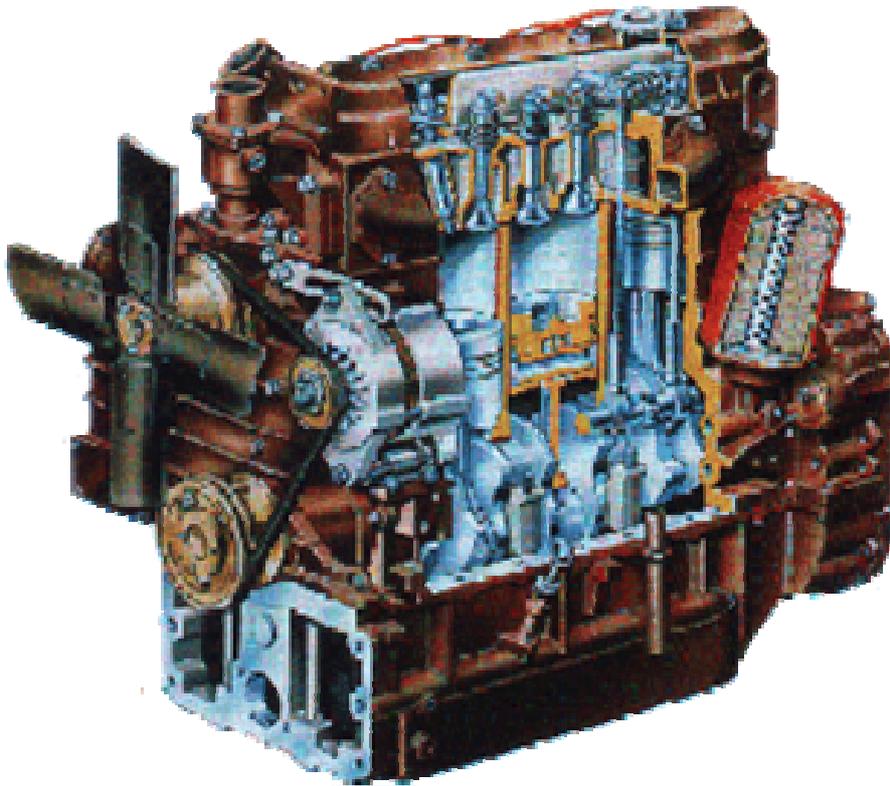


Figura 1.1. Motor Diesel.

1.1.4 DESEMPEÑO MECÁNICO DEL VEHÍCULO

El desempeño del vehículo se ve afectado por dos parámetros cuantitativos: el peso de la carga máxima que puede transportar y la pendiente crítica por la que transitará, que, a su vez depende de la ruta de operación. Además que permite conocer su comportamiento en cuanto a su capacidad de aceleración, pérdidas de potencia, ciclo de trabajo del sistema de refrigeración y temperatura de operación del motor.

El motor constituye parte importante en el funcionamiento del vehículo, debido a esto es indispensable determinar el estado mecánico y físico en el que se encuentra, mediante un análisis de:

- Potencia y Torque,
- Consumo de combustible y
- Emisiones contaminantes.

1.1.4.1 Potencia y torque.

En todos los motores de combustión interna el torque no es constante, depende de la velocidad de giro del motor (rpm). Normalmente inicia con un torque muy bajo, aumenta paulatinamente hasta alcanzar un máximo y posteriormente vuelve a caer. El torque es el responsable de empujar el vehículo o bien de acelerarlo.

El torque es el esfuerzo de rotación. Cuando el pistón se mueve hacia abajo en la carrera de potencia aplica torsión al cigüeñal por medio de la biela.

$$\tau = F * r \text{ [Nm]} \quad (1.1)$$

Donde: F: fuerza del brazo del pistón (N)

r: longitud de la biela. (m)

La potencia es el producto del par motor por el régimen de giro del mismo; es necesaria para determinar la velocidad máxima a la que puede trabajar el motor. La potencia aporta información sobre el funcionamiento y estado mecánico del motor, debido a que cualquier falla le afecta sensiblemente.

$$Pot = \tau * w \text{ [W]} \quad (1.2)$$

Donde: w: velocidad de giro del motor. (rad/s)

τ : torque del motor. (Nm)

En los vehículos a diesel la potencia representa el trabajo realizado por los gases en el interior del cilindro durante un ciclo, el mismo que depende del funcionamiento de todos sus sistemas, de manera que cualquier falla que se presente afecta el funcionamiento del motor y por ende del vehículo.

Todo vehículo que sale al mercado entrega una gráfica donde se encuentra la curva de desempeño del motor, aquí se encuentran datos de potencia, torque y consumo de combustible en función de las rpm.

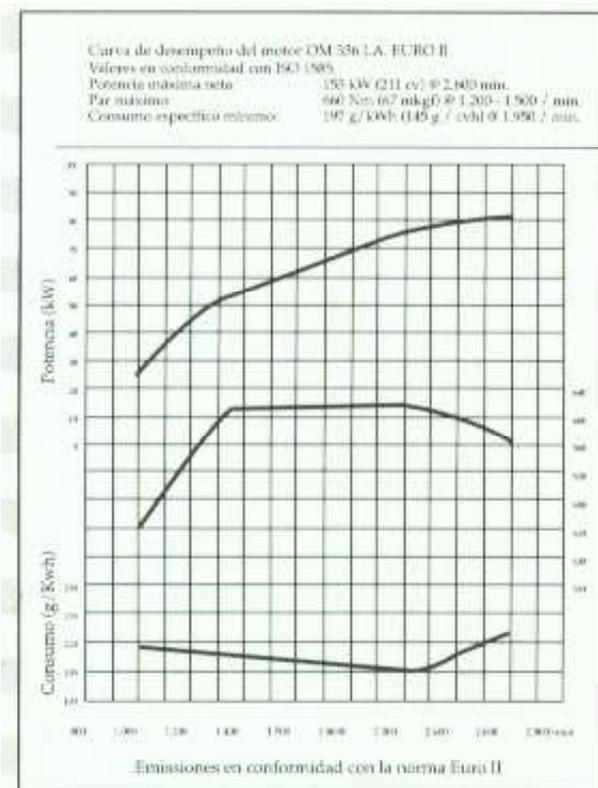


Figura 1.2 Curva de desempeño del motor Mercedes - Benz

1.1.4.2 Consumo específico de combustible.

El consumo específico de combustible se define como el caudal másico de combustible consumido para obtener una unidad de potencia en el eje.³ En los motores diesel el consumo de combustible está ligado con la emisión de contaminantes, así como con las características geométricas del inyector y el tipo del sistema de inyección.

El consumo de combustible depende de:

- Estado del motor.
- Acoplamiento motor - transmisión.
- Resistencias externas del vehículo:
 - Resistencia de las pendientes. (R2)
 - Resistencia de rodadura. (R3)
 - Resistencia aerodinámica. (R4)

³ Simón Figueroa S.; MANTENIMIENTO DE MOTORES DIESEL, Merida, 1997.

- Inercia del vehículo (aceleración y desaceleración).
- Fuerza de rozamiento (Fr)
- Condiciones de conducción.

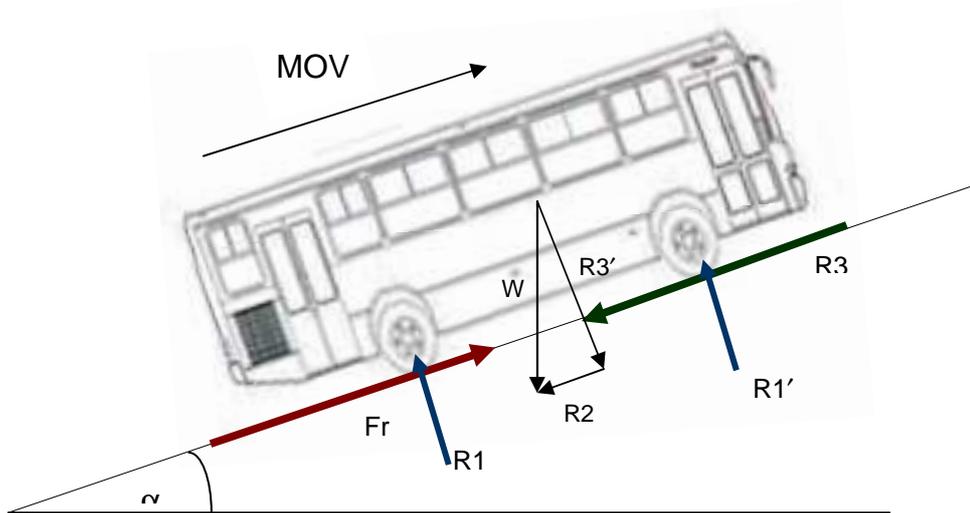


Figura 1.3. Resistencias externas del vehículo en una pendiente

El consumo de combustible en un vehículo está relacionado con la capacidad de realizar un trabajo de transporte. Este consumo depende de diversos parámetros constructivos del motor, el tipo de servicio (transporte de carga o pasajeros), el recorrido que va a realizar tomando en cuenta su distancia (km), las resistencias al movimiento que deba vencer y la variación de la velocidad a la que está sometido el vehículo por las condiciones aleatorias de su movimiento.

La determinación del consumo específico de combustible en un vehículo se determina como:

$$g_e = g_{eN} * K_A * K_n \quad [\text{gal. /kW.h}] \quad (1.3)$$

Donde: g_{eN} : Consumo de específico de combustible para potencia máxima del motor [gal. /kW.h]

K_A, K_n : Coeficientes de aprovechamiento del motor.

$$K_A = 1.7977 * A^3 + 1.8734 * A^2 - 6.2614 * A + 3.6189 \quad (1.4)$$

$$K_n = 0.2991 \left(\frac{W_x}{W_N} \right)^3 + 0.03 \left(\frac{W_x}{W_N} \right)^2 - 0.93 \left(\frac{W_x}{W_N} \right) + 1.2025 \quad (1.5)$$

Donde: W_x : r.p.m. del motor a una velocidad X.

W_N : r.p.m. máxima del motor

El coeficiente de aprovechamiento del motor se lo define como A y se lo calcula:

$$A = \frac{Pot_{nec}}{Pot_x} \quad (1.6)$$

Donde: Pot_x : potencia a una velocidad X.

El consumo de combustible para el recorrido en una vía experimental se determina:

$$Q = \frac{100 * q}{S} \quad [\text{Litros}/100 \text{ km}]^4 \quad (1.7)$$

Donde: q : consumo de combustible [litros]

S : distancia [km]

Para los vehículos de carga el consumo de combustible para un recorrido específico.

$$Qt = \frac{q}{(Mc * Sc)} \quad [\text{Litros}/ \text{t-km}] \quad (1.8)$$

Donde: q : consumo de combustible [litros]

Sc : distancia de la ruta [km]

Mc : peso de la carga que lleva (pasajeros peso en hora picos)

1.1.4.3 Combustión del motor diesel

“El encendido en los motores diesel, se debe a la temperatura alcanzada por el aire al ser comprimido en la carrera de compresión. Al final de esta carrera se

⁴ Eficiencia Energética y Reducción del Impacto Ambiental en el Transporte automotor, Dr. José Fuentes Vega; Centros de Estudios y Medio Ambiente, Universidad de Cienfuegos Cuba.

inyecta combustible líquido a alta presión, el mismo que es distribuido en forma de chorro o de varios chorros en la cámara de combustión. Debido a la alta presión del chorro, el combustible se rompe en muy finas partículas, permitiendo de esta manera que se establezca la reacción química del combustible con el oxígeno, en forma adecuada.”⁵

Cabe destacar que la distribución del combustible, el mezclado con el aire, la evaporación y difusión, así como también las reacciones químicas necesarias para quemar el combustible se llevan a cabo en un período de tiempo muy corto, el proceso de combustión, se lo realiza considerando el diagrama de variación de la presión en el interior del cilindro, en función del ángulo de giro del cigüeñal. El proceso se divide en tres períodos:

1. Período de retraso de encendido.
2. Período de combustión directa.
3. Período postcombustión.

En el período de retraso, se presenta en dos etapas, el retraso físico y el químico. El retraso físico es el lapso entre el comienzo de la inyección y el logro de las condiciones de la reacción química, en este el combustible es atomizado, vaporizado, mezclado con el aire y aumentado de temperatura, mientras que el retraso químico, la reacción inicia lentamente y en seguida se acelera hasta que ocurre la inflamación o encendido.⁶

En el período de combustión directa, el combustible aún está siendo inyectado, pero se quema inmediatamente después de la inyección, por la presencia de una llama en la cámara. En consecuencia, la presión durante este período se puede ajustar a cierto grado, controlando la cantidad de combustible inyectado.

En el período de postcombustión, la inyección del combustible termina y los gases quemados se expanden. El combustible sobrante, se quema durante el período de propagación. La prolongación de este período provoca un incremento en la temperatura del gas de escape y reduce la potencia para girar el motor; por lo que, este período no debe ser largo.

⁵ Manual Diesel, Ing. Ángel Portilla A.; Motores de Combustión Interna, Carrera de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional

⁶ Motores de Combustión Interna, Análisis y aplicaciones, Edgard Orbet, México 1991.

“Entre estos tres períodos, el de retraso de encendido y el de propagación de la llama se pueden considerar períodos preparativos para la combustión directa, y su calidad influye considerablemente en el proceso de combustión completa del motor.”⁷

1.2 COMBUSTIBLE DIESEL

Se describe las propiedades del combustible diesel, así como el impacto ambiental que produce su combustión en los motores diesel.

1.2.1 GENERALIDADES

El petróleo es una mezcla de un gran número de hidrocarburos, es decir, compuestos de hidrógeno y carbono, con impurezas de azufre, nitrógeno y oxígeno en pequeña proporción. Generalmente está compuesta por un 85% de carbono, 12% de hidrógeno, 1% de azufre, 1% de nitrógeno y 1% de oxígeno, aunque esta composición puede variar.

Los combustibles diesel provienen de una fracción de petróleo crudo llamada destilado. Las moléculas de hidrocarburos en el combustible diesel son más grandes que las de la gasolina. Hay varias características que los destilados tienen en común: deben ser capaces de fluir (viscosidad), evaporarse en un tiempo limitado (volatilidad) y ser limpios.

1.2.2 PROPIEDADES

Estos combustibles tienen ciertas propiedades que los hacen adecuados para ser empleados en los motores Diesel.

1.2.2.1 Viscosidad y densidad

Viscosidad es el rozamiento interno debido a la cohesión molecular en un fluido. La resistencia al movimiento deslizante de capas adyacentes de un fluido en su movimiento, ésta disminuye rápidamente al aumentar la temperatura, con

⁷ Manual Diesel, Ing. Ángel Portilla A.; Motores de Combustión Interna, Carrera de Ingeniería Mecánica, Escuela Politécnica Nacional

la cual se pierde cuerpo y se gana fluidez. La viscosidad del diesel en el Ecuador va de 2.5 a 6 CST⁸.

La inyección de diesel en el motor, está controlada por volumen o por tiempo de una válvula de solenoide. Las variaciones en la densidad y viscosidad del combustible resultan en variaciones en la potencia del motor y, consecuentemente, en las emisiones y el consumo. Se ha encontrado, además, que la densidad influye en el tiempo de inyección de los equipos de inyección controlados mecánicamente.

1.2.2.2 Punto de inflamación

El punto de inflamación o de encendido, es la mínima temperatura a la cual se desprende suficiente cantidad de vapores como para inflamarse momentáneamente, al aplicarle una llama. El punto de inflamación del diesel es mínimo 51° C⁹, lo cual los hace mucho más seguros para el manejo y el almacenamiento que la gasolina, que se vaporiza a todas las temperaturas atmosféricas normales. Está relacionado directamente con la viscosidad, de manera que cuando esta disminuye, el punto de inflamación también lo hace y viceversa.

1.2.2.3 Contenido de azufre

Todos los combustibles diesel contienen cierta cantidad de azufre. Un contenido de azufre demasiado alto produce desgaste excesivo de los cilindros por la formación de ácidos en el aceite lubricante. Además éste contribuye significativamente a las emisiones de material particulado (PM). Los combustibles diesel, no deben contener más de 0.05%¹⁰ en peso de contenido de azufre.

⁸ Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 810:1987 "Productos de petróleo. Determinación de la viscosidad cinemática en líquidos"

⁹ Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1047:1984 "Productos de petróleo. Punto de inflamación en copa cerrada. Método Tag."

¹⁰ Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1490:1987 "Productos de petróleo. Determinación de azufre. Método de la bomba"

1.2.2.4 Índice de cetano

El índice de cetano ($C_{16}H_{34}$) es una medida para determinar la calidad de la ignición del diesel y es equivalente al porcentaje por volumen del cetano en la mezcla con heptametilnonano, la cual se compara con la calidad de ignición del combustible prueba (ASTM D-613). Típicamente los motores se diseñan para utilizar índices de cetano de entre 40 y 55¹¹, un valor debajo de los 38 incrementa el retardo de la ignición.

La adición de aditivos formulados con base a alquilnitrosos, aminonitrosos primarios, nitritos o peróxidos, que permiten mejorar el tiempo de encendido, pueden provocar un aumento en las emisiones de NO_x .

1.2.2.5 Aromáticos

El contenido de aromáticos en el combustible, afecta a la combustión, en la formación de PM y en las emisiones de hidrocarburos poliaromáticos, además influyen en la temperatura de la flama y, por lo tanto, en las emisiones de NO_x durante la combustión. La influencia del contenido de poliaromáticos en el combustible afecta la formación de PM y las emisiones de este tipo de hidrocarburos en el tubo de escape.

1.2.2.6 Poder calórico

El poder calórico o calor de reacción, es el calor generado que se requiere para quemar completamente una unidad másica de combustible, la calidad del combustible se determina por su poder calórico.

1.3 EMISIONES DEL MOTOR DIESEL

La contaminación puede ser causada por fuentes emisoras fijas o móviles. Las fuentes fijas son aquellas que se encuentran establecidas en un lugar determinado y su emisión se produce siempre en este mismo lugar, pueden ser desde una industria en particular hasta un vertedero de basura o un área

¹¹ Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1495:1987 "Productos de petróleo. Determinación del índice de cetano calculado"

agrícola. Las fuentes móviles son aquellas que cambian su ubicación con respecto al tiempo, como por ejemplo los vehículos motorizados.

La contaminación del aire es un problema de salud ambiental que afecta a los países desarrollados y en vías de desarrollo de todo el mundo. A escala mundial, cada vez se emiten mayores cantidades de gases y partículas potencialmente nocivos, lo que daña la salud humana, el ambiente y los recursos necesarios para lograr un desarrollo sostenible en el planeta.

Los contaminantes del aire generalmente se clasifican en partículas en suspensión (polvos, gases, neblinas y humos), contaminantes gaseosos (gases y vapores) y olores.

Las emanaciones provenientes de motores diesel se componen de hollín y gases que contienen miles de sustancias químicas. El hollín consta de partículas muy pequeñas que, al inhalarlas, se depositan en los pulmones. Los gases provenientes de la combustión de diesel contienen 20000¹² veces más partículas que los de gasolina. Estas partículas transportan sustancias carcinógenas conocidas como hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH). Las emisiones de combustible diesel, tales como óxido nitroso, dióxido de nitrógeno, formaldehído, benceno, dióxido de azufre, sulfuro de hidrógeno, dióxido y monóxido de carbono, pueden ocasionar trastornos para la salud.

Los contaminantes gaseosos incluyen compuestos de azufre (por ejemplo, dióxido de azufre [SO₂] y trióxido de azufre [SO₃]), monóxido de carbono [CO], compuestos de nitrógeno (por ejemplo, óxido nítrico [NO], dióxido de nitrógeno [NO₂], amoníaco [NH₃]), compuestos orgánicos (por ejemplo, hidrocarburos [HC], compuestos orgánicos volátiles [COV], hidrocarburos aromáticos policíclicos [PAH], derivados halogénicos, aldehídos, etcétera), compuestos halogénicos (HF y HCl) y sustancias olorosas.

Los contaminantes secundarios se pueden formar a través de reacciones térmicas, químicas o fotoquímicas. Por ejemplo, por la acción térmica, el SO₂

¹² <http://www.pvem.org.mx/contaminacion.htm>

se puede oxidar a SO_3 , el cual, disuelto en agua, da lugar a la formación de la neblina ácida sulfúrica (catalizada por manganeso y óxidos de hierro). Las reacciones fotoquímicas entre el NO_x y los hidrocarburos reactivos pueden generar ozono (O_3), formaldehído (HCHO) y peroxiacetilnitrato (PAN) y reacciones entre HCl y HCHO que pueden formar éter diclorometílico.

Los olores son provocados por agentes químicos específicos, como el sulfuro de hidrógeno (H_2S), el disulfuro de carbono (CS_2) y los mercaptanos (R-SH , $\text{R}_1\text{S R}_2$), y otros que son difíciles de definir químicamente

Estudios sobre contaminación ambiental revelan que la exposición a partículas minúsculas (PM_{10} y $\text{PM}_{2.5}$) está asociada con el aumento de la tasa de mortalidad y morbilidad. Tales descubrimientos han impulsado más investigaciones y nuevas normas y lineamientos acerca de la exposición a las emanaciones del motor diesel. Las personas expuestas a los gases de escape de motores diesel corren el riesgo sufrir efectos adversos tales como jaquecas, náuseas, cáncer y enfermedades respiratorias.

Los gases de escape que descarga el motor diesel contienen varios componentes que son nocivos para la salud humana y el medio ambiente. La tabla 1.1 muestra los rangos típicos de materiales tóxicos, presentes en los gases de escape. Los valores menores pueden encontrarse en motores nuevos y limpios, y los valores altos en equipos antiguos.

*Tabla 1.1. Rangos típicos de materiales tóxicos, presentes en las emisiones del motor pesado de diesel.*¹³

CO	HC	PM	NO_x	SO₂
<i>vppm</i>	<i>vppm</i>	<i>g/m³</i>	<i>vppm</i>	<i>vppm</i>
5 - 1500	20 - 400	0.1 - 0.25	50 - 2500	10 - 150

¹³ Fuente: www.nett.ca/es/dieselemisions.html

1.3.1 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno (NO_x) se generan por la reacción del oxígeno y del nitrógeno bajo condiciones de alta presión y temperatura en el interior de cilindro del motor. El 95% de nitrógeno encontrado en el gas de escape forma el óxido nítrico (NO) que se produce en la cámara de combustión. El óxido nítrico se combina con el oxígeno en la atmósfera para formar dióxido de nitrógeno (NO₂). Las emisiones de NO_x son un serio problema medioambiental, por su participación en la formación del smog.

Los óxidos de nitrógeno, producen una enorme variedad de impactos sobre la salud y el medio ambiente, es un irritante de las vías respiratorias, puede exacerbar el asma y es susceptible de provocar incrementos de infecciones de las vías respiratorias, daña al pulmón y disminuye sus mecanismos de defensa, dejándolo más susceptible a alergias e infecciones tanto bacterianas como virales. En presencia de la luz solar reacciona con los hidrocarburos para formar contaminantes fotoquímicos como el ozono (O₃). Además los NO_x forman el ácido nítrico, que en presencia del agua forman la lluvia ácida.

1.3.2 HIDROCARBUROS (HC)

Los hidrocarburos (metano, etano, etileno, tolueno, benceno, terpeno, etc.) provienen de varias fuentes naturales, tales como la actividad bacteriana y los gases producidos por los yacimientos de gas. El principal hidrocarburo artificial es terpeno que se escapa de los yacimientos de petróleo y de las refinerías. Aproximadamente 20% de los hidrocarburos que se encuentran en el aire son artificiales; de esta cantidad, 75% proviene de los vehículos y 25% de las actividades industriales. Por otra parte, son los mayores contribuyentes del olor característico del diesel.

Los hidrocarburos tienen un efecto negativo en el ambiente, es un elemento importante del smog, además causan irritación de membranas de la mucosa en ojos, nariz y boca y sensación de ahogo.

1.3.3 HIDROCARBUROS AROMÁTICOS POLICÍCLICOS (PAH)

Los hidrocarburos aromáticos polinucleares (PAH) son hidrocarburos con dos o más anillos de benceno. Muchos compuestos de esta clase son conocidos

como cancerígenos humanos. Los PAH en el escape diesel están divididos entre fases gaseosa y particulada. Los compuestos más nocivos de cuatro y cinco anillos están presentes en la porción orgánica del material particulado diesel (FOS).

Los hidrocarburos aromáticos policíclicos tienen efectos cancerígenos, teratogénicos o mutagénicos.

1.3.4 MONOXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono (CO) se produce sobre todo a partir del metano (CH₄) por una reacción química con el oxígeno y los iones hidroxilos (generalmente en los pantanos y otras áreas de generación de metano). Las fuentes artificiales se relacionan con combustiones incompletas (tanto en los motores de los vehículos como en las industrias). El monóxido de carbono (que es inodoro) es muy tóxico para los seres humanos, puede acumularse en el ambiente y causar cefaleas, disnea y letargo, además tiene efectos sobre el sistema cardiovascular, sobre el sistema nervioso central, y es particularmente riesgoso en pacientes con angina o infarto, éste se une irreversiblemente a la hemoglobina y disminuye su capacidad para transportar oxígeno a los tejidos, por lo que afecta directamente la capacidad de trabajo físico e intelectual. También inhibe el sistema enzimático que metaboliza los fármacos, por lo que puede alterar la acción terapéutica de las drogas.

1.3.5 DIÓXIDO DE AZUFRE (SO₂)

El dióxido de azufre (SO₂) se genera por el azufre presente en el combustible, y su concentración depende de la cantidad de azufre presente. Combustibles con bajo contenido de azufre (menor a 0,05 % en peso), se están introduciendo para motores diesel en Estados Unidos y Canadá. El dióxido de azufre es un gas tóxico incoloro, con la característica de emitir un olor irritante. La oxidación del (SO₂) produce trióxido de azufre, precursor del ácido sulfúrico, responsable de las partículas de sulfato en las emisiones diesel. Los óxidos de azufre tienen un profundo impacto en el medio ambiente es la mayor causa de la lluvia ácida, en la salud de las personas provoca irritación de las vías respiratorias pudiendo generar cuadros crónicos de asma, bronquitis y enfisemas.

1.3.6 DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

Es un gas producido por fuentes naturales, como la respiración celular, la degradación orgánica, los volcanes, los incendios naturales, la disolución natural de los carbonatos, etc. Las fuentes artificiales incluyen los incendios artificiales, la combustión industrial y la vehicular. Se elimina a través de la fotosíntesis, la precipitación química y orgánica de carbonatos y el enterramiento de la materia orgánica.

En términos estrictos, el CO₂ no debería ser considerado un contaminante, pero su producción excesiva a partir de procesos artificiales sin eliminación compensatoria puede aumentar su concentración (fenómeno que de hecho está sucediendo) más allá de sus límites naturales, produciendo un efecto de invernadero global.

1.3.7 MATERIAL PARTICULADO (PM)

El material particulado (PM) es un complejo agregado de materiales sólidos y líquidos. Su origen son partículas carbonadas, generadas en el cilindro del motor durante la combustión. Durante el proceso de combustión se forman moléculas de carbón (Partículas primarias), estas se combinan entre sí formando cadenas más grandes las cuales constituyen el hollín, el cual al salir por el tubo de escape absorbe otros contaminantes tales como, HC, sulfatos, etc., y constituyen las partículas en suspensión, las cuales si son menores que 0.5 µm pueden ser absorbidas por los seres humanos ocasionando daños en los pulmones. Partículas mayores a 2 µm son menos dañinas, pero afectan el tracto respiratorio. Éstas se refieren principalmente a los motores diesel.

Las partículas finas pueden ser aspiradas, entrando así a los pulmones. Las células del sistema se demoran meses o años para eliminar estas partículas del cuerpo. Algunas partículas no se eliminan y se acumulan en los pulmones y ganglios linfáticos. Personas con asma, enfermedades del corazón, y enfisema pueden empeorar su condición si se exponen a emisiones de diesel. Una exposición a largo plazo puede causar enfermedades pulmonares crónicas, cáncer al pulmón y también la muerte.

1.4 IMPACTOS DE LAS EMISIONES DE LOS MOTORES DIESEL

El concepto contaminante atmosférico designa cualquier sustancia que, alterando el equilibrio y composición natural del aire, pueda causar o contribuir a:

- a. Aumentar la mortalidad;
- b. Incrementar la morbilidad de patologías moderadas a graves; y
- c. Presentar un riesgo actual o potencial para la salud humana.

No todos los vehículos expulsan los contaminantes en las mismas proporciones; éstas dependerán del tipo de vehículo, combustible usado, de la tecnología del motor de combustión y del equipo de control de emisiones entre otros.

Los principales contaminantes emitidos por los vehículos con motor diesel (camiones y buses, entre otros) son las partículas sólidas en forma de hollín que dan lugar a los humos negros, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso procedente del azufre contenido en el combustible, así como material particulado. Este fenómeno es notorio en países en vías de desarrollo, donde es común encontrar motores viejos, con mal mantenimiento, y combustibles que están fuera de las normas y recomendaciones internacionales, básicamente en el contenido de azufre.

La composición de las emisiones diesel son similares cualitativamente a las producidas por los motores de gasolina, pero presentan diferencias cuantitativas importantes. Los Motores Diesel ligeros emiten 50-80 veces más partículas que los homólogos de gasolina, y los pesados de 100-200 veces más, aunque las diferencias van disminuyendo con los nuevos modelos.

1.4.1 SALUD

La emisiones del motor de diesel contienen mas de 40 sustancias, que han sido declaradas nocivas, tóxicas, cancerígenas, o probablemente cancerígenas por varias agencias como la Environmental Protection Agency (EPA) de los EEUU, la Air Resources Board de California (CARB) y International Agency for Research on Cancer (IARC).

Las emisiones diesel ocasionan diversas patologías respiratorias de las vías altas y bajas, desencadenan crisis asmáticas, ocasionan ausentismo escolar y laboral, y están catalogadas como probablemente cancerígenas para los humanos. Por las tendencias sociales modernas la mayoría de la población pediátrica utiliza diariamente transporte escolar con autobuses diesel, aumentando considerablemente el tiempo de exposición a las emisiones diesel.

Aunque no se han realizado estudios epidemiológicos para evaluar el impacto de las emisiones diesel en la población pediátrica, existe una preocupación creciente por sus consecuencias a corto, medio y largo plazos; para disminuir la contaminación atmosférica urbana y sus efectos nocivos en la salud se deberían sustituir los combustibles fósiles de los vehículos de locomoción por alternativas energéticas menos contaminantes, principalmente para el transporte escolar e intraurbano.

La población más susceptible la conforman niños y ancianos, que responden de manera más documentada a la exposición al material particulado que los adultos. Como resultado de los numerosos factores que intervienen se hace difícil establecer relaciones claras entre factores individuales y la exposición a material particulado de forma individual.

En las tablas 1.2, 1.3 y 1.4 están descritas las principales sustancias contaminantes con su vida media y sus efectos biológicos. Las principales sustancias de las emisiones diesel se presentan en la tabla 1.4 y se hallan catalogadas la mayoría de ellas como contaminantes atmosféricos con diversos efectos tóxicos, mutágenos y cancerígenos.

Tabla 12. Principales compuestos gaseosos de las emisiones diesel, producto de su transformación atmosférica y efectos biológicos¹⁴

COMPUESTO	PRODUCTO REACCIÓN ATMOSFÉRICA	IMPACTO BIOLÓGICO
CO ₂ (dióxido de carbono)	–	Cambio climático Global.
CO (monóxido de carbono)	–	Bloqueo oxigenación

¹⁴ Estudio sobre efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana causado por las emisiones de gases de combustión. Realizada por los Miembros del Grupo de Trabajo de Salud Medioambiental de la Sociedad Valenciana de Pediatría

NO _x (óxidos de nitrógeno)	Ácido nítrico, ozono troposférico	Lluvia ácida y toxicidad respiratoria
SO ₂ (dióxido de azufre)	Ácido sulfúrico	Lluvia ácida e irritación respiratoria
Alkanos y Alkenos	Aldehidos, alquilnitros, cetonas	Irritación respiratoria, mutágenos y carcinógenos
Formaldehido	CO, radicales hidroperóxidos	Carcinógenos y precursores del ozono
Aldehidos	Nitros peroxiacéticos	Irritaciones conjuntival y respiratoria
Compuestos monocíclicos aromáticos	Derivados hidroxilados y nitro-hidroxilados	Tóxicos, cancerígenos y mutágenos
Hidrocarburos policíclicos aromáticos	Nitro-hidrocarburos policíclicos aromáticos	Mutágenos y cancerígenos

Tabla 1.3. Vida media atmosférica de la ED después de su transformación con OH, O₃, NO₃ y HO₂.¹⁵

Compuesto	OH	O ₃	NO ₃	HO ₂
NO ₂	1,3 d	12 h	24 m	2 h
HNO ₃	110 d	–	–	–
SO ₂	16 d	> 200 a	> 14.000 a	> 600 a
Propano	12 d	> 7000 a	–	–
n-Butano	5,6 d	> 4.500 a	3,6 a	–
Etileno	1,9 d	9 d	1,2 a	–
Propileno	7 h	1,5 d	6 d	–
Formaldehido	1,9 d	104 a	84 d	23 d
Acetaldehido	0,6 d	> 7 a	20 d	
Acroleína	0,6 d	60 d	–	–
Ácido fórmico	31 d	–	–	–
Benceno	11 d	600 a	> 6,4 a	–
Tolueno	2,5 d	300 a	3,6 a	–
Xileno	7 h	75 a	0,8 a	–

¹⁵ Estudio sobre efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana causado por las emisiones de gases de combustión. Realizada por los Miembros del Grupo de Trabajo de Salud Medioambiental de la Sociedad Valenciana de Pediatría

Fenol	6 h	–	8 m	–
Naftaleno	6,8 h	> 80 d	1,5 a	–
Fenantreno	11,2 h	41 d	4,6 h	–
Antraceno	8,6 h	–	–	–
Pireno	2,9 h	–	120 d	–

La U.S. EPA ha perfilado objetivos concretos para reducir las emisiones de SO₂, NO_x y partículas generadas por los vehículos de transporte, que tiene estrecha relación con el contenido de azufre en el combustible, se espera lograr una reducción de 500 a 15 ppm (partes por millón) de azufre.

Tabla 1.4. Principales compuestos particulados de las emisiones diesel, productos de sus transformaciones atmosféricas y efectos biológicos¹⁶

COMPUESTO	PRODUCTO REACCIÓN ATMOSFÉRICA	IMPACTO BIOLÓGICO
Carbón elemental	–	El núcleo absorbe compuestos orgánicos que llegan a los alvéolos pulmonares
Sulfato y nitrato inorgánicos	–	Irritación aparato respiratorio
Hidrocarburos (C14–C35)	Aldehidos, alquilnitrosos, cetonas	Irritación aparato respiratorio, mutágeno y carcinógeno
Hidrocarburos policíclicos aromáticos	Derivados nitrosos y nitro-cetonas	Carcinógenos y mutágenos.
Nitro–hidrocarburos policíclicos aromáticos	Derivados nitrohidroxilados	Potente carcinógeno y mutágeno

1.4.2 IMPACTO AMBIENTAL

Cabe destacar que la geografía y el clima de una ciudad son factores determinantes en relación a la concentración del contaminante en el aire, y el

¹⁶ Estudio sobre efectos de la contaminación atmosférica en la salud humana causado por las emisiones de gases de combustión. Realizada por los Miembros del Grupo de Trabajo de Salud Medioambiental de la Sociedad Valenciana de Pediatría

tiempo de exposición al que son sometidas las formas de vida que allí habitan. En el caso del DMQ, la contaminación tiene mucho que ver con su ubicación, rodeada por montañas, por lo que la circulación de los vientos es restringida y, por tanto, la renovación del aire.

Los gases contaminantes provocan reacciones al medio ambiente, como:

- NO_x y SO_2 , provoca lluvia ácida con daños a los bosques, sistemas acuáticos, corrosión de metales, daños a edificios y monumentos. También contamina las aguas subterráneas;
- CO_2 , colabora en el efecto invernadero, así como el CH_4 (Metano), CO y NO_x son otros gases con un impacto directo o indirecto sobre el efecto invernadero.
- Las partículas en suspensión en el aire interfieren la transmisión de la luz dentro de la atmósfera. Lo que produce una degradación de la visibilidad que se manifiesta por una reducción de la distancia a la que se puede ver una imagen con el adecuado contraste y color.

1.5 COMBUSTIBLE DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

Actualmente en el Ecuador se producen tres tipos de Diesel, que son:

- **Diesel 1**, es un combustible utilizado en máquinas que requieren cambios frecuentes de velocidad y carga, así como también para usos domésticos.
- **Diesel 2**, es el combustible utilizado para uso industrial y para motores de combustión interna de autoignición, excepto para uso automotriz.
- **Diesel 2 de bajo contenido de azufre**, es el combustible utilizado para uso industrial y para motores de combustión interna de autoignición que requieren de bajo contenido de azufre y alta velocidad. Este diesel responde a la Ordenanza Metropolitana 0119.

Tabla 1.5. Requisitos del diesel 1

REQUISITO	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO	METODO DE ENSAYO.
-----------	--------	--------	--------	-------------------

P. de inflamación	°C	40	-	NTE INEN 1047
Agua y sedimento	% en V	-	0.05	NTE INEN 1494
Residuo de carbono sobre el 10% del residuo de la destilación	% en Peso	-	0.15	NTE INEN 1491
Cenizas	% en Peso	-	0.01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C		288	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 37.8%	CST	1.3	3.0	NTE INEN 810
Azufre	% en Peso	-	0.30	NTE INEN 1490
Corrosión a la lamina de cobre	-	-	No 2	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	40	-	NTE INEN 1495

Fuente: Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:89 Productos Derivados del Petróleo. Diesel Requisitos.

Tabla 1.6. Requisitos del diesel 2.

REQUISITO	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO	METODO DE ENSAYO.
P. de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1047
Agua y sedimento	% en V	-	0.05	NTE INEN 1494
Residuo de carbono sobre el 10% del residuo de la destilación	% en Peso	-	0.15	NTE INEN 1491
Cenizas	% en Peso		0.01	NTE INEN 1492
Punto inicial de destilación	°C	180	-	NTE INEN 926
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 37.8%	CST	2.5	6,0	NTE INEN 810
Azufre	% en Peso	-	0.70	NTE INEN 1490
Corrosión a la lamina de cobre	-	-	No 3	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	45	-	NTE INEN 1495

Fuente: Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:89 Productos Derivados del Petróleo. Diesel Requisitos.

Tabla 1.7. Requisitos del diesel 2 de bajo contenido de Azufre para uso automotriz.

REQUISITO	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO	METODO DE ENSAYO.
P. de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1047
Agua y sedimento	% en V	-	0.05	NTE INEN 1494
Residuo de carbono sobre el 10% del residuo de la destilación	% en Peso	-	0.15	NTE INEN 1491
Cenizas	% en Peso		0.01	NTE INEN 1492
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 37.8%	CST	2.5	6.0	NTE INEN 810
Azufre	% en Peso	-	0.05	NTE INEN 1490

				ASTMD 4294
Corrosión a la lamina de cobre	-	-	No 3	NTE INEN 927
Índice de cetano calculado	-	50	-	NTE INEN 1495

Fuente: Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:89 Productos Derivados del Petróleo. Diesel

Requisitos.

La búsqueda de la reducción de las emisiones contaminantes producidas por los motores diesel, ha dado como resultado diversas alternativas entre las cuales se encuentra un combustible con bajo contenido de azufre, dispositivos post combustión y tecnologías nuevas. El contenido de azufre en el diesel no sólo destruye los sistemas de control de emisiones, sino que al unirse con el agua forma ácido sulfúrico, lo que provoca la lluvia ácida, la misma que daña las plantas y los bienes materiales.

La reducción del límite de azufre en el diesel es una tendencia mundial, por esta razón, el diesel expendido en el DMQ por Ordenanza Metropolitana 0119 no puede contener más de 500 ppm en peso de azufre, siendo este de mejor calidad en comparación al que se expende en otras ciudades del país.

En el Departamento de Petróleos, Energía y Contaminación, de la Universidad Central del Ecuador, se realizan pruebas para determinar la cantidad de azufre en el diesel. Como se puede notar en la figura 1.4 el diesel que se distribuye en el DMQ ha cumplido con la exigencia de la ordenanza antes mencionada.

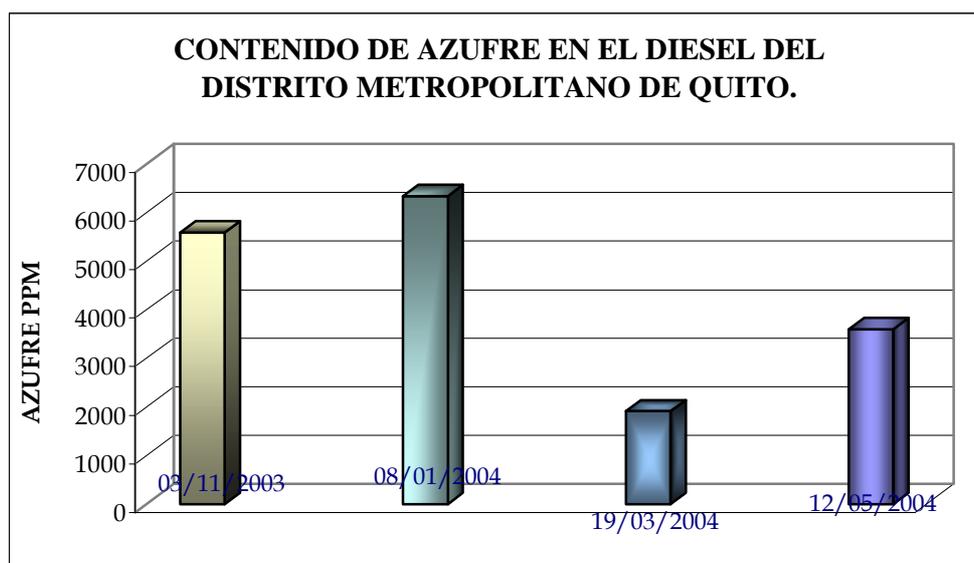


Figura 1.4 contenido de azufre del diesel del Distrito Metropolitano de Quito, hasta mayo de 2004.

Es importante destacar que las nuevas tecnologías, tanto en motor a gasolina como a diesel se requiere un nivel máximo de azufre de 30 ppm en peso. La tendencia mundial es la disminución de la cantidad de azufre en los combustibles, por esta razón se han creado programas, la European Auto Oil tiene previsto reducir el azufre en el combustible de 500 ppm a 30 ppm en peso, dando como resultado una reducción en las emisiones de PM de un 7% en vehículos livianos y un 4% en vehículos pesados.¹⁷

¹⁷ <http://www.epa.gov/ttn/catc/cica/cicaspa.html>

CAPITULO II

PARQUE AUTOMOTOR DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

2.1 ESTRUCTURA DEL PARQUE AUTOMOTOR URBANO DEL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

“El problema del transporte en el Distrito Metropolitano de Quito tiende a agravarse como consecuencia del incremento de la población, del número de desplazamientos personales, el aumento de las distancias entre las áreas residenciales y las zonas de concentración del empleo y comercio y, el incremento del parque automotor, frente a un limitado crecimiento de la capacidad vial y de la oferta de transporte público”.

El sistema de transporte está ligado íntimamente a las estrategias referentes a vialidad, cambios en los recorridos o modalidades de transporte, su mantenimiento y rentabilidad.

La revisión mecánica y de emisiones es un requisito para la circulación vehicular en el Distrito Metropolitano de Quito, es imprescindible controlar las condiciones de seguridad en que se brinda el servicio de transporte público.

2.1.1 LA DEMANDA DEL TRANSPORTE PÚBLICO URBANO

La UPGT determinó que el 82 % de los viajes diarios en la ciudad de Quito se realizan en transporte público, evidenciando el alto grado de dependencia de la población por este sistema de transporte.

Los desplazamientos realizados en buses públicos y en el trolebús hacia la zona central de Quito, muestra que de los 1.621.090 desplazamientos realizados por el transporte público, 865.337 viajes se realizan hacia y dentro de la zona central (desde el centro histórico hasta el Labrador), 408.092 viajes tienen su origen fuera de la zona central, y 321.818 tienen su origen y destino dentro de la misma zona central. Las zonas de mayor concentración para los destinos de los viajes se ilustran en la tabla siguiente.

Tabla 2.1. Principales zonas de circulación del Servicio de Transporte Público.¹⁸

ZONA	VIAJES	PORCENTAJE %
Centro histórico	45.903	2.83
Universidad Central – Santa Clara	79.205	4.89
San Marcos – Plaza Marín	61.939	3.82
La mariscal	78.480	4.84
Batan – 6 de diciembre – Eloy Alfaro – Ofelia	57.959	3.58
Laureles – el Inca	51.286	3.16
El Pintado – la Magdalena	41.246	2.54
San Bartolo – Recreo - Ferroviaria	43.134	2.66
Chillogallo – San Rosa – San Luis	42.346	2.61
Alameda – Ejido – Congreso	46.218	2.85
TOTAL	647.716	33.79

FUENTE.- Estudio de Oferta y Demanda del Trole Quito – UPGT, marzo 2001.

El incremento en la demanda de transporte público generado por el crecimiento de la población, se encuentra soportado por el sistema del Trole bus que actualmente transporta 17% de la población que circula en el DMQ. El resto de la cobertura, esto es el 83% de los viajes, son atendidos por los servicios de transporte público de pasajeros operados por el sector privado organizado en Cooperativas y Empresas.

Los operadores privados se encuentran agrupados en 28 cooperativas con 1.228 unidades (49% del total), en 27 empresas con 1.205 unidades (48%). Esto representa un promedio de 45 unidades por cada organización.

El parque automotor diesel de transporte público urbano en el DMQ puede clasificarse en tres grandes grupos:

1. Sistema Metrobus-Q que recorren la ciudad longitudinalmente de Norte a Sur, el Trolebús (corredor central), Corredor Central Norte y la Ecovía (corredor oriental).

¹⁸ Datos tomados del PLAN MAESTRO DE TRANSPORTE, Quito mayo 2002.

- a. Trolebús, circulan 113 unidades tipo bus articulado.
 - b. Corredor Central Norte, actualmente circulan por él 56 unidades tipo bus articulado, aunque en la plenitud de ejecución del proyecto se tendrán 84.
 - c. Corredor Ecovía, actualmente circulan por él 42 unidades tipo bus articulado.
2. Las unidades conocidas como buses alimentadores.
 3. Las unidades particulares de transporte urbano, cuyos propietarios se agrupan en diferentes cooperativas y que reciben su permiso de operación y renovación semestral por parte de la EMSAT.

2.1.2 PROYECCIÓN DEL PARQUE AUTOMOTOR EN EL DMQ

Las estadísticas de la evolución del parque vehicular de Quito muestran tasas de crecimiento (5.4% anual) notoriamente superiores a la tasa de crecimiento de la población (2% anual) en los últimos años.

El parque automotor urbano está clasificado según el tipo de servicio que prestan. El parque automotor debe cumplir con características tales como:

- Tener un número apropiado de vehículos con características que mejor se adapten al servicio para el cual fueron destinados.
- Optimización en el mantenimiento de las unidades, de este modo se logrará que las unidades presten su servicio en buenas condiciones, disminuyendo accidentes, así como la emanación de gases contaminantes.
- Políticas claras para la renovación de unidades lo que implica que se debe buscar la edad mas adecuada según el tipo de actividad que realiza.

Con datos proporcionados por la EMSAT se determina la constitución del parque automotor de servicio de transporte urbano existente en el DMQ, este sector consta aproximadamente con 2495 buses los cuales se distribuyen en las diferentes modalidades, la figura 2.1 muestra la dicha distribución.

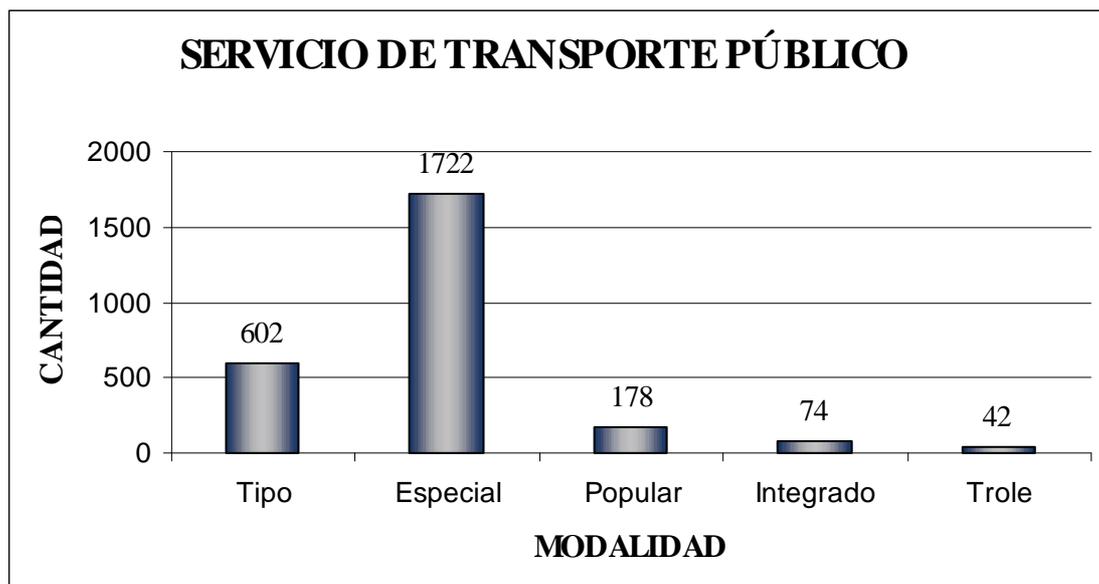


Figura 2.1. Distribución del servicio de transporte público por su modalidad.

La EMSAT y DMT son los organismos reguladores del sistema de transporte público, por lo que mantienen una base de datos de todos los vehículos de transporte urbano que circulan en el distrito. La información que puede recopilarse es amplia y confiable, debido a esto se la resume en las siguientes tablas.

Tabla 2.2 Transporte Urbano a Diesel. Principales marca de motores existentes.

Motor	# unidades	%
Asia	7	0,28
Chevrolet	576	23,09
Cummins	6	0,24
Dimex (Caterpillar)	53	2,12
Dina	9	0,36
Encava	2	0,08
Ford	62	2,48
Hino	716	28,70
Hyundai	49	1,96
Internacional	45	1,80
Mercedes Benz	482	19,32
MWM	3	0,12
Nissan	122	4,89
Null	97	3,89
Scania	15	0,60
Volkswagen	184	7,37
Volvo	67	2,69

Motor	# unidades	%
Total	2495	100,00

FUENTE.- Empresa Metropolitana de Transporte, abril 2005.

Tabla 2.3 Vehículos de Transporte Urbano, año-modelo

Modelo	# Unidades	%
Vehículos 2005	48	1,9
Vehículos 2004	317	12,7
Vehículos 2003	283	11,3
Vehículos 2002	336	13,5
Vehículos 2001	229	9,2
Vehículos 2000	5	0,2
Vehículos 1999	125	5,0
Vehículos 1998	323	13,0
Vehículos 1997	164	6,6
Vehículos 1996	118	4,7
Vehículos 1995	337	13,5
Vehículos 1994	121	4,9
Vehículos 1993	19	0,8
Vehículos 1992	20	0,8
Vehículos 1991	18	0,7
Vehículos 1990	6	0,2
Vehículos 1989	8	0,3
Vehículos 1988	8	0,3
Vehículos 1987	4	0,2
Vehículos 1986	3	0,1
Vehículos 1985	2	0,1
Total	2495	100,0

FUENTE.- Empresa Metropolitana de Transporte, abril 2005.

Bolívar y Eloy Alfaro, y al centro la Av. 10 de Agosto con su prolongación al norte por la Av. Galo Plaza y al sur por la Av. Maldonado.

Como se puede observar las rutas de transporte público de Quito, presenta una alta concentración en los principales corredores, lo que provoca congestión, bajas velocidades con el consiguiente incremento de los costos operacionales, pérdida del tiempo productivo y la reducción de capacidad del sistema de transporte público.

Tabla 2.4. Evolución Red vial urbana 1760 – 2001

AÑO	LONGITUD TOTAL RED VIAL URBANA (km)	CRECIMIENTO URBANO (ha)
1760	45	236
1888	61	319
1921	131	675
1946	325	1625
1956	555	3168
1971	893	5056
1983	1894	11357
1987	2498	14926
2001	3113	19950

Fuente: Departamento de Sistemas UPGT. 31 de sep. 2001

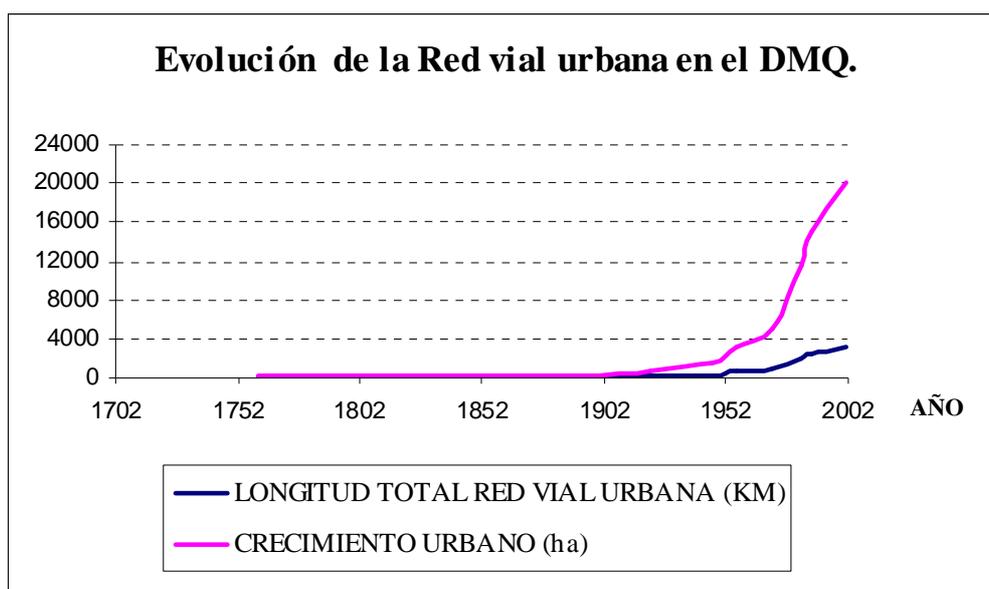


Figura 2.3 Evolución Red vial urbana en el DMQ. 1760 – 2001

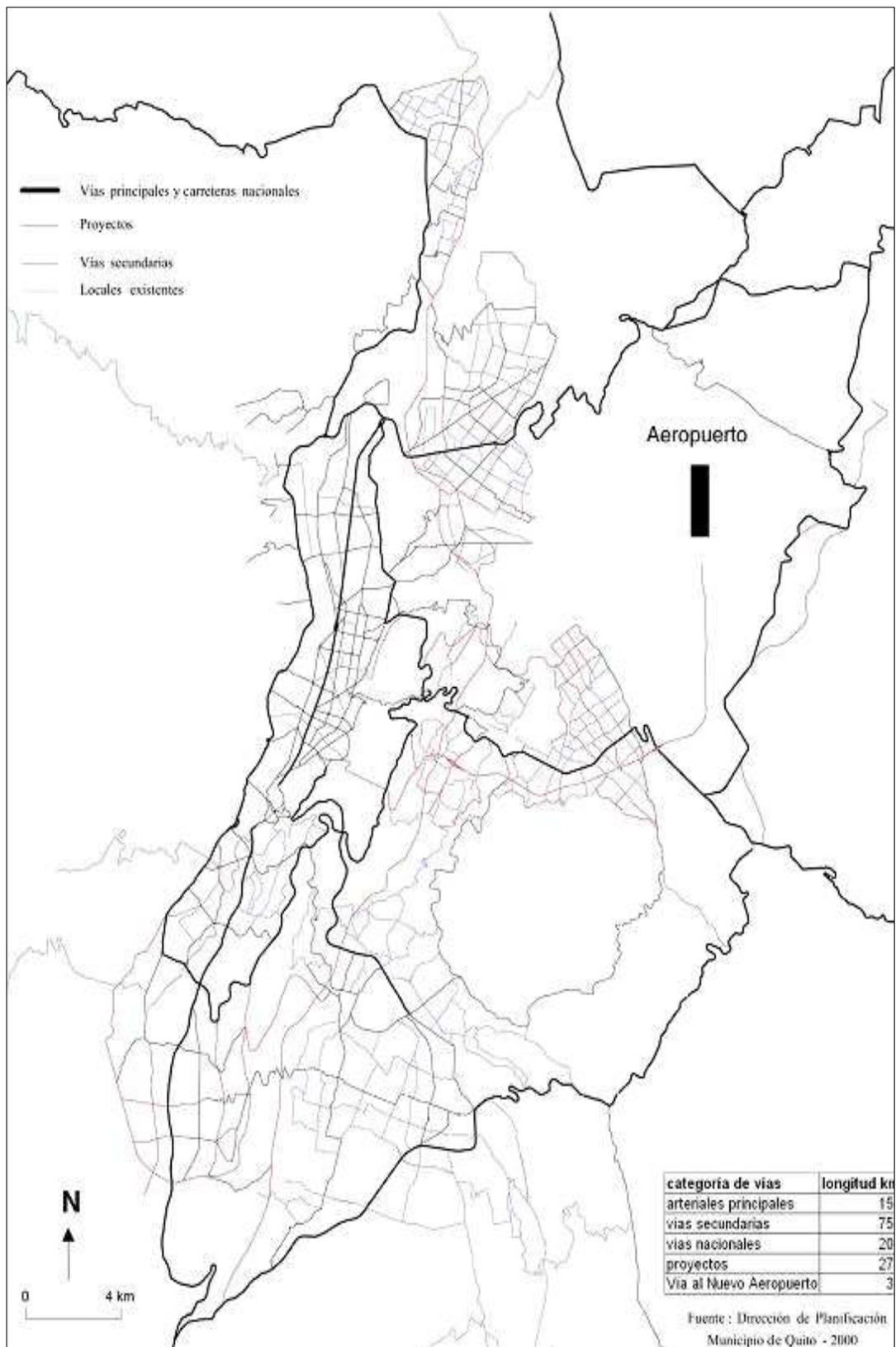


Figura 2.4 Red Vial actual del DMQ.

La reestructuración de la red vial busca superar los actuales problemas de accesibilidad al interior de las áreas centrales de la ciudad; en la relación centro-periferia; y, entre las áreas periféricas. Se trata de proveer de una estructura vial que sustente el sistema de circulación metropolitana (movilidad), que articule las diversas zonas y localizaciones de la demanda y provea un adecuado nivel de servicio.

2.3 NORMALIZACIÓN Y REGLAMENTACIÓN PARA EL TRANSPORTE URBANO

El objetivo de las Normas y Reglamentos es establecer los requisitos y características técnicas orientadas a la protección de los usuarios del transporte y del tránsito terrestre, del medio ambiente y el resguardo de la infraestructura vial, así como establecer los procedimientos administrativos que deben cumplir los vehículos para ingresar, registrarse, circular, operar y salir del Sistema Nacional de Transporte Terrestre.

2.3.1 NORMAS

Los vehículos destinados al transporte de personas dentro del Distrito Metropolitano de Quito por disposición municipal deben cumplir con normas ambientales y requisitos técnicos vehiculares.

Entre las normas a cumplir se destacan:

- ❖ **NTE-INEN 2205:99**, requisitos bus urbano
- ❖ **NTE-INEN 2204:98**, límites permitidos de emisión de fuentes móviles terrestres a gasolina.
- ❖ **NTE-INEN 2207:98**, límites permitidos de emisión de fuentes móviles terrestres a diesel.
- ❖ **NTE-INEN 1489:99-4R**, diesel requisitos
- ❖ **ISO 1585: 1992** “Road Vehicules – Engine Test Code – Net Power”.
- ❖ **NORMA EURO II**

Debido a las exigencias en cuanto a la emisión de contaminantes de procedencia vehicular, el cumplimiento de las normas descritas es indispensable.

Se establece que los vehículos del año 2000 en adelante deben contar con sistemas de control de gases contaminantes.

2.3.1.1 Norma NTE – INEN 2205:99.”Requisitos del Bus Urbano”

Establece las características técnicas necesarias en la estructura de motor, chasis y carrocería que permitan una operación eficiente para la ciudad de Quito. Así como la distribución tanto interna como externa que permitan un adecuado nivel de servicio y seguridad para el usuario.

Aspectos de los buses urbanos.

La norma enfoca seis aspectos fundamentales de los vehículos, que son:

- El motor
- El chasis
- La carrocería
- Distribución externa y acabados
- Distribución interna y acabados
- Detalles exteriores e interiores y
- Elementos de seguridad y control operacional

En cada uno de estos aspectos se establecen elementos obligatorios, características de mayor importancia y parámetros máximos y mínimos definidos por su función y ubicación; así como sugerencias para la mejor selección del vehículo.

2.3.1.2 NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2204:98. “GESTIÓN AMBIENTAL, AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE GASOLINA.”

I. OBJETO

I.1. Esta norma establece los límites permitidos de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres (vehículos automotores) de gasolina.

II. ALCANCE

II.1. Esta norma se aplica a las fuentes móviles terrestres de más de tres ruedas.

II.2. Esta norma no se aplica a las fuentes móviles que utilicen combustibles diferentes a gasolina.

III.3. Esta norma no se aplica a motores de pistón libre, motores fijos, motores náuticos, motores para tracción sobre rieles, motores para aeronaves, motores para tractores agrícolas, maquinarias y equipos para uso en construcciones y aplicaciones industriales.

III. REQUISITOS

III.1. Límites máximas de emisiones permitidos para fuentes móviles con motores de gasolina. Marcha mínima o ralentí (prueba estática).

III.2. Toda fuente móvil con motor de gasolina durante su funcionamiento con condición de marcha mínima o ralentí y temperatura normal de operación, no debe emitir al aire monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) en cantidades superiores a las señaladas en la siguiente tabla.

AÑO MODELO	% CO*		ppm HC*	
	0 – 1500	1500 – 3000	0 – 1500	1500 – 3000
2000 y posteriores	1.0	1.0	200	200
1990 a 1999	3.5	4.5	650	750
1989 y anteriores	5.5	6.5	1000	1200

* Volumen

** Altitud: metros sobre el nivel del mar

2.3.1.3 NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2207:2002. “GESTIÓN AMBIENTAL, AIRE. VEHÍCULOS AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE DIESEL.”

I. OBJETO

I.1. Esta norma establece los límites permitidos de emisiones de contaminantes producidas por fuentes móviles terrestres (vehículos automotores) de diesel.

II. ALCANCE

II.1. Esta norma se aplica a las fuentes móviles terrestres de más de tres ruedas.

II.2. Esta norma no se aplica a las fuentes móviles que utilicen combustibles diferentes a diesel.

III.3. Esta norma no se aplica a motores de pistón libre, motores fijos, motores náuticos, motores para tracción sobre rieles, motores para aeronaves, motores para tractores agrícolas, maquinarias y equipos para uso en construcciones y aplicaciones industriales.

III. REQUISITOS

III.1. Requisitos máximos de opacidad de humos para fuentes móviles de diesel. Prueba de aceleración libre.

III.2. Toda fuente móvil con motor de diesel, condiciones de aceleración libre, no podrá descargar al aire humos en cantidades superiores a las indicadas en la siguiente tabla.

AÑO MODELO	% Opacidad
2000 y posteriores	50
1989 y anteriores	60

2.3.1.4 ISO 1585: 1992 “ROAD VEHICLES – ENGINE TEST CODE – NET POWER”

“Los vehículos de camino - código de prueba del motor - producen potencia neta”. Se aplica a los motores de pistón rotatorio y a intercambiar los motores de combustión interna excepto de los motores de pistón libres para los coches de pasajeros y otros vehículos de motor, excepto las motocicletas, ciclomotores y tractores agrícolas, viajando normalmente en los caminos.

Especifica un método de prueba para evaluar su funcionamiento con una visión, en detalle, a presentar curvas de la potencia y de consumo de combustible específica con carga completa en función de velocidad del motor.²⁰

2.3.1.5 NORMA EURO II (NORMAS DE EMISIONES)

La presente norma tiene como objetivo principal el preservar la salud de las personas, la calidad del aire ambiente, el bienestar de los ecosistemas y del ambiente en general. Para cumplir con este objetivo, esta norma establece los límites máximos permisibles de contaminantes en el aire. También provee los métodos y procedimientos destinados a la determinación de las concentraciones de contaminantes en el aire ambiente.

Las normas Euro I y II se crean para regular las emisiones vehiculares en términos de peso de los contaminantes como CO, los hidrocarburos, NO_x y material particulado (PM). Se definen niveles para las diferentes categorías de vehículos ya sean estos a gasolina o diesel, definiéndose los niveles superiores fijos para dichas categorías.

Los fabricantes de automotores se ven en la obligación de adaptar su producto final a las normas ambientales establecidas, tales como las normas EPA y EURO, cada vez estas se vuelven mas severas, un ejemplo son las normas Euro III y IV. Estas normas exigen niveles de emisión más bajos, tanto en lo referente a Material Particulado (PM) como a Óxidos de Nitrógeno (NO_x), la

²⁰<http://www.iso.org/iso/en/stdsdevelopment/tc/tclist/TechnicalCommitteeStandardsListPage.TechnicalCommitteeStandardsList>

implantación de estas normas se traduce en una disminución de un 30% de las emisiones de estos contaminantes, respecto a la norma actual.

En cuanto a la calidad de combustible, las compañías de petróleo están en la obligación de mejorar la calidad de combustible. La aplicación de estas normas, en el caso de los vehículos equipados con motores diesel, será técnicamente posible con el uso un combustible con un bajo contenido de azufre, para los vehículos equipados con motores a gasolina se requiere un combustible bajo en contenido de plomo.

Del punto de vista actual, los límites de Euro IV de los motores Diesel dependiendo de la categoría, serán más difíciles de cumplir y requerirán un tratamiento posterior de las emisiones (NO_x, PM) para poder cumplir con las exigencias establecidas. Estos deberán utilizar principalmente, catalizadores para disminuir o reducir los NO_x, los que también serán tomados en cuenta para motores de inyección de gasolina, para lo cual será necesaria la producción de combustibles con valores máximos de 50 ppm de azufre. Los fabricantes de vehículos, reclaman combustibles con un valor máximo 5 ppm de azufre. Las tablas que a continuación se presentan permiten determinar los límites de contaminantes según la Comunidad Europea (CE).

Tabla 2.5. Límites de emisiones para vehículos livianos. Capacidad < 2.5 Ton ó ≤ 6 Personas.

1.5.1.1.1.1.1 Vehículo de pasajero < 2.5 ton. o ≤ 6 personas							
Norma	Fecha	Tipo de motor	CO (g/km)	HC + NO _x (g/km)	HC (g/km)	NO _x (g/km)	PM (g/km)
EURO II Directiva 94/12/CE	96/97	Otto	2.2	0.5	----	----	----
		Diesel	1.0	0.7	----	----	0.08
		DI-Diesel	1.0	0.9	----	----	0.10
EURO III Directiva 98/69/Ce	00/01	Otto	2.3	---	0.2	0.15	----
		Diesel	0.64	0.56	----	0.50	0.05
EURO IV Directiva 98/69/ CE	05/06	Otto	1.0	----	0.10	0.08	---
		Diesel		0.30	----	0.25	0.025

Tabla 2.6. Límites de emisiones para vehículos de pasajeros. Capacidad > 2.5 Ton ó > 6 Personas, vehículos de carga < 3.5 Ton.

1.5.1.1.1.1.2 Vehículo de pasajeros > 2.5 t > 6 Personas; Vehículos de carga < 3.5 t								
Categoría	Normas	Fecha	Motor	CO [g/km]	HC+NOx [g/km]	HC [g/km]	NOx [g/km]	PM [g/km]
I ≤ 1305 kg.	EURO II Directiva 94/12/CE	97/98	Otto	2.2	0.5	--	--	--
			Diesel	1.00	0.7 (0.9)	--	--	0.08 (0.10)
	EURO III Directiva 98/69/CE	00/01	Otto	2.3	--	0.20	0.15	--
			Diesel	0.64	0.56	--	0.50	0.05
	EURO IV Directiva 98/69/CE	05/06	Otto	1.0	--	0.10	0.08	--
			Diesel	0.50	0.30	--	0.25	0.025
II ≤ 1760 kg.	EURO II Directiva 94/12/CE	98/99	Otto	4.0	0.6	--	--	--
			Diesel	1.25	1.0 (1.3)	--	--	0.12 (0.14)
	EURO III Directiva 98/69/CE	01/02	Otto	4.17	--	0.25	0.18	--
			Diesel	0.80	0.72	--	0.65	0.07
	EURO IV Directiva 98/69/CE	06/07	Otto	1.81	--	0.13	0.10	--
			Diesel	0.63	0.39	--	0.33	0.04
III > 1760 kg.	EURO II Directiva 94/12/CE	98/99	Otto	5.0	0.7	--	--	--
			Diesel	1.50	1.2 (1.6)	--	--	0.17 (0.20)
	EURO III Directiva 98/69/CE	01/02	Otto	5.22	--	0.29	0.21	--
			Diesel	0.95	0.86	--	0.78	0.10
	EURO IV Directiva 98/69/CE	06/07	Otto	2.27	--	0.16	0.11	--
			Diesel	0.74	0.45	--	0.39	0.06

Valores entre paréntesis: Motores de inyección directa

2.3.2 REGLAMENTOS²¹

EL reglamento es un cuerpo normativo de procedimiento y aplicación de la norma contenida en una ley determinada.

El reglamento a la Ley de Gestión Ambiental, para la Prevención y Control de la Contaminación Ambiental, permite la aplicación que regula la calidad ambiental.

2.3.3 ORDENANZAS PARA EL DMQ

En el Distrito Metropolitano de Quito, se han expedido varias ordenanzas que permiten controlar la contaminación del aire de origen vehicular.

Nº 0076. Ordenanza metropolitana sustitutiva del capítulo IV “para el control de la contaminación vehicular” del título V, del libro II del código municipal.²²

Nº 0093. Ordenanza metropolitana reformativa del capítulo IV “para el control de la contaminación vehicular” del título V, del libro II del código municipal.²³

Nº 0109. La ordenanza que reforma a la ordenanza Nº 0093 reformativa del capítulo IV “para el control de la contaminación vehicular” del título V, del libro II del código municipal.²⁴

Nº 0119. La ordenanza metropolitana que incorpora al código municipal los artículos innumerados a continuación de la sección XI de las ordenanzas Nº 0076 y 0093 relativas a la regulación del azufre en el diesel.²⁵

Nº 0120. La ordenanza metropolitana reformativa del capítulo IV “para el control de la contaminación vehicular” del título V, del libro II del código municipal.²⁶

Nº 0136. Ordenanza metropolitana establece la instalación del sistema de control dinámico de emisiones vehiculares mediante protocolos ASM (acceleration simulation mode), y la realización de la prueba TIS (two idle

²¹ Legislación Ambiental secundaria: Libro VI calidad Ambiental. Pág. 31

²² Registro Oficial Nº 733, Quito 27 de diciembre 2002.

²³ Registro Oficial Nº 154, Quito 25 de Agosto 2003.

²⁴ Registro Oficial Nº 224, Quito 27 de Enero 2004.

²⁵ Registro Oficial Nº 540, Quito 19 de Mayo 2004.

²⁶ Registro Oficial Nº 101, Quito 6 de Julio 2004.

speed), en los Centros de Revisión Técnica Vehicular, que reforma el capítulo IV “para el control de la contaminación vehicular” del título V, del libro II del código municipal.²⁷

²⁷ Registro Oficial N° 734, Quito 2 de Marzo 2005.

CAPITULO III

DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTIÓN

3.1 INTRODUCCIÓN

Siendo el material particulado el contaminante que más secuelas deja en la salud y el medio ambiente, se han diseñado tecnologías para el control y disminución de éste, además se establece la necesidad de usar vehículos con combustibles limpios.

El presente capítulo analiza las tecnologías postcombustión como alternativa de control y reducción del material particulado proveniente de los gases de combustión de los vehículos con motor diesel.

3.2 CONTAMINANTES NOCIVOS PARA LA SALUD Y SUS IMPACTOS

Los motores a diesel constituyen la principal herramienta de trabajo para la actividad en el transporte de pasajeros dentro del Distrito Metropolitano de Quito.

Las emisiones producto de la combustión del diesel son una de las mayores fuentes de contaminación, los compuestos como el material particulado (PM) se pueden depositar en lo profundo de los pulmones provocando una gran cantidad de problemas de tipo respiratorio, así como miles de muertes prematuras cada año; los óxidos de nitrógeno (NO_x), el dióxido de azufre (SO₂) que se encuentran en los gases de escape forman partículas finas nocivas que regresan a la tierra en forma de lluvia ácida, a estos se les asocia la disminución de la función pulmonar en los niños, siendo estos más susceptibles que los adultos a los efectos negativos que ocasiona la contaminación ambiental ya que respiran más rápido y sus pulmones y sistema inmunológico están aún en desarrollo.

Estudios sobre el impacto adverso de las emisiones en la salud, muestran que los efectos tanto a corto como a largo plazo, provocan enfermedades de tipo

cancerígeno. Un conjunto de evidencias demuestran estadísticamente que el contaminante más peligroso es el material particulado de tipo urbano.

3.2.1 MATERIAL PARTICULADO, EFECTOS EN LA SALUD

El "Material Particulado" (PM) es una mezcla compleja de partículas suspendidas en la atmósfera, varían de tamaño y composición, van desde unos pocos nanómetros a decenas de micrómetros, su composición depende del combustible, del lubricante; del motor, su carga y velocidad, se los clasifica en partículas húmedas y partículas secas; las partículas húmedas pueden contener hasta un 60% de hidrocarburos (FOS), mientras que las secas contienen en su mayoría carbón.

Las partículas suspendidas son: material particulado respirable (PM_{10}), partículas finas ($PM_{2,5}$) y ultrafinas ($PM_{1,0}$) proveniente de los gases de combustión del motor a diesel; ceniza del carbón, polvos minerales (por ejemplo, carbón, amianto, piedra caliza, cemento), polvos metálicos y humos (por ejemplo, cinc, cobre, hierro, plomo), neblinas ácidas (por ejemplo, ácido sulfúrico), partículas de fluoruro, pigmentos de pintura, partículas de plaguicidas, carbón negro, humo de petróleo, etcétera. El tamaño de la partícula depende de su mecanismo de formación y composición química.

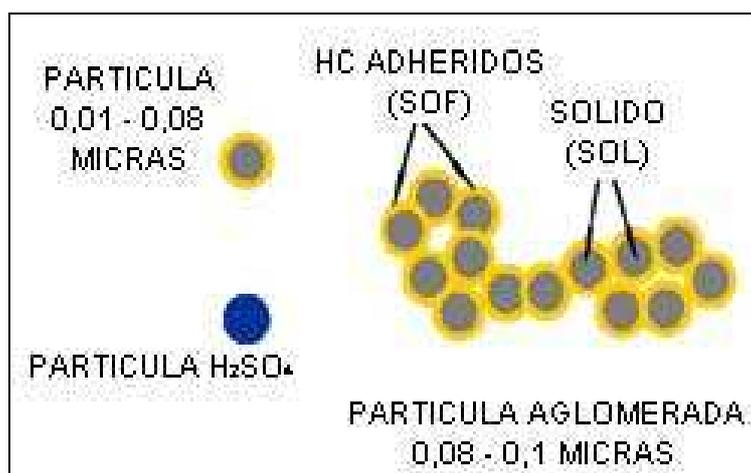


Figura 3.1 Partículas emitidas por el motor Diesel

Entre el 1 al 20% de la masa total particulada son partículas de tamaño ultrafino (0,005-0,05 μ); mientras que aproximadamente entre el 80 al 98 % son de tamaño fino (0,05-1,0 μ), son agregados esféricos primarios constituidos por un

centro de carbono elemental con compuestos orgánicos absorbidos, sulfatos, nitratos y elementos traza. Estas partículas tienen áreas de superficie muy extensas por gramo de masa, siendo excelentes transportadoras de compuestos orgánicos e inorgánicos adheridos o absorbidos, penetrando hasta los bronquiolos y alvéolos pulmonares. El carbono elemental presenta un área de aproximadamente 30 a 90 m²/g, por lo que produce potencial efecto en la salud humana.

Las denominadas partículas ultrafinas (UF), son originadas a través de la nucleación de material precursor volátil como son los hidrocarburos, el ácido sulfúrico, y el vapor de agua y son formadas no en el motor, sino fuera de éste durante el proceso de dilución y enfriamiento de los gases de escape, mediante procesos de nucleación, coagulación y condensación las partículas ultrafinas pueden transformarse en partículas finas.

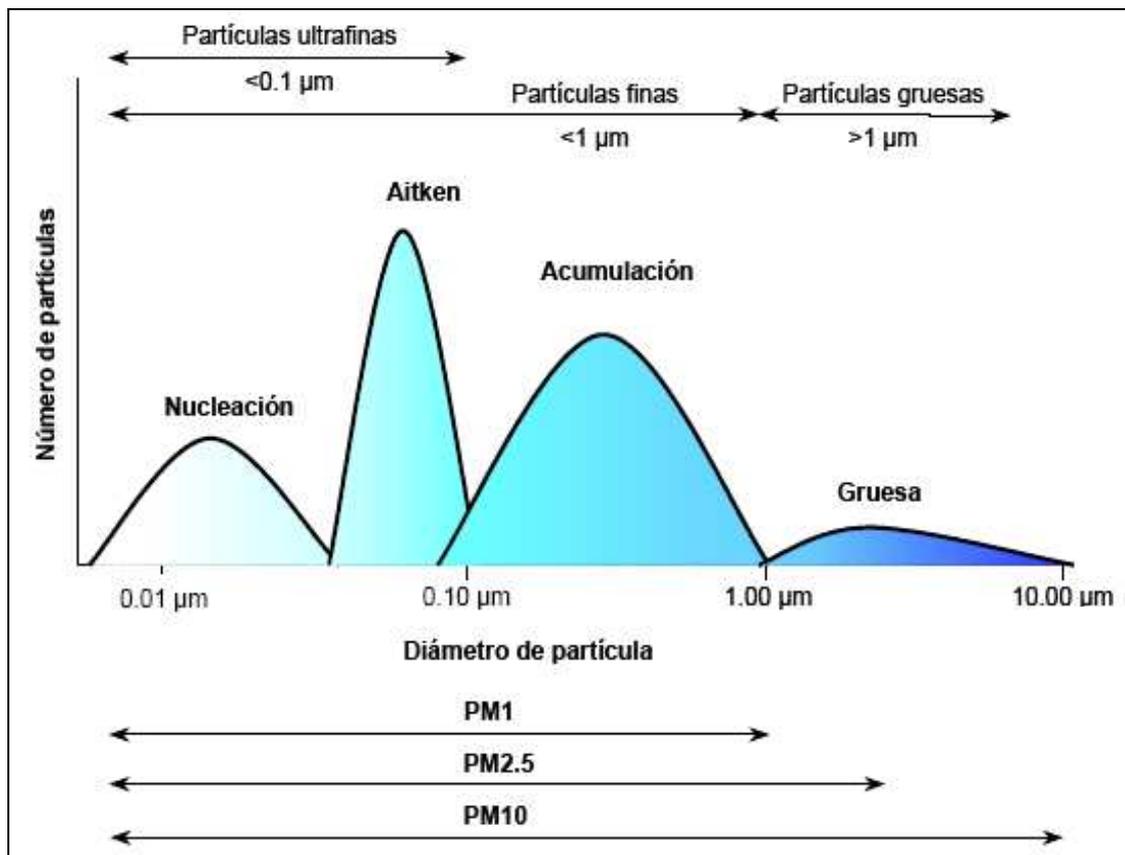


Figura 3.2 Distribución del número de partículas en función del diámetro, modificado de EPA, 1996).

La mayoría de las partículas del diesel son muy finas, con un diámetro entre $0,01\mu$ a $0,08\mu$, considerándose totalmente respirable, es decir, puede ingresar al sistema respiratorio humano sin ninguna dificultad dado su pequeñísimo tamaño, provocando un impacto significativo en la salud humana. En los últimos años, específicamente las emisiones del motor a diesel de PM de tamaño ultrafino ($<0,05\mu$ de diámetro) han levantado la consternación mundial, su presencia en el ambiente causando efectos específicos a la salud, cabe mencionar que se están realizando estudios para determinar sus fuentes emisoras.

Las estadísticas de morbilidad y mortalidad facilitan información sobre lo que ocurre con las condiciones de salud, los resultados se han obtenido principalmente del estudio y seguimiento de las personas profesionalmente expuestas: conductores de camiones, de maquinaria elevadora-transportadora-perforadora, y de otras maquinarias pesadas; mineros; mecánicos; vigilantes de garajes; granjeros y tractoristas; maquinistas ferroviarios y portuarios; empleados de gasolineras; etc. Las exposiciones son fundamentalmente por inhalación, siendo de menor importancia la vía digestiva secundaria a su depósito en los alimentos y finalmente por la absorción transdérmica.

A causa de la contaminación del tráfico, se puede padecer serios daños en el aparato respiratorio, que incluyen el aumento del riesgo de la mortalidad cardiopulmonar y de alguna enfermedad respiratoria, alteración de los lípidos de la mucosa bronquial, asma bronquial, e incluso enfermedades cardiovasculares.

La atención se ha concentrado mayormente en el material particulado de tipo urbano (PM_{10}), ya que pueden ser inhaladas y penetran con facilidad al sistema respiratorio, provocando enfermedades respiratorias e incluso cáncer, además provocan daños en la propiedad privada (por ejemplo, acumulación de suciedad), destrucción de la vida vegetal, también generan molestias como interferir con la luz solar (por ejemplo, difusión de la luz por smog y neblina).

En estudios orientados a las variaciones moderadas en la mortalidad cotidiana relacionada con los contaminantes dentro de las grandes ciudades, han proporcionado datos cuantitativos de los efectos sobre la salud asociados a las

partículas suspendidas, en ciudades de los países occidentales se ha establecido un incremento de $10\text{mg}/\text{m}^3$ en las PM_{10} , a esto se le asocia un incremento diario en la mortalidad entre 0.5 a 1.5%, así como de las muertes por problemas cardiovasculares entre 0.8 a 1.8%, mientras que las muertes por enfermedades respiratorias como cáncer pulmonar van en aumento, se estima que se encuentra entre 1.5 a 3.7%.

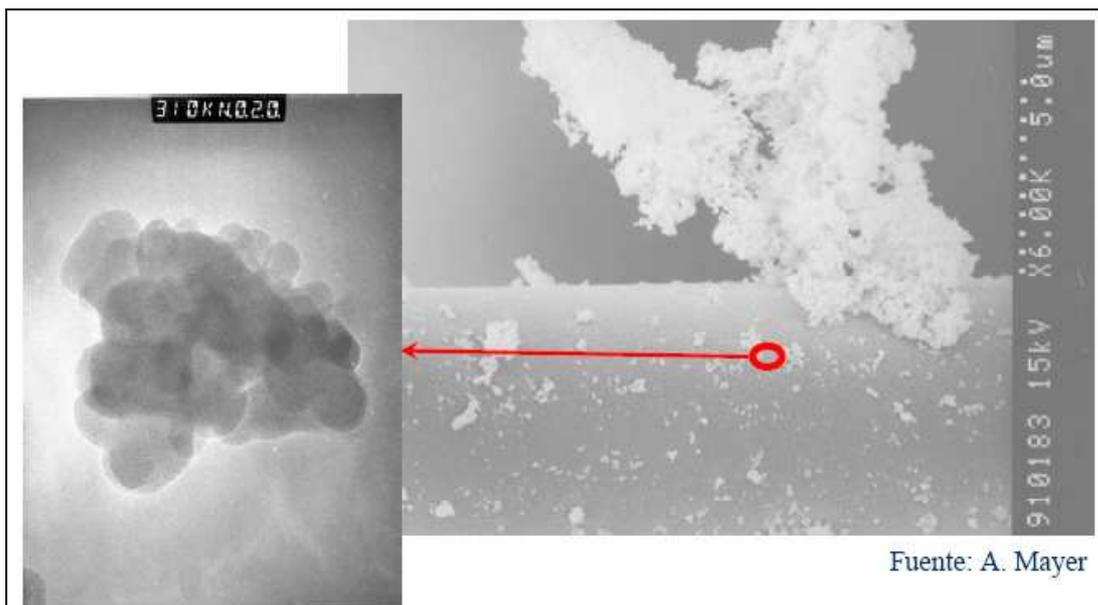


Figura 3.3 material particulado existente en le ambiente (Fuente A. Mayer).

La morbilidad a causa del PM_{10} , se la determina mediante el análisis de las admisiones hospitalarias o de urgencias, así como cambios en la función pulmonar y los síntomas respiratorios. Los estudios de admisiones hospitalarias por enfermedades respiratorias muestran un incremento que va del 1 al 4%, las consultas de urgencia por causas respiratorias van de 1 a 4%, además se observa un incremento en los síntomas asociados al asma producto de la exposición al PM_{10} yendo desde el 1.1% al 11%.

En relación a las partículas finas, los estudios realizados en adultos entre 18 a 65 años se establecen que estas partículas, producen un incremento del 32 % en las enfermedades respiratorias agudas.

Los estudios realizados por las diferentes instituciones, sienta las bases para establecer las consideraciones necesarias para el desarrollo de proyectos tendientes a reducir la emisión de partículas provenientes de los motores

diesel, tales como el determinar si es factible la incorporación de sistemas reductores de emisiones en los automotores en uso, el desarrollar normatividades por las autoridades competentes para que en su caso se vea la conveniencia de que los vehículos nuevos a diesel que se comercialicen en el país cuenten con tecnologías de punta que reduzcan las emisiones de partículas, determinar los efectos de la reformulación de combustible diesel y la incorporación de oxigenantes que reduzcan las emisiones de partículas.

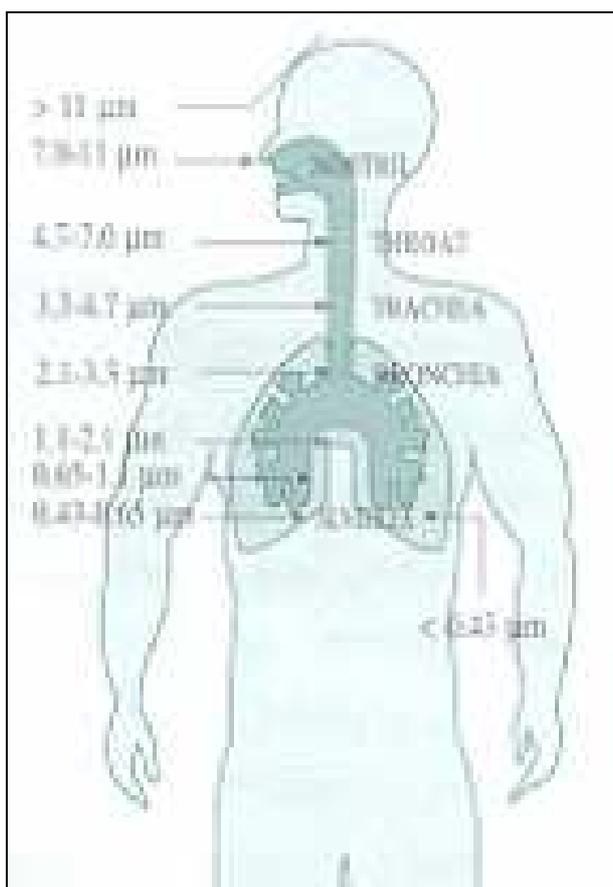


Figura 3.4 Distribución de las partículas en el cuerpo humano,

En varios países actualmente se están desarrollando diversos proyectos que tienen la finalidad de poder incorporar tecnología nueva para la extracción, determinación cualitativa y cuantitativa del material particulado, Hidrocarburos Policíclicos Aromáticos (PAH) y Sulfatos con lo cual se determina con certeza la cantidad de dichos hidrocarburos que son emitidos a la atmósfera.

3.2.2 ESTRATEGIA PARA LA REDUCCIÓN DE MATERIAL PARTICULADO

La protección de la atmósfera requiere de la participación ciudadana y la acción conjunta de los países, ya que la contaminación del aire, la destrucción de la capa de ozono y el calentamiento global, conciernen a todos por igual. La calidad del aire puede mejorar si se desarrollan estrategias tendientes a prevenir la contaminación, limitando la emisión de gases contaminantes y reduciendo el uso de combustibles fósiles.

Para solucionar los problemas de contaminación del aire, se deben considerar aspectos técnicos, sociales, geográficos, económicos y políticos. En el desarrollo de estrategias de prevención y control de la contaminación atmosférica deben trabajar conjuntamente el sector privado, el gobierno, el sector académico y la sociedad. Por último, las mejores estrategias deben estar enfocadas no sólo a cumplir con los estándares de calidad del aire y así no dañar el medio ambiente, sino a reducir o eliminar el riesgo de la población por exposición aguda y crónica a los contaminantes en la atmósfera.

A nivel mundial para reducir los riesgos producto de las emisiones de material particulado de los autobuses de transporte urbano, se debe adoptar estrategias como:

1. Adaptar a los autobuses elementos o dispositivos post-tratamiento, diseñados para reducir las emisiones de contaminantes, como: catalizadores de oxidación (DOC), filtros de partículas (DPF), etc.
2. Sustituir la flota de autobuses con tecnologías nuevas no contaminantes.
3. Exigir combustibles diesel con bajo contenido de azufre (< de 50 ppm). Esta alternativa reduce sustancialmente las emisiones de SO₂, NO_x, aerosoles ácidos precursores de ozono troposférico, partículas finas y ultrafinas.
4. La adopción de autobuses con motores alternativos que funcionen con gas comprimido o electricidad.
5. Mejorar el diseño de la cámara de combustión, inyección a alta presión, EGR, Turbocargado, Interenfriamiento, etc.

6. Buenas prácticas de conducción, y
7. Legislación muy estricta para protección de la salud.

Siendo los dispositivos postcombustión una de las alternativas implantadas para el control de las emisiones de PM, se presenta a continuación los distintos tipos de dispositivos que se encuentran en el mercado y que actualmente son usados en programas de mejoramiento de la calidad del aire, así como las instituciones a cargo de verificar y calificar su efectividad.

3.3 DISPOSITIVOS POST COMBUSTIÓN

Los buses diesel convencionales producen significativas cantidades de emisiones contaminantes, especialmente de material particulado (PM) y óxidos de nitrógeno (NOx), causando un deterioro de la calidad del aire. Para reducir estas emisiones, existe una variedad de diferentes tecnologías de control de ellas disponibles. Estas pueden aplicarse a buses nuevos, así como también a buses que ya estén en uso, lo que se llama modificación.

El principio de operación de estos es simple, los filtros remueven el PM fuera de los gases de escape del motor, lo retienen y lo convierten a través de la combustión pasiva o asistida de acuerdo al diseño del dispositivo. El control de la emisión de PM se logra sin afectar el diseño y características del motor y con un muy leve impacto al consumo de combustible. La eficacia de los dispositivos ha sido ampliamente investigada y reportada en la literatura técnica.

La rápida acumulación del hollín en la superficie de los filtros, provoca el incremento de la caída de presión, por lo que se requiere de un proceso de regeneración, manteniendo la eficiencia del motor dentro de límites aceptables.

3.3.1 TIPOS DE DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTIÓN

Existe un sinnúmero de tipos de dispositivos, los que se diferencian entre si, ya sea por su aspecto físico, principio de reducción de PM y la manera en que se regeneran denominándoseles pasivos o activos.

Filtros activos son aquellos que requieren de agentes externos para su regeneración, como lo es la energía eléctrica, el aditivo catalizador al combustible, o la inyección de combustible.

Filtros pasivos son aquellos en los cuales la regeneración del material PM atrapado es automáticamente y su eliminación depende de la temperatura de los gases de escape. Para su correcto funcionamiento se debe controlar la temperatura de combustión, en algunos dispositivos, la disminución de la temperatura puede ocurrir a través de la oxidación del gas NO hacia NO₂, el exceso puede ser emitido por el tubo de escape, siendo éste un contaminante nocivo, lo cual representa un nuevo problema para lograr un aire limpio.

3.3.1.1 Catalizadores de oxidación de diesel (DOC_S)

Los DOC_S reducen el monóxido de carbono, hidrocarburos y la fracción orgánica soluble (SOF) del material particulado; además de reducciones importantes de "emisiones no reguladas" (contaminantes no reguladas ni por leyes ni por normas), así como reducción de actividad mutagénica y cancerígena.

En la mayoría de las aplicaciones un catalizador de oxidación de diesel consiste en una caja de acero inoxidable que contiene una estructura de panal de abejas llamada sustrato o soporte del catalizador. No hay partes móviles, sólo grandes cantidades de superficie interior cubiertas con metales catalíticos como el platino o el paladio. En el caso de los gases de escape del motor diesel, el catalizador oxida el monóxido de carbono (CO), hidrocarburos gaseosos (HC_S) e hidrocarburos líquidos que son absorbidos por las partículas de carbono.

Los catalizadores de oxidación diesel son eficaces para convertir la fracción orgánica soluble del material particulado diesel en dióxido de carbono y agua.

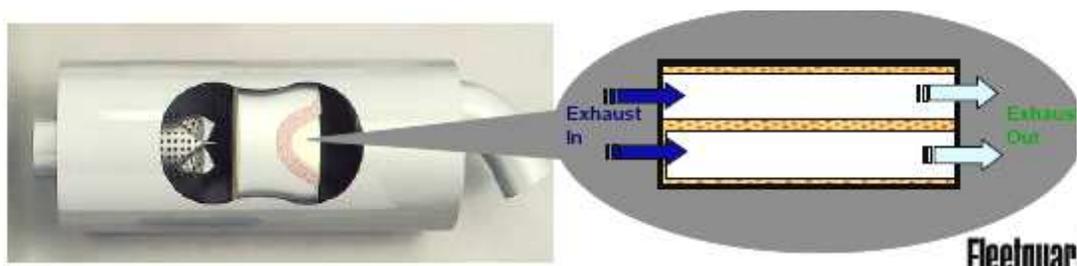


Figura 3.5. Catalizadores de oxidación de diesel. Fleetward

Los purificadores catalíticos (convertidores catalíticos, catalizadores) son la opción más común en el control de las emisiones de diesel. Estos son muy eficientes en la reducción de las emisiones de hidrocarburos (HC) y Monóxido de Carbono (CO), las cuales pueden ser convertidas en más del 80 y 90% respectivamente, además reducen las emisiones de partículas sólidas (PM) de un 10 hasta 50%, debido a la remoción de la fracción orgánica (SOF) de las partículas de Diesel.

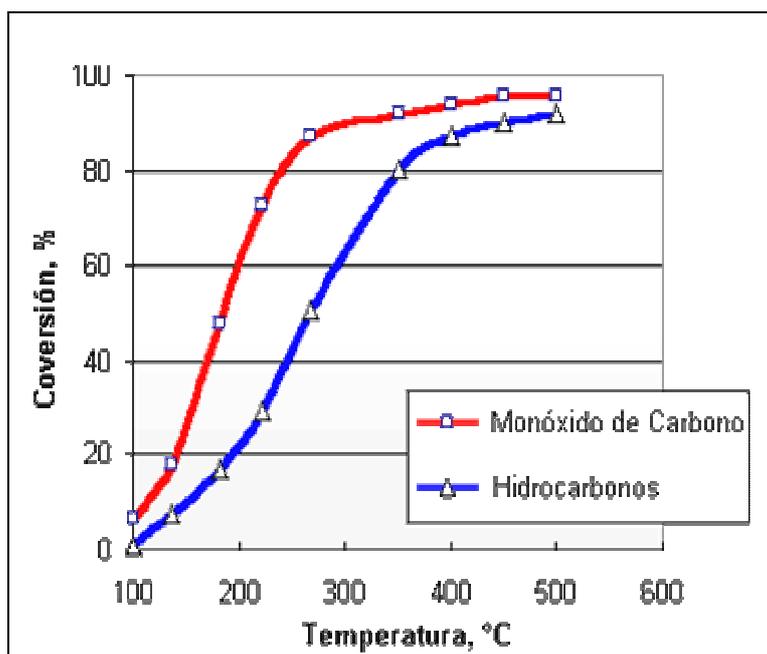


Figura 3.6 Conversión de Gases en un Catalizador de Oxidación de Diesel²⁸

Los catalizadores de oxidación han probado ser eficientes en reducir emisiones de particulado y de humo en los vehículos más antiguos. Bajo el programa de reconstrucción – modificación de buses urbanos de la U.S.EPA, varios fabricantes han certificado que los catalizadores de oxidación de diesel proveen al menos un 25% de reducción en la emisión de PM para los buses urbanos en uso. Los datos de certificación también indican que los catalizadores de oxidación logran reducciones sustanciales en emisiones de CO y HC.

El contenido de azufre en el combustible es un factor determinante de la efectividad de la tecnología del catalizador de oxidación porque estos mismos catalizadores pueden también oxidar dióxido de azufre para formar sulfatos, lo

²⁸ Fuente: www.nett.ca/es/products.html

cual se cuenta como parte del particulado. Esta reacción de SO_2 a sulfato depende, no solamente del nivel de azufre en el combustible, sino también de la temperatura de los gases de escape. Algunas formulaciones de catalizadores han sido desarrolladas de tal modo que selectivamente oxidan la fracción orgánica soluble (SOF) mientras que minimizan la oxidación del dióxido de azufre; sin embargo, a menor contenido de azufre en el combustible, mayor es la oportunidad para maximizar la efectividad de la tecnología del catalizador de oxidación para un mejor control total del PM y un mayor control de los HC_s tóxicos.

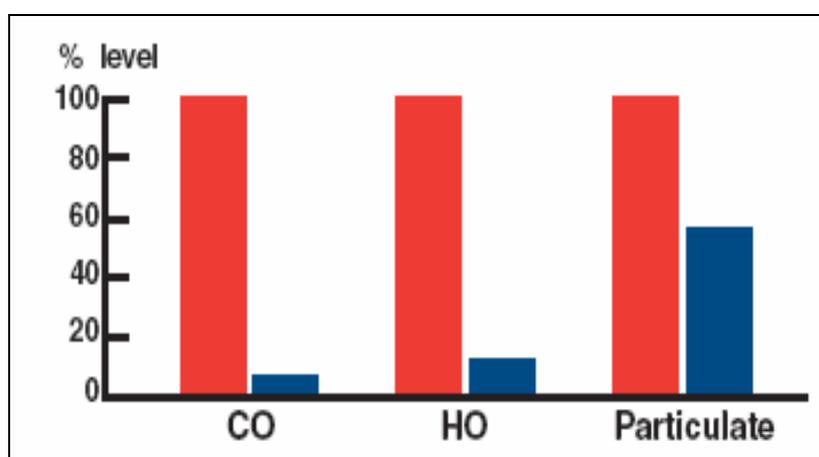


Figura 3.7 Reducción de contaminantes con el uso del Catalizador de Oxidación de Diesel²⁹

Estudios realizados Estados Unidos, Europa y Hong Kong sobre el efecto del azufre en los catalizadores, revelan que mientras menor es el porcentaje de azufre en el combustible, mayor es la eficiencia del catalizador; pruebas realizadas en vehículos con catalizadores presentan reducciones de alrededor del 35% de PM al inicio de su uso y 25% después de una recorrer varios kilómetros.

3.3.1.2 Filtros Catalíticos para Diesel³⁰

Los filtros catalíticos para diesel, utilizan una pared monolítica de un mineral gris de silicato de magnesio o aluminio para atrapar el hollín producido por los

²⁹ www.fleetguard.com/fleet/en/products/en_prod_ems_lownox.jsp

³⁰ <http://www.nett.ca/es/products.html>

motores diesel. La cubierta del filtro monolítico se recubre con un catalizador exclusivo. Este disminuye la temperatura de combustión del hollín, permitiendo regenerar el filtro. El hollín acumulado se oxida en el filtro durante la operación regular del motor.



Figura 3.8 Filtro Catalítico

El elemento cilíndrico del filtro consta de varios canales cuadrados y en paralelo que van en dirección axial, separados por paredes delgadas y porosas. Los canales están abiertos en un extremo, pero taponados en el otro extremo. De esta manera los gases del escape cargados de partículas están forzados a fluir a través de las paredes. Las partículas, sin embargo, son demasiado grandes para escapar y son atrapadas en las paredes del filtro, el catalizador disminuye la temperatura de combustión del hollín permitiendo que el filtro se regenere.



Figura 3.9 Eficiencia del filtro catalítico³¹

En el mercado, entre otros se comercializan los filtros Nett®, los mismos que muestran que la eficiencia de este filtro catalítico en la filtración del hollín para motores diesel aumenta con la carga del hollín en la unidad. Aún con cargas bajas de hollín la eficiencia del filtro supera el 90% (línea azul en la Figura 3.9). El humo visible es completamente eliminado por el filtro. Debido a la presencia del catalizador, también se pueden observar las reducciones en monóxido de carbono e hidrocarburos. La caída de presión de los gases en un filtro regenerado correctamente (línea roja) está entre 5 y 10 kPa. Aplicaciones con temperaturas más altas regeneran mejor, acumulan menos hollín en el filtro y experimentan una caída de presión menor.

3.3.1.3 Filtro de partículas y trampa de NO_x

Para reducir el volumen de partículas al nivel que exigen las normas ambientales se hace necesario el uso de los llamados «filtros» o «trampas» de partículas.

Estas trampas retienen en su interior las partículas originadas en el proceso de combustión, evitando que sean expulsadas a la atmósfera. Pero, como evidentemente la capacidad de estos filtros no es ilimitada, es necesario proceder a su limpieza. Esto se hace de forma periódica y automática durante el funcionamiento normal del vehículo. Esto se consigue provocando la oxidación espontánea de las partículas retenidas aumentando la temperatura de los gases de escape hasta 650°C, generalmente mediante una pequeña post-inyección de combustible durante la carrera de expansión. Para conseguirlo se recubren las caras internas del filtro con ciertos catalizadores químicos que facilitan la oxidación de las partículas retenidas a unos 500 ó 550°C.

Una variedad de materiales filtrantes se han usado en filtros de particulados diesel que incluyen: materiales cerámicos y carburos de silicón, cartuchos de fibra enrollada, bobinas de fibras de sílice tejidas, espuma cerámica, tela

³¹ Fuente: <http://www.nett.ca/es/products.html>

metálica, sustratos de metal aglomerados, y, en el caso de los filtros descartables, papel resistente a las temperaturas. La eficiencia del filtro ha sido rara vez un problema con los materiales del filtro mencionados, pero es necesario:

- 1) Optimizar la eficiencia del filtro y minimizar la contrapresión,
- 2) Mejorar el flujo radial de oxidación en el filtro durante la regeneración, y
- 3) Mejorar la fuerza mecánica de los diseños de filtro.

Muchas técnicas pueden y están siendo usadas para regenerar un filtro de particulado diesel. Algunas de éstas se usan en conjunto en el mismo sistema de filtro para lograr una eficiente regeneración, existen sistemas de regeneración en el vehículo y externos a él, siendo éstas:

1. Regeneración basada en el uso de un catalizador de oxidación, este se encarga de reducir la temperatura de ignición necesaria para oxidar el PM acumulado.
2. Regeneración con catalizador de oxidación de flujo en contracorriente, facilita la oxidación del NO a NO₂, este último adsorbe el PM almacenado, reduciendo sustancialmente la temperatura requerida para regenerar el filtro.
3. Inyección de combustible posterior al punto muerto superior (PMS). Inyectar pequeñas cantidades de combustible en los cilindros de un motor diesel después de que los pistones hayan alcanzado el PMS, permite que el combustible no quemado se oxide en el filtro provocando la combustión de PM acumulado.
4. Los quemadores de combustible pueden proporcionar la temperatura necesaria para quemar el PM acumulado en el filtro y de ésta manera regenerarlo.
5. Los calentadores eléctricos son estaciones de regeneración fuera del vehículo, estos combustionan el material particulado atrapado al inyectar aire caliente a través del sistema del filtro.

3.3.1.4 Filtros de partículas diesel (DPF_s)

Los filtros de partículas de diesel (DPF_s) reducen el material particulado al filtrarlo mecánicamente del flujo proveniente de los gases de escape, se establece una reducción del 90 - 95%, además disminuyen la opacidad (emisión de humos negros) y partículas grandes, así como una reducción del 99% de las partículas ultra finas invisibles, siendo éstas las más peligrosas para la salud. Se los puede combinar con catalizadores de oxidación para una mayor eficacia.

Debido a que las partículas filtradas al acumularse, taponan el filtro, estos poseen sistemas para quemar el PM, denominándose a este proceso regeneración, o, de lo contrario, se debe remover manualmente las partículas capturadas.

Son fabricados como estructuras de panales extruidos, con canales que se cierran en un extremo, para lograr un patrón de tablero de ajedrez. Los paneles adyacentes se cierran y se abren en el sentido del reloj.

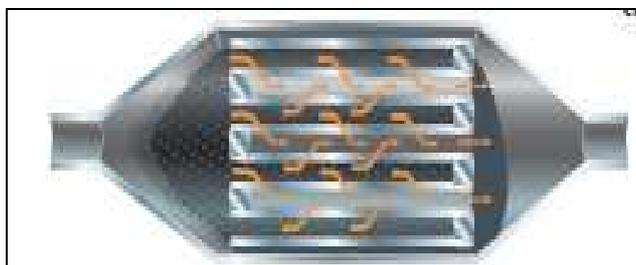


Figura 3.10 Filtro de partículas diesel.

Consta básicamente de: un cuerpo del filtro robusto de carburo silicona, resistente a reacciones exotérmicas por la quema del hollín; un conjunto de abrazaderas de liberación rápida para su mantenimiento, todos estos componentes son de acero inoxidable para una vida útil larga; además cuenta con un sistema autónomo, con su propio control computarizado, este permite el monitoreo del estado del sistema.

El DPF retiene el material particulado por filtración, impactación, intercepción y difusión, además proporciona condiciones para la combustión del material particulado retenido (regeneración).

Los Sistemas DPF_s, son tecnologías avanzadas que permiten³²:

- Poner al catalizador dentro del filtro.
- No dependen del contenido de azufre en el combustible,
- No están restringidos a ciclos óptimos de servicio o a ciertos tipos de vehículos.
- Operan con motores nuevos y viejos, así como motores pequeños o grandes,
- Reducen las emisiones de NO₂ en servicio (hasta un 90% de eliminación para cierto tipo de filtros).
- Dispone de un sistema de dosificación automático.
- La combustión de hollín es confiable aun con baja carga del motor.
- La iniciación del hollín se realiza en un corto periodo de alta temperatura en aceleración o en carga alta.
- La ubicación del catalizador dentro del filtro asegura que la combustión se dé dentro de éste.
- El DPF permanece limpio para mayores periodos de operación.

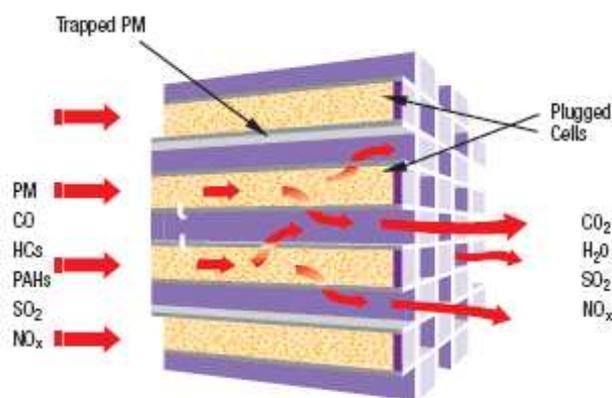


Figura 3.11 Estructura del filtro de partículas diesel.

³² Washington State University Extension Energy Program, Diesel Particulate Filters; (<http://www.epa.gov/otaq/retrofit/retroverifiedlist.htm>)

3.3.1.4.1 Eficiencia de reducción del material particulado

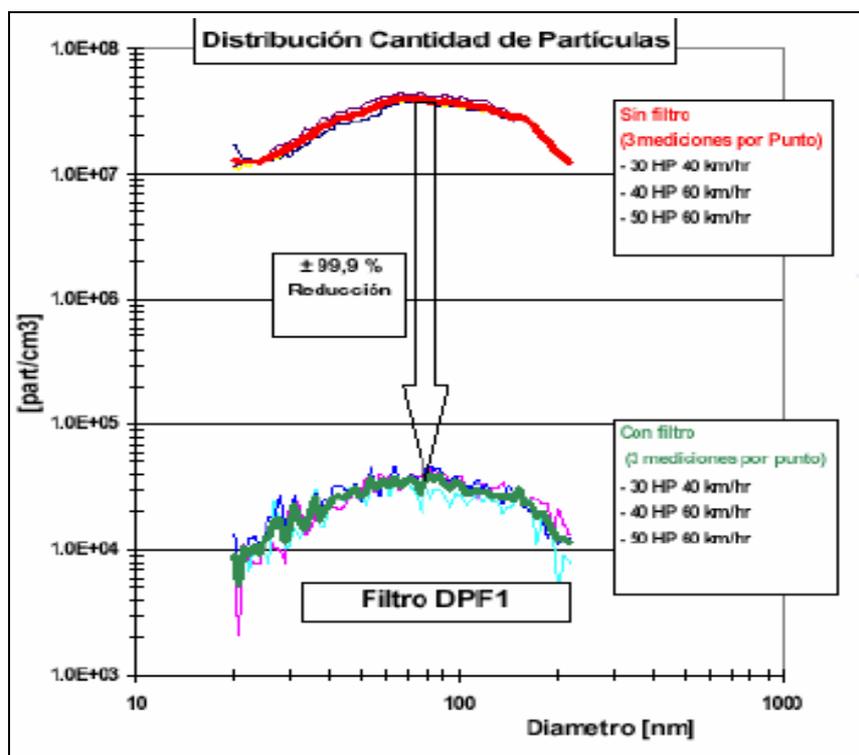


Figura 3.12 Distribución de la cantidad de partículas diesel.

En la figura 3.12 se puede observar la distribución del PM cuando sale al medio ambiente, y revelan que el uso del DPF genera una reducción de hasta el 99.9%.

La tecnología de los DPF fue aplicada en el Plan de transporte Transantiago en Chile, donde el objetivo principal es disminuir los índices de contaminación en la ciudad, modernizar la flota vehicular destinada al transporte de pasajeros, datos tomados por el 3CV de Chile presentaron una reducción significativa, en la figura 3.13 se puede observar el comportamiento del dispositivo en cuanto a la reducción de PM. Las pruebas se realizaron en vehículos de diferentes modelos y con DPF provenientes de distintos fabricantes.

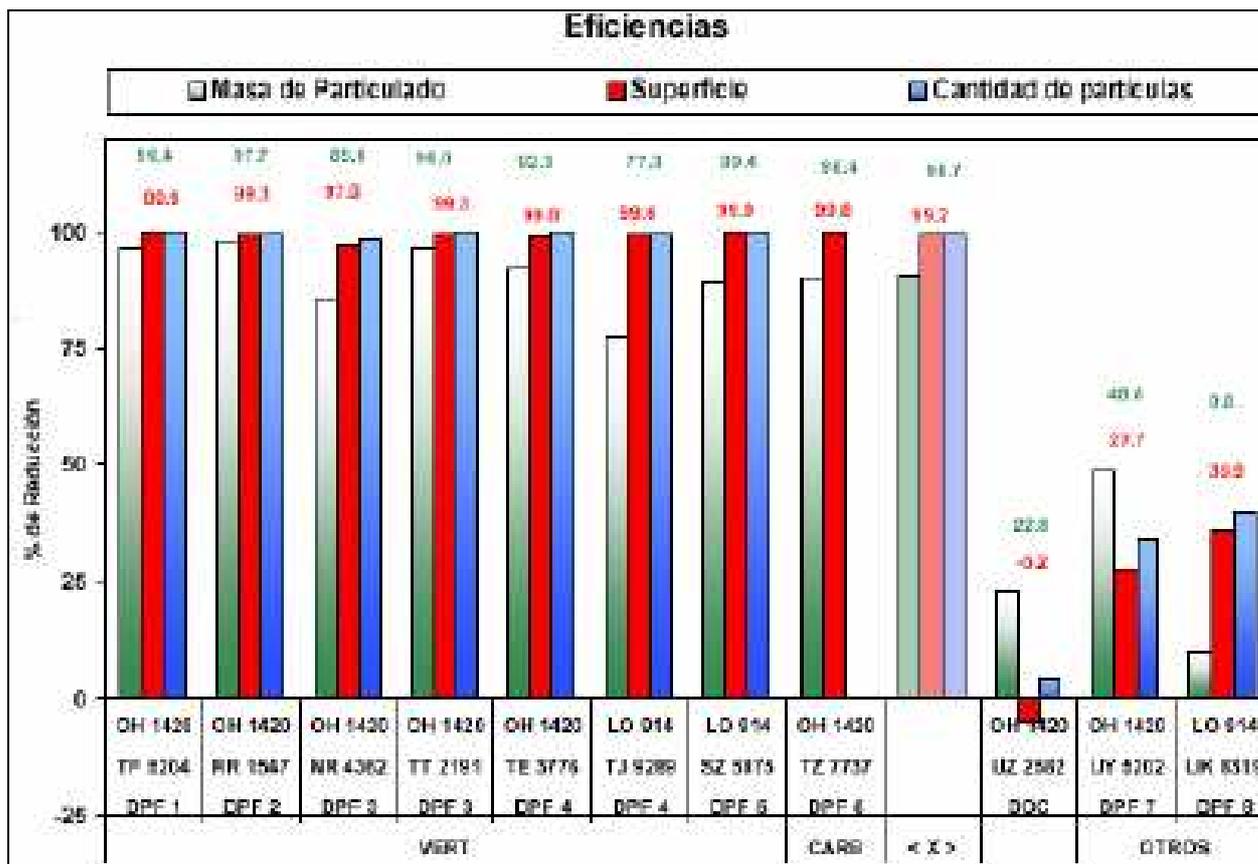


Figura 3.13 eficiencia del DPF en pruebas realizadas en Chile.

3.3.1.5 Filtro CRT (continuous regeneration trap)

El filtro CRT® fabricado por Jonson Matthey's cuenta con una tecnología revolucionaria en el control de reducción de emisiones. Es el primer filtro verificado por la EPA's mediante un programa retrofit (retroadaptación de autobuses con dispositivos postcombustión), el filtro CRT puede ser aplicado en motores pesados utilizados en la industria. La tecnología del sistema CRT reduce HC, CO y PM en un 90% o más.

El sistema CRT consiste de un filtro de partículas precedido por un convertidor catalítico de oxidación. Todo el sistema convertidor catalítico y filtro está integrado en el cuerpo del silenciador de escape es fabricado en acero inoxidable, se lo puede sustituir por el silenciador existente sin necesidad de otras modificaciones.

Las partículas son atrapadas por el filtro, estando continuamente sometidas a combustión por el NO_2 que se forma en el convertidor catalítico, siendo



diseñado para limitar el exceso de NO_2 , en tanto las emisiones de NO se reduce ligeramente.

Figura 3.14 Estructura del CRT.

El CRT no requiere de ningún tipo de ayuda externa para su regeneración, trabaja con seguridad, requiere poco mantenimiento.

La reducción que puede alcanzar el CRT es de más del 90%, con el uso de un diesel con bajo contenido de azufre (15 ppm). Hoy en día, ya existen variantes comerciales como son:

- CCRT^{TM} _ Filtro catalítico no requiere de oxidación para su regeneración,
- SCRT^{TM} _ Sistemas de reducción catalítica selectivos, reducen los NO_x ,
- EGRT^{TM} _ Filtro con recirculación de gases de escape.

A diferencia de otros filtros de partículas, en lugar de esperar a que su capacidad esté prácticamente agotada para proceder a su limpieza, entra en un proceso de regeneración continua, tan pronto como el volumen de partículas retenido supera el 20 a 30% del total admisible. Para ello, hace uso del NO_2 generado en un catalizador de oxidación previo en lugar del O_2 , por lo que requiere temperaturas de funcionamiento de alrededor de los 300°C , que pueden ser alcanzados mediante la postinyección de combustible, una vez lograda esta temperatura la capacidad del filtro se restituye y el proceso de regeneración se detiene.

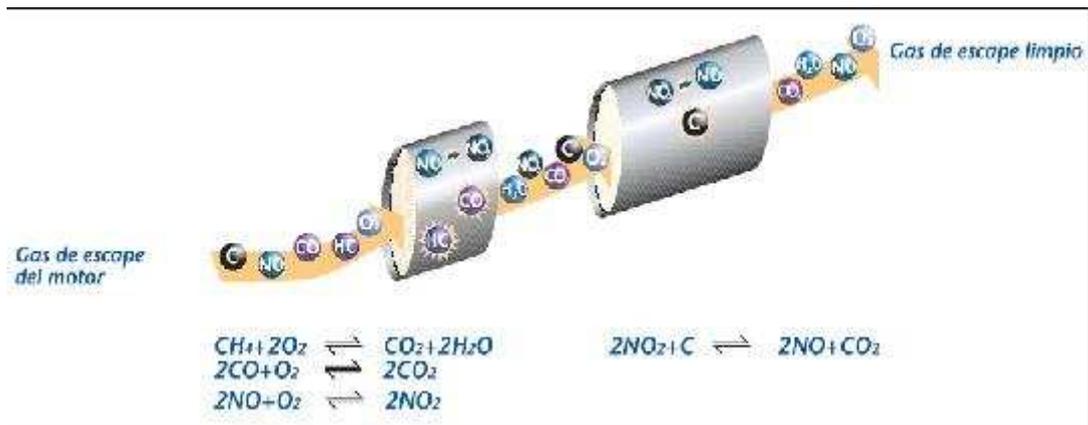


Figura 3.15 Funcionamiento del CRT.

La figura 3.15 indica el funcionamiento del CRT, como se puede observar las emisiones resultantes se reducen en gran magnitud que apenas pueden ser detectadas utilizando las técnicas modernas de medición de emisiones, como se muestra en la figura 3.16.

Uno de los principales inconvenientes que presentan estos sistemas está ligado a la concentración de azufre presente en el diesel. El azufre tiende a depositarse en los convertidores catalíticos afectando el funcionamiento de estos, además éste induce a que el CRT aumente su temperatura de regeneración encima de los 500°C, lo que provoca, que el nivel de emisiones aumente durante cortos períodos de tiempo, reduciendo su efectividad global.

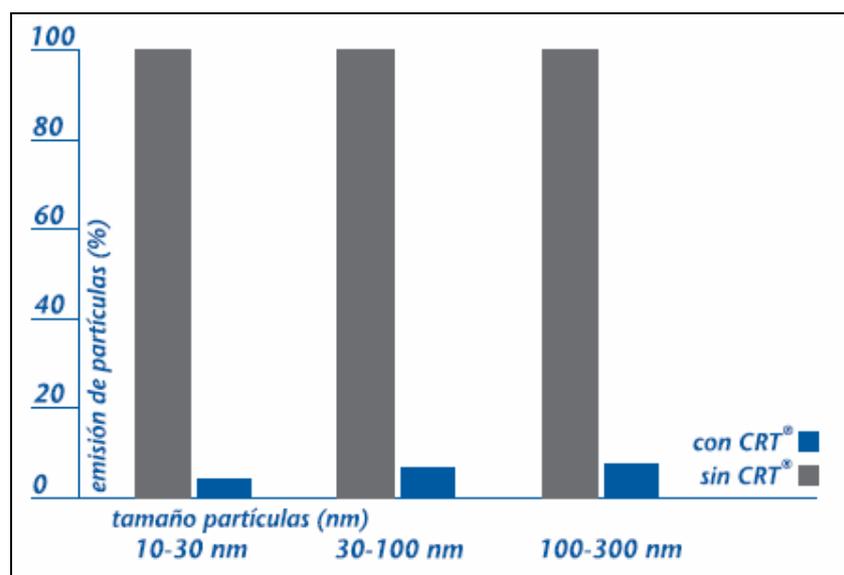


Figura 3.16 Efecto del uso del CRT en las emisiones de gases contaminantes.

Para asegurar un funcionamiento óptimo del sistema modular CRT se deben cumplir las siguientes condiciones:

- Combustible diesel con máx. 50 ppm de azufre.
- Su rango de temperaturas deben estar situadas entre 250 - 450 °C.
- Utilización con motores Euro 1, Euro 2 y Euro 3.

La efectividad del dispositivo CRT ha sido comparada a la del motor a gas natural (GNC) como lo indica la figura 3.17, estos resultados indican que el CRT da como resultado emisiones que en algunos casos son menores que las de un motor a GNC.

Uno de los problemas que presenta el CRT es la excesiva producción de NO_2 para su regeneración, se puede evidenciar que el NO_2 no usado es expulsado en los gases de escape.

Pruebas de medición de emisiones han detectado altos niveles de NO_2 en la emisión del motor a diesel con el CRT. Las pruebas fueron realizadas sobre un motor a diesel probado sobre múltiples ciclos de actividad (figura 3.18) que incluyen el ciclo de buses urbanos Central Business District (CBD), el ciclo americano para la certificación de emisiones de motor Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS), el ciclo de buses urbanos de la ciudad de Nueva York New York Bus Cycle (NYBC), y la actividad a Steady State (SS). Los resultados indican que las emisiones de NO_2 son alrededor del 50%, mientras que sin el dispositivo estas son del 10% o menores, por tanto el dispositivo debe ser probado en vehículos que cuenten con niveles de azufre muy bajos (15 ppm).

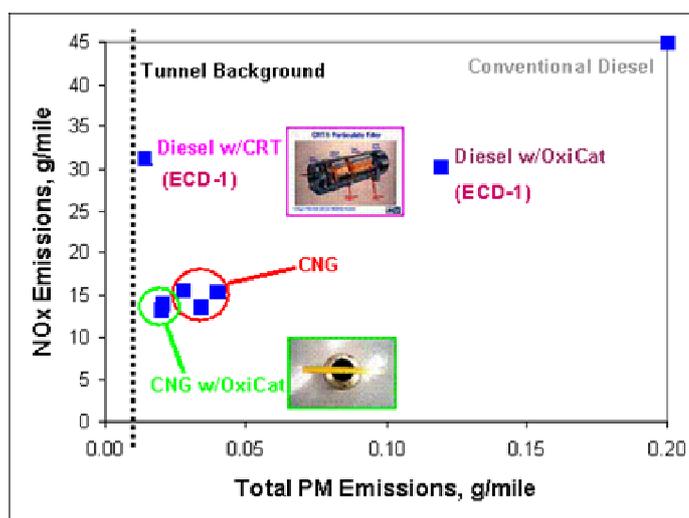


Figura 3.17 Comparación de las emisiones de varias tecnologías de motor de bus urbano³³.

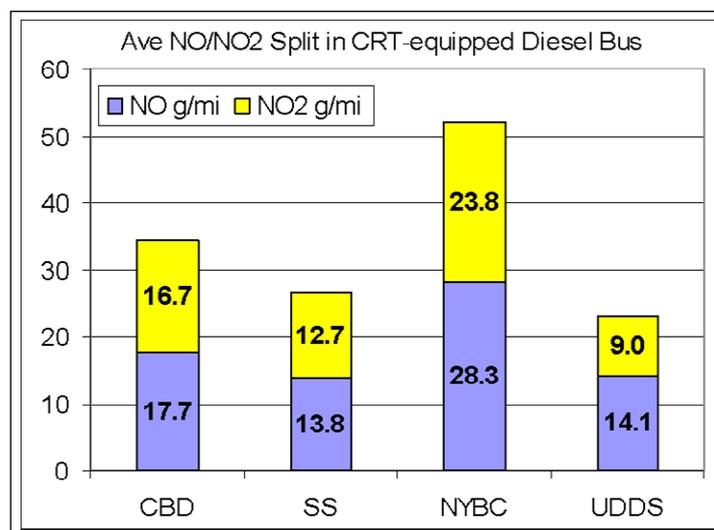


Figura 3.18 Emisiones de NO₂ debido al uso del CRT en un motor a diesel para bus urbano³⁴.

Los filtros de partículas CRT® de regeneración continua de Jonson Matthey, realizó varias pruebas para demostrar su eficiencia, para determinar el porcentaje de reducción de los gases contaminantes, en la tabla 3.1 se muestran los resultados obtenidos durante la prueba FTP 75.

Tabla 3.1 Resultados del uso del filtro de partículas CRT®, en vehículos diesel pesados, prueba transeúnte FTP.³⁵

Tecnologías probadas		Reducción de emisiones (%)		
Año	Modelo - motor	HC	CO	PM
1999	Caterpillar 3126	88%	99%	88 %

³³ Fuente: Ayala, A., Kado, N., Okamoto, R., Gebel, M., Rieger, P., Kobayashi, R., and Kuzmicky, P., "CNG and Diesel Transit Bus Emissions in Review," Proceedings of the 9th Diesel Engine Emissions Reduction Conference, Newport, RI, Aug., 2003

³⁴ Ayala, A., N.Y. Kado, R.A. Okamoto, B.A. Holmen, P.A. Kuzmicky, R. Kobayashi, and K.E. Stiglitz, "Diesel and CNG Heavy-duty Transit Bus Emissions over Multiple Driving Schedules: Regulated Pollutants and Project Overview," Journal of Lubricants and Fuels, 2002, SAE Transactions, Vol. 111, pp. 735-747.) Comparación de las emisiones de varias tecnologías de motor de bus urbano

³⁵ CRT® Filter System Johnson Matthey Sets the Standard for Diesel Particulate Filters

1995	Cummins M11	91%	89%	95%
1998	DCC Series 60	95%	94%	87%
1999	DCC Series 50	100%	72%	90%

3.3.1.6 Sistemas de reducción catalítica selectivos (SCR)

Los SCR convierten el NO_x en nitrógeno y otros gases a través de la adición de un reductor al flujo de escapes. Un sistema SCR utiliza un catalizador metálico y un reactivo químico de reducción, generalmente una solución úrea acuosa en aplicaciones de fuentes móviles, para convertir óxidos de nitrógeno a nitrógeno molecular y oxígeno en el flujo de escape. El reactivo se agrega a un porcentaje calculado de un algoritmo que estima la cantidad de NO_x presente en el flujo de escape basada en parámetros del motor, tales como revoluciones por minuto (rpm) y carga.

A medida que los gases de escape y el reactivo pasen al catalizador SCR, las reacciones químicas ocurren reduciendo las emisiones de NO_x entre 75% y 90%, los HC hasta un 80%, y los PM de 20% a 30%, además reduce el olor característico producido por los gases de escape del motor diesel.



Figura 3.19 Filtro SCR - MECA

Bajo ciertas condiciones, el sistema SCR puede aumentar las emisiones de amoníaco de modo que es necesario adicionar un catalizador de oxidación de flujo corriente abajo, esto permite minimizar la presencia de amoníaco. Como todas las tecnologías de control de emisiones basadas en catalizadores, el funcionamiento del SCR es mejorado con el uso de combustible con bajo contenido de azufre, esta tecnología recién comienza a entrar al mercado, por

lo que sus aplicaciones son limitadas y no se considera apropiada para aplicaciones donde se deba realizar modificaciones en el vehículo.

3.3.1.7 Sistemas de recirculación de gas de escape (EGR)

Los EGR funcionan recirculando los gases de escape de vuelta hacia el flujo de alimentación, el cual enfría el proceso de combustión y, de ahí, reduce la formación de NO_x . Existen dos sistemas EGR, de baja presión y de alta presión, el sistema EGR de baja presión es apropiado para aplicaciones donde el motor no sea sometido a ninguna modificación.

Sistemas EGR han sido introducidos en proyectos pilotos en Suiza desde el 2002, presentando un equilibrio entre reducción de NO_x y consumo de combustible. Para optimizar el sistema EGR con un aumento en el consumo de combustible (2 a 3%), por lo que es necesario calibrar el dispositivo según el tipo de motor.

Los filtros de partículas diesel son parte integral de cualquier sistema EGR de baja presión, pues aseguran que grandes cantidades de PM no retornen al motor

3.3.1.8 CRT con filtro de metal sinterizado (SMF®)

El CRT con filtro de metal sinterizado (SMF), por su diseño y material empleado, tiene importantes ventajas sobre otros tipos empleados. Posee un diseño modular, con varios módulos, puede adoptar cualquier forma o perfil, se prevé que alcance superficies de filtrado desde 1,8 hasta 8,5 m^2 , esta característica permite que la tecnología del filtro pueda ser aplicada a todos los motores diesel de turismos, autobuses, camiones y maquinaria de construcción.

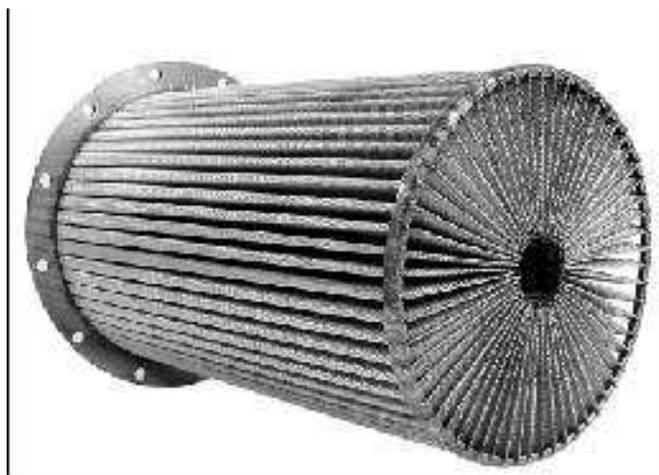


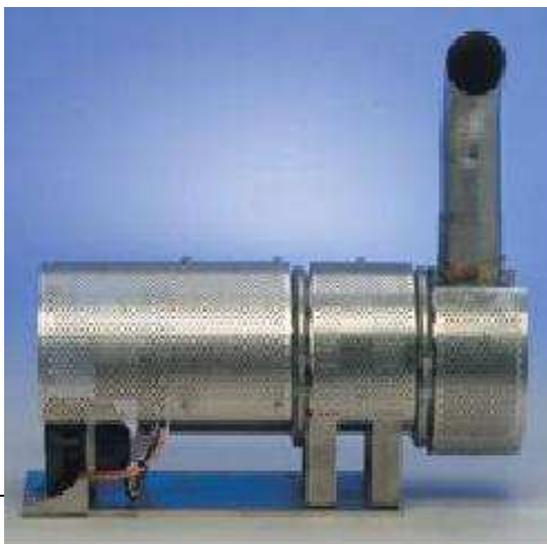
Figura 3.20 CRT con filtro de metal sinterizado (SMF) .

Las ventajas CRT con SMT – Jerfilter son:

- Grado de efectividad de filtrado del 99%,
- Óptima alimentación y dosificación del gas,
- Baja contrapresión del gas de escape,
- Alta capacidad de almacenamiento de cenizas,
- Construcción modular y compacta,
- Fácil adaptación a diferentes espacios disponibles,
- Encapsulado económico,
- Fácil reciclaje,
- Fácil limpieza y bajos costos de limpieza y mantenimiento.

3.3.1.9 CRT con Filtros MK (modular-combustible)³⁶

Es un filtro de partículas diesel con quemador de combustible que facilita la alimentación del sistema a bordo, es decir ya no requiere de agentes externos, siendo la solución ideal para aplicaciones que exigen una regeneración autónoma y para descansos extremadamente cortos. Cumple con las disposiciones europeas en relación a los valores límites del PM (TRGS 554, TA-aire, VERT).



³⁶ <http://www.huss-umwelt.com/es/mk.html>

Figura 3.21 CRT con filtro MK³⁷

Por ejemplo el filtro de partículas diesel de HUSS con quemador de combustible, está compuesto de una carcasa cilíndrica donde está alojado un monolito de carburo de silicio, insensible a los choques. Durante el funcionamiento del motor los gases de escape pasan por el medio filtrante. Estos filtros retienen más del 99% de todas las partículas diesel (con relación a la masa de partículas).

Con el aumento del tiempo de trabajo el grado de admisión del filtro disminuye y por ello la contrapresión de gases de escape aumenta. Mediante un sistema de control el conductor podrá saber la contrapresión de los gases de escape y por consiguiente el grado de admisión del filtro. Una vez llegado al valor máximo, el filtro tiene que ser regenerado. En este momento, hay que parar el motor y regenerar el filtro mediante el quemador de combustible. El oxígeno necesario se suministra a través de un ventilador. La combustión se realizará sin residuos, es decir todas las partículas, así como los hidrocarburos que se han adicionado se convierten en monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua.

Tabla 3.2 Características de los filtros MK.

Características	Beneficios
Filtro con quemador de combustible	Regeneración autónoma, independiente de la red de distribución y extremadamente corta
Medio filtrante de carburo de silicio (SiC)	Robusto, duración útil extremadamente larga, alta capacidad separadora
Construcción modular con abrazaderas de cierre rápido	Adaptación flexible al vehículo, posibilidad de mantenimiento excelente
Modo de construcción compacto	Buenas condiciones de visibilidad
Componentes bien accesibles, electrónica robusta	Mantenimiento fácil, buena posibilidad de limpieza.

³⁷ <http://www.huss-umwelt.com/es/mk.html>.

Conexiones diferentes para la entrada y salida de gases de escape	Facilita y acelera la adaptación al vehículo
Insonorización	Silenciador se reemplaza
Función de data logger (almacenamiento de datos)	Posibilidad para la verificación de la función del filtro (memorización de la presión, temperatura y de los valores de velocidad dentro de un período hasta 8 semanas)

3.3.1.10 Reactor™ de partículas

Para completar el estudio de las tecnologías de filtrado de partículas se puede mencionar al reactor de partículas, se ha verificado en pruebas que posee una reducción de alrededor del 50% de las emisiones de PM.

El Reactor de partículas presenta nueva tecnología al mercado del retrofit. Emplea la propiedad del catalizador, cuenta con un camino de malla de alambre, es el primero en su tipo a ser verificado por CARB como Nivel 2, se lo prueba en motor diesel determinando la reducción de emisiones lograda por el dispositivo sin la necesidad el uso de aditivo de combustible.



Figura 3.22 Reactor™ de partículas diesel (Fuente Fleetguard Inc. © 2005)

Diseñado como un reemplazo directo del silenciador del vehículo, el Reactor de partículas no requiere de ningún tipo de mantenimiento cuando se lo ubica correctamente. El Reactor de partículas trabaja con un combustible con bajo o

ultra bajo contenido de azufre, casi no tiene impacto en el diseño del motor, economiza el combustible.

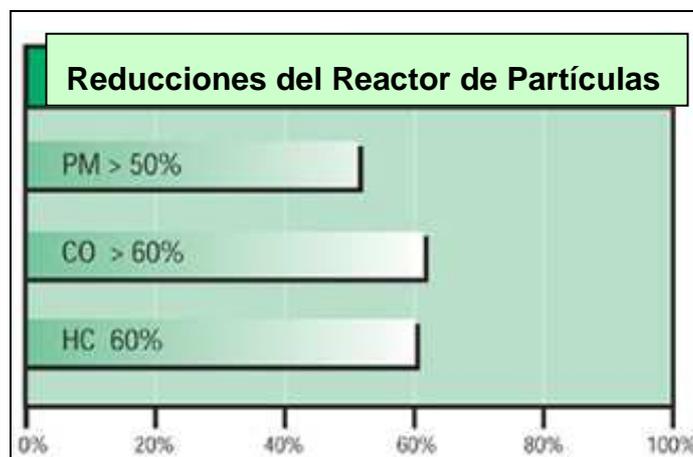


Figura 3.23 Reducción lograda por el ReactorTM de partículas (Fuente: Fleetguard Inc. © 2005)

Considerada como tecnología versátil debido a las siguientes características:

- Logra reducción de emisión de máximo con combustible de bajo contenido de azufre (<500 ppm) o ultra bajo contenido de azufre bajo (<50 ppm),
- Requiere 16% tiempo de operación por lo menos para lograr temperaturas de descarga de 300°C.
- Protege el equipo y requiere de supervisión.
- Pueda reemplazar o ser agregado al sistema del silenciador del vehículo.
- No impacta en el diseño del motor o afecta en el consumo combustible.
- Puede aplicarse a una variedad de motores diesel.

3.3.1.11 Filtros de partículas Bosch.

El fabricante alemán de componentes Bosch producirá a partir de 2005 filtros de partículas para vehículos de turismo con motor diesel. Con este avance, se profundiza aún más en la reducción de emisiones gracias a las funciones internas que desarrollarán los propulsores equipados con estos filtros.

Los filtros existentes están compuestos por materiales cerámicos filtrantes, la técnica que emplea Bosch se basa en materiales metálicos sinterizados, de modo que las partículas se depositan de forma homogénea y se controla su regeneración de forma óptima. Gracias a su estudiado diseño geométrico, el filtro de partículas Bosch dispone de suficiente capacidad de regeneración para todos los residuos que se produzcan durante la vida útil del vehículo. De esta manera, el usuario ahorra una considerable cantidad en mantenimiento o recambios.



Figura 3.24. Filtro de partículas Bosch.

Además del filtro, el sistema incorpora un sensor de presión diferencial que compara la presión de los gases de escape antes y después del filtro de partículas, en ese momento se presenta la caída de presión del filtro, debido a la carga, alcanza un valor definido y el filtro debe ser regenerado. La distribución uniforme del hollín provoca un perfil de temperatura uniforme durante la regeneración.

Debido a su forma geométrica favorable, el filtro de partículas Bosch ofrece, con una cuota de separación comparable, suficiente capacidad para todos los residuos que se produzcan durante la vida útil media de un vehículo, de modo que no se generan costos adicionales para mantenimiento o repuestos.

Con este nuevo producto, el mayor fabricante a escala mundial de sistemas de inyección Diesel podrá suministrar "de una sola mano" importantes sistemas y componentes de motores Diesel en lo que a las emisiones se refiere: inyección directa por alta presión, filtros de partículas, sensores de gases de escape, así como la correspondiente gestión electrónica del motor y de los gases de escape, algo esencial, porque a pesar de los avances logrados en la reducción

de emisiones mediante "medidas internas en el propio motor", sin el filtro de partículas para motor Diesel no será posible cumplir, por ejemplo, la norma Euro 4 que entrará en vigencia en Europa a partir de 2005 para turismos grandes (más de 1.800 kg. de peso bruto).

Para el mercado de los EE.UU., donde los valores límites serán muy bajos a partir de 2007, los filtros de partículas son elementos indispensables para vehículos Diesel. En este sentido, Bosch parte de una demanda creciente y rápida, por lo que espera para el 2007 satisfacer un mercado de alrededor de hasta 6 millones de filtros de partículas.

3.3.1.12 Purifilter™ (Filtro de partículas diesel)

El Purifilter™ posee un catalizador con una base de metal sobre un filtro de silicón de carbono lo que permite la regeneración, su diseño presenta característica que lo hacen de alta durabilidad.

El sistema Purifilter™ está diseñado para cinco tipos de silenciadores, su diseño modular le facilita rotar hasta 360° lo que permite un alto rango de medidas y pruebas, además puede ser instalado en posición vertical u horizontal.

El sistema Purifilter™ es un filtro de partículas diesel, que reduce las partículas de PM, monóxido de carbono (CO) e hidrocarburos (HC) hasta en un 90%.



Figura 3.25. Montaje Purifilter™. Sección de entrada, cuerpo central del filtro y sección de salida.

Actualmente se lo está usando en buses urbanos, para lograr su certificación de la EPA US y la CARB, para esto la EPA US realizó pruebas en 50 buses urbanos modelo 1996, aplicó el ciclo highway FTP, obteniendo los siguientes resultados de reducción: PM de 89%, HC de 86% y CO de 73%.

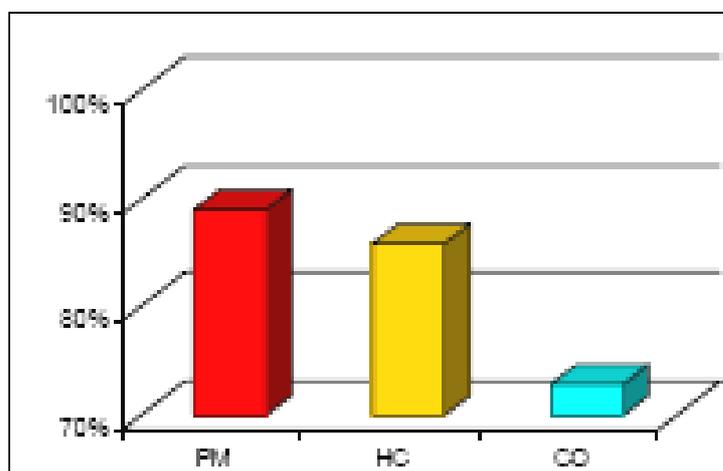


Figura 3.26. Resultados obtenidos en 50 buses urbanos modelo 1996, en pruebas realizadas por la EPA US.

3.3.2 ADITIVOS PARA POSTCOMBUSTIÓN

Con el uso de filtros adecuados es posible retener más del 99% de las partículas que emiten los motores diesel, pero el problema surge en relación con la regeneración del filtro cargado de partículas, siendo el reto desarrollar dispositivos con niveles de emisiones muy bajos que no afecten de manera importante a su uso, eficacia y fiabilidad.

La regeneración de partículas es difícil porque sólo se eliminan con temperaturas superiores a los 600°C, mientras que los gases de escape apenas superan los 270°C, razón por la cual es necesario modificar el funcionamiento del motor para conseguir temperaturas mayores, para lograrlo se puede usar aditivos en el combustible, estos reducen la temperatura de oxidación de las partículas.

Los aditivos de combustible prometen más kilómetros por litro, motores más limpios y menos polución. Se han desarrollado los aditivos para que el diesel se queme más eficientemente, produciendo ahorros de combustible de 10%. El

aditivo de diesel consiste en pequeñas partículas de óxido de cerio que catalizan las reacciones de combustión entre el diesel y el aire. El producto ha sido probado extensivamente, tanto en pruebas de campo de gran escala y pruebas de motor independientes, mostrando beneficios de hasta 12% de ahorro en el consumo de combustible bajo condiciones de operación reales.

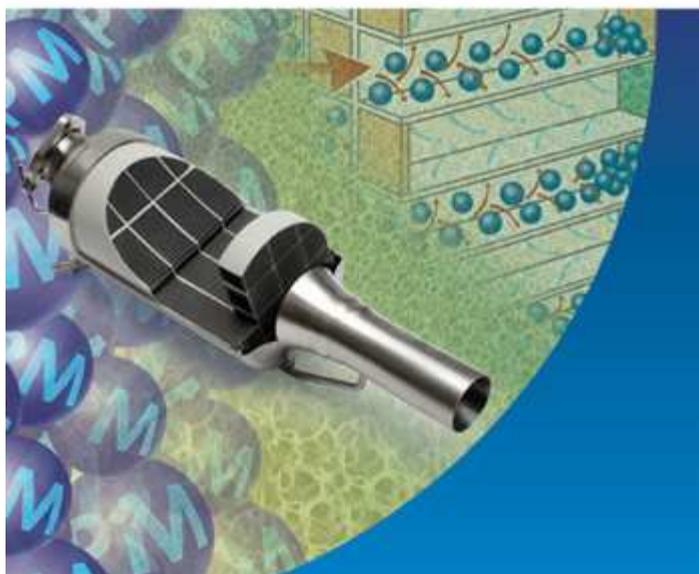


Figura 3.27 sistema de filtración de partículas diesel con aditivo.

Un sistema más elaborado es el de la reducción selectiva catalítica, que ofrece ventajas en la eliminación de cenizas, necesita como aditivo la úrea. Es un líquido no venenoso que requiere de un depósito muy grande (el combustible necesita un 3% de úrea) y una regulación electrónica para dosificar su inyección. La úrea precisa de un control regular, lo que supone renovar la actual infraestructura de surtidores. Este sistema se encuentra en vías de desarrollo, por tanto faltan varios años para que pueda ser comercializado.

3.3.2.1 Filtro MA (modular-aditivo)

El Filtro MA es un filtro de partículas diesel con sistema aditivo, este nuevo filtro de partículas diesel facilita la regeneración permanente durante la operación. Gracias a una adición aditiva inteligente y dependiente del rendimiento (Sistema ACS), el consumo del aditivo se ajusta óptimamente. Este filtro de partículas diesel cumple con las normas europeas actualmente vigentes, respecto a los límites de partículas de humo (TRGS 554, TA aire).

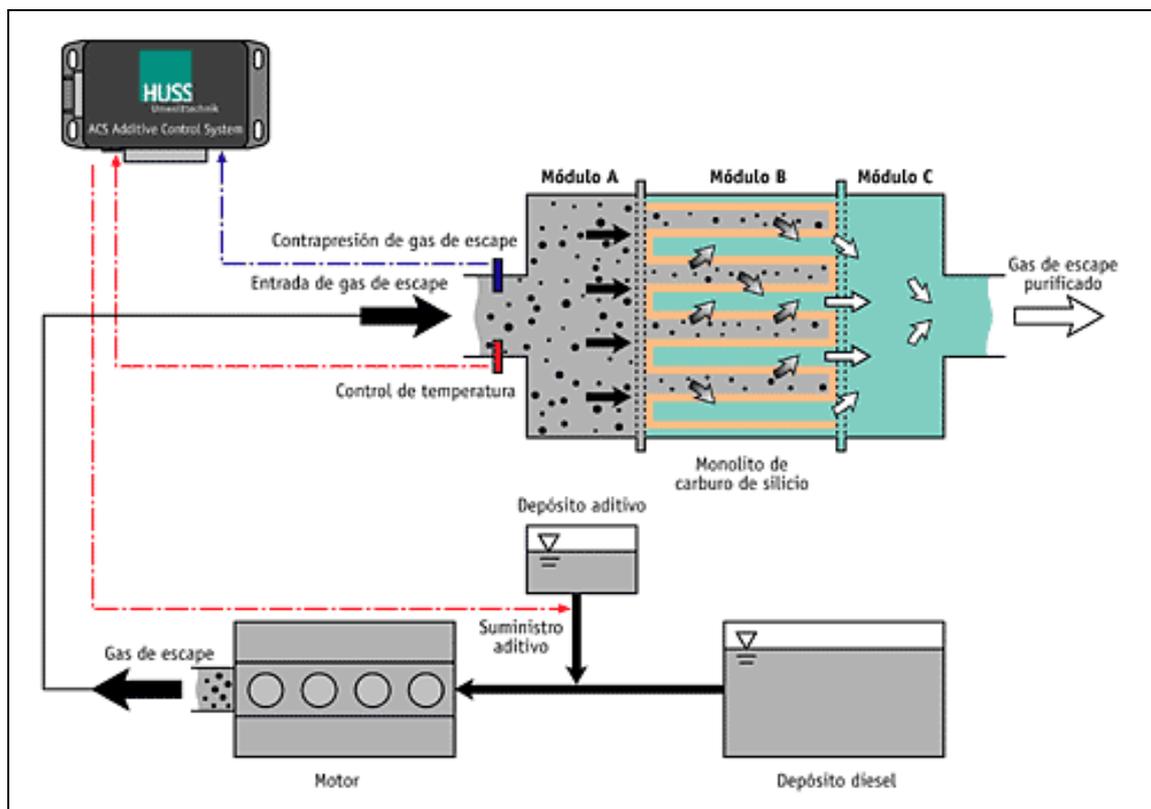


Figura 3.28. Descripción de un sistema de filtro de partículas diesel.

El filtro de partículas diesel con sistema aditivo consiste en una carcasa cilíndrica en que se ha alojado un monolito de carburo de silicio insensible a los choques. El aditivo reduce considerablemente la temperatura de ignición de los gases de escape. Aún antes de la filtración verdadera, los PM se mezclan con el aditivo, por consiguiente se logra una filtración de hasta el 99% de los gases de escape y producen sobre la superficie del filtro la reacción inofensiva de CO_2 .

3.3.3 POTENCIAL DE REDUCCIÓN DE EMISIONES

El potencial de reducción de contaminantes que ofrecen los dispositivos de control depende de varios de factores, entre los que se puede mencionar:

- Tipo de tecnología usada,
- Contenido de azufre en el combustible,
- Plan de mantenimiento e inspección.

En el mercado existen un sinnúmero de tecnologías que han sido probadas, en la tabla 3.3 se presenta los porcentajes de reducción que lograron en pruebas realizadas en distintos países.

Tabla 3.3. Porcentajes de reducción de las diferentes tecnologías probadas en programas Retrofit en otros países³⁸.

Tecnología	% de Reducción			
	PM	NO _x	HC	CO
DPF _s	70% - 90%	-	Similares al de PM	Similares al de PM
DOC _s	20% - 50%	-	50% - 90%	10% - 90%
SCR	0% - 50%	60% - 90%	50% - 90%	50% - 90%
EGR	-	hasta un 50%	-	-
CRT	88%		92%	94%.

En conclusión las tecnologías descritas pueden usarse en combinaciones entre sí. Todas estas tecnologías, excepto EGR, requieren del uso de diesel de bajo azufre (LSD), o, de preferencia, de diesel de ultra bajo azufre (ULSD), para un rendimiento óptimo. Es importante destacar que los dispositivos de control post-combustión sea cual fuese su procedencia, han sido aplicados ampliamente a motores existentes a través de programas retrofit. Los beneficios de los filtros se han reconocido mundialmente y el uso de dichos dispositivos forma parte de las estrategias para el control y la reducción de emisiones de PM provenientes de la combustión del motor de diesel, en muchas partes del mundo.

Los sistemas que se han modificado como los catalizadores de oxidación, los filtros de particulado, etc. que se montan en vehículos a diesel en uso, necesitan de una infraestructura a nivel nacional bien desarrollada para que sean una alternativa real. La disponibilidad de combustibles de bajo contenido de azufre, programas retrofit bien organizados, recursos para servicio de mantenimiento con personal calificado en los talleres, son ejemplos de condiciones sin discusión.

³⁸ California Air Resources Board, "Risk Reduction Plan to Reduce Particulate Matter Emissions From Diesel-Fueled Engines and Vehicles," September 2000

3.4 CERTIFICACIÓN DE DISPOSITIVOS POST-COMBUSTIÓN

Actualmente, existen dos programas internacionales VERT y CARB de certificación de dispositivos postcombustión.

La variedad de los dispositivos post-combustión que existen en el mercado, requieren de programas de verificación internacional, los que permitirán demostrar su factibilidad de uso, así como su incidencia en la disminución de emisiones contaminantes, estos programas de regulación oficial están diseñados con el fin de determinar las características fisicoquímicas de las emisiones que resultan tras la aplicación retrofit de filtros. La verificación se hace a través de pruebas de medición de emisiones exhaustivas las cuales están contenidas en los protocolos oficiales de dichos programas.

La EPA de EEUU también cuenta con programas de verificación, estos poseen amplia literatura científica, a continuación se describe brevemente sus características.

3.4.1 PROGRAMA DE VERIFICACIÓN VERT

El programa VERT (VERMINDERUNG DER EMISSIONENE VON REALMASCHINEN IM TUNNELBAU), "Reduciendo emisiones de motores en uso en la construcción de túneles," se inició a mediados de los años 90 como un programa de colaboración entre las agencias ocupacionales SUVA en Suiza, AUVA en Austria, la Asociación Alemana de Ingenieros de la Construcción (TBG), las agencias de protección ambiental BUWAL en Suiza, UBA en Alemania, y fabricantes de motores y filtros Europeos. Su avance ha permitido verificar miles de dispositivos para buses, camiones de carga, y equipo caminero.

El programa consiste de un conjunto de requisitos técnicos para los dispositivos y las pruebas de medición de emisiones, los cuales son revisados periódicamente para asegurar su continua eficacia conforme a la evolución de la tecnología retrofit. La verificación VERT radica de dos tipos de pruebas, la primera permite establecer la mínima reducción de emisiones PM de al menos de 90% (sistema nuevo y basado en la medición de carbón elemental, mediante el protocolo coulometric), de al menos de 85% (sistema después de 2.000

horas en uso), de al menos de 95% de las partículas finas cuando el dispositivo es nuevo (rango 10 a 500 nanómetros) y de al menos de 90% del número total de partículas después de las 2.000 horas de uso. Las emisiones de gases también se miden para establecer que no se ha registrado un incremento. Finalmente, las pruebas secundarias se enfocan en sustancias tóxicas en fase a gas como son el NO₂, las dioxinas, y los nitro-PAH y en fase partícula con medición adicional del aerosol de ácidos sulfúricos, cenizas, y fibras minerales. El programa también incluye la verificación en campo, la medición y monitoreo de la contrapresión, el ruido del motor, la durabilidad y mantenimiento del sistema motor-dispositivo, y la identificación clara de los componentes a través de “etiquetas.”

La verificación de los sistemas es coordinada por la agencia de ingeniería TTM Technik Thermische Maschinen en Suiza. Las pruebas en laboratorio se llevan a cabo en la Universidad Técnica de Biel o en la EMPA Dübendorf en Suiza en un dinamómetro de motor. Se recomiendan las pruebas en un motor pesado Euro I a inyección directa usando el ciclo de actividad ISO 8178, lubricante sintético, y combustible diesel con azufre < 50ppm. Finalmente, cabe anotar que la información VERT también incluye las estadísticas de la fallas de dispositivos, reportándose aproximadamente el 6% durante los primeros 10 años del programa, pero recientemente se ha mejorado, reduciéndose a 2.5%.

Los sistemas de control de emisiones a diesel que se certifica son: filtros con regeneración pasiva o activa, aditivos a combustibles solos o en combinación con otras estrategias.

3.4.2 PROGRAMA DE VERIFICACIÓN CARB

El programa de verificación de dispositivos de CARB fue desarrollado específicamente como uno de los componentes para la implantación del programa retrofit. Está diseñado, como el programa VERT, para verificar la efectividad del dispositivo nuevo y a largo plazo en la reducción de las emisiones PM del motor a diesel sin el incremento contraproducente de otros contaminantes. El fabricante del dispositivo tiene la responsabilidad de generar la información requerida para la verificación CARB. El proceso es iniciado con una discusión técnica con el fabricante, de las características del dispositivo; los

requerimientos de la instalación, operación, y mantenimiento; los requerimientos de combustible y de su uso seguro; las condiciones de operación favorable y el potencial de condiciones infavorables; la compatibilidad con el motor y la aplicación específica del dispositivo. Una vez aprobada la aplicación, el proceso continúa con las pruebas de medición de emisiones del dispositivo nuevo y las pruebas para determinar durabilidad. A esto le sigue la demostración en el campo.

CARB establece tres niveles de verificación. Al Nivel 1 pertenecen los dispositivos con una reducción de PM verificada mínima de 25%. El Nivel 2 y 3 corresponden a una reducción mínima de 50% y 85%, respectivamente. Estas reducciones son evaluadas a través de pruebas en dinamómetro que se pueden efectuar al motor o al vehículo completo. En el caso de las pruebas al motor, se requieren ciclos de actividad como el FTP (test steady state) o estado sostenido dependiendo de la aplicación (en y fuera de ruta).

En el caso de pruebas al vehículo, el ciclo es el ciclo de certificación UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule). El proceso incluye medición de emisiones gaseosas y de PM de acuerdo a los protocolos del reglamento para la certificación de motores. Se monitorea la contra presión y la temperatura de los gases de escape, y el ruido del dispositivo. En el caso de aditivos al combustible “combustible diesel alternativo,” se requieren estudios de medio ambiente (impacto en el aire, agua, tierra, etc.). La garantía del dispositivo, de la instalación, y del uso en el motor de acuerdo a la verificación, es típicamente entre dos a cinco años. Pruebas adicionales conforme al uso en el campo e información de pruebas de emisión adicionales se pueden pedir como parte del proceso de verificación.

Los sistemas de control de emisiones a diesel que se certifican pueden ser de cualquier tecnología como filtros, catalizadores, SCR, aditivos a combustible, combustible diesel alternativo, y otras combinaciones.

Cabe mencionar que la certificación de dispositivos es una inversión importante para el fabricante debido al rigor de las pruebas, de manera que sólo la tecnología superior y efectiva la cual es desarrollada por compañías serias y con importantes intereses en el mercado de los dispositivos avanza a través del

proceso de verificación. En California, por ejemplo, el rango de la inversión necesaria para la certificación de un dispositivo fluctúa entre los \$300.000 y \$800.000 dólares por dispositivo.

El universo de tecnología diesel retrofit que ha sido demostrada exitosamente alrededor del mundo en varios tipos de vehículos incluye dispositivos post-combustión que no han obtenido la certificación por VERT o CARB. En general, esto no significa en ningún momento que dichos dispositivos sean inferiores. La certificación internacional es perseguida por los fabricantes de dispositivos que anticipan la entrada de la tecnología al mercado en números suficientemente grandes para justificar el costo significativo de las pruebas de medición de emisiones necesarias para obtener la certificación. Además, en ciertos casos, la certificación es necesaria antes que su aplicación sea aceptada por las autoridades. En los casos en que quizás el número de dispositivos anticipados es de menor escala o por los cuales el rango de aplicación en el vehículo del dispositivo es limitado, es factible proceder con un programa retrofit con dispositivos sin certificación. En los EUA especialmente existen varios ejemplos de programas retrofit que han sido puestos en marcha exitosamente en flotas públicas en las cuales la tecnología usada no ha sido certificada. Cabe mencionar que los proveedores de dichos dispositivos, en general, son compañías con buena reputación y un largo historial de implantación de unidades retrofit en motores existentes. En estos casos, es típico para el fabricante el brindar un amplio apoyo técnico y de servicio hacia la flota en prueba. El fabricante del dispositivo participa activamente desde el estudio preliminar e inicial de los vehículos a recibir el dispositivo hasta la instalación y mantenimiento rutinario durante la implantación a escala de diseño.

La tabla 3.4 muestra algunos dispositivos postcombustión, que fueron aprobados y usados en diversos programas diseñados por la EPA, se puede apreciar datos sobre los porcentajes de reducciones verificadas y probadas en distintos niveles.

Tabla 3.4. Lista de tecnologías verificadas.³⁹

VERIFIED RETROFIT TECHNOLOGIES						
MANUF.	TECHNOLOGY	APPLICABILITY	REDUCTIONS (%)			
			PM	CO	NOx	HC
Caterpillar, Inc.	Catalyzed Converter/Muffler (CCM)	Highway, heavy-heavy and medium-heavy duty, 4-cycle, non-EGR, model year 1998 - 2003, turbocharged or naturally aspirated	20	20	na	40
Caterpillar, Inc.	Diesel Particulate Filter	Nonroad, 4-cycle, non-EGR equipped, model year 1996-2005, turbocharged engines with power ratings $130 \leq \text{KiloWatts} < 225$ ($174.2 \leq \text{Horsepower} < 301.5$)	89	90	na	93
Clean Diesel Technologies, Inc.	Platinum Plus Purifier System (fuel borne catalyst plus DOC)	Highway, medium-heavy and heavy-heavy duty, 4 cycle, model year 1988 - 2003, turbocharged or naturally aspirated	25 to 50	16 to 50	0 to 5	40 to 50
Clean Diesel Technologies, Inc.	Platinum Plus Fuel Borne Catalyst/Catalyzed Wire Mesh Filter (FBC/CWMF) System	Highway, medium-heavy duty, 4 cycle, model year 1991 - 2003, non-EGR, turbocharged or naturally aspirated	55 to 76*	50 to 66*	0 to 9*	75 to 89*
Donaldson	Series 6000 DOC & Spiracle (closed crankcase filtration system)	Highway, heavy-heavy and medium-heavy duty, 4 cycle, non-EGR, model year 1991 - 2003, turbocharged or naturally aspirated	25 to 33 ^a	13 to 23	n/a	50 to 52
Donaldson	Series 6100 DOC	Highway, heavy-heavy and medium-heavy duty, 4 cycle, non-EGR, model year 1991 - 2003, turbocharged or naturally aspirated	20 to 26	38 to 41	n/a	49 to 66
Donaldson	Series 6100 DOC & Spiracle (closed crankcase filtration system)	Highway, heavy-heavy and medium-heavy duty, 4 cycle, non-EGR, model year 1991 - 2003, turbocharged or naturally aspirated	28 to 32 ^a	31 to 34	n/a	42
Engelhard	DPX Catalyzed Diesel Particulate Filter	Highway, heavy-duty, 4 cycle, model year 1994 - 2002, turbocharged or naturally aspirated	60	60	n/a	60

³⁹ <http://www.epa.gov/otaq/retrofit/retroverifiedlist.htm>

Engelhard	CMX Catalyst Muffler	Heavy Duty, Highway, 2 cycle engines	20	40	n/a	50
Engelhard	CMX Catalyst Muffler	Heavy Duty, Highway, 4 cycle engines	20	40	n/a	50
International Truck & Engine Corp.	Green Diesel Technology-Low NOx Calibration plus Diesel Oxidation Catalyst with Ultra Low Sulfur Diesel (ULSD)	Highway Light Heavy-Duty, 4-cycle, Navistar/International engines, model years 1999 - 2003 in the following families: XNVXH0444ANA, YNVXH0444ANB, 1NVXH0444ANB, 2NVXH0444ANB, 3NVXH0444ANB	0 to 10	10 to 20	25	50
Johnson Matthey	Catalyzed Continuously Regenerating Technology (CCRT) Particulate Filter	Highway, heavy-heavy, medium-heavy, light-heavy duty, urban bus, 4-cycle, non-EGR model year 1994 - 2003, turbocharged or naturally aspirated engines.	60	60	n/a	60
Johnson Matthey	Continuously Regenerating Technology (CRT) Particulate Filter	Heavy Duty, Highway, 2 & 4 cycle, model year 1994 - 2002, turbocharged or naturally aspirated engines	60	60	n/a	60
Johnson Matthey	CEM™ Catalytic Exhaust Muffler and/or DCC™ Catalytic Converter	Highway, heavy-heavy, medium-heavy, light-heavy duty, non-urban bus, 4-cycle, non-EGR model year 1991 - 2003, turbocharged or naturally aspirated engines	20	40	n/a	50
Johnson Matthey	CEM Catalyst Muffler	Heavy Duty, Highway, 2 cycle engines	20	40	n/a	50
Lubrizol	PuriNOx Water emulsion fuel	Heavy Duty, Highway & Non-road, 2 & 4 cycle	16 to 58	-35 to 33	9 to 20	-30 to -120
Lubrizol Engine Control Systems	Purifilter - Diesel Particulate Filter	Highway: Heavy Heavy-Duty, Medium Heavy-Duty; Urban Bus; 4 cycle; model years 1994 - 2003; turbocharged or naturally aspirated; non-EGR engines	90	75	n/a	85
Lubrizol Engine Control Systems	AZ Purimuffler or AZ Purifier Diesel Oxidation Catalyst with Low Sulfur Diesel Fuel (30 ppm S max)	Highway Medium Heavy-duty, 4-cycle, model years 1991 - 2003 Cummins and Navistar/International engines originally manufactured without any aftertreatment which are turbocharged or naturally aspirated,	40	40	n/a	70

		non-EGR engines				
Lubrizol Engine Control Systems	AZ Purimuffler or AZ Purifier Diesel Oxidation Catalyst with Low Sulfur Diesel Fuel (30 ppm S max)	Highway Heavy Heavy-Duty, 4-cycle, model years 1991 - 1993 Cummins engines originally manufactured without exhaust aftertreatment which are turbocharged or naturally aspirated, non-EGR engines	35	40	n/a	70
Lubrizol Engine Control Systems	AZ Purimuffler AZ Purifier	Heavy Duty, Highway, 2 cycle engines	20	40	n/a	50
Lubrizol Engine Control Systems	AZ Purimuffler AZ Purifier	Heavy Duty, Highway, 4 cycle engines	20	40	n/a	50
Various	Biodiesel (1 to 100%)	Heavy Duty, Highway, 2 & 4 cycle	0 to 47	0 to 47	0 to -10	0 to 67
Various	Cetane Enhancers	Heavy Duty, Highway, 4 cycle, non-EGR-equipped	n/a	n/a	0 to 5	n/a

a - Total PM reduction figures reflect reductions from both tailpipe and crankcase emissions.

* - These effectiveness figures are provisional values subject to change pending final review of the test data.

Note: For after-treatment devices the reductions are based on the installation of retrofits to engines that were originally produced without diesel oxidation catalysts or diesel particulate filters.

3.5 EFECTO DEL AZUFRE EN LOS DISPOSITIVOS POST COMBUSTIÓN

Como ya se mencionó, la combustión del diesel produce partículas sólidas en forma de hollín que dan lugar a humos negros, hidrocarburos no quemados, óxidos de nitrógeno y anhídrido sulfuroso y material particulado procedente del azufre contenido en el combustible. El azufre no sólo afecta a la emisión de material particulado (PM_{10} , $PM_{2.5}$ y $PM_{1.0}$) y contaminantes tóxicos, al unirse con el agua forma ácido sulfúrico, lo que provoca la lluvia ácida produciendo daños en plantas y bienes materiales, y se ha comprobado que destruye los sistemas de control de emisiones, por lo que en los diferentes países se está trabajando para obtener combustibles con bajo contenido de azufre (USLD).

Es importante destacar que el SO_2 producto de la oxidación del azufre, en su fase gaseosa se puede transformar en precursor de otros contaminantes de naturaleza sulfúrica, los cuales se someten a un mecanismo de nucleación binaria con el vapor de agua, además generan los núcleos de las nanopartículas los que a su vez absorben los hidrocarburos de la fracción FOS.

Para los diferentes porcentajes de azufre en el combustible, las características del modo de acumulación varían en un rango de aproximadamente 50 nanómetros a 0.3 mm, este tipo de distribución de tamaño de partículas es equivalente a la cantidad de PM medido reglamentariamente para todo motor diesel.

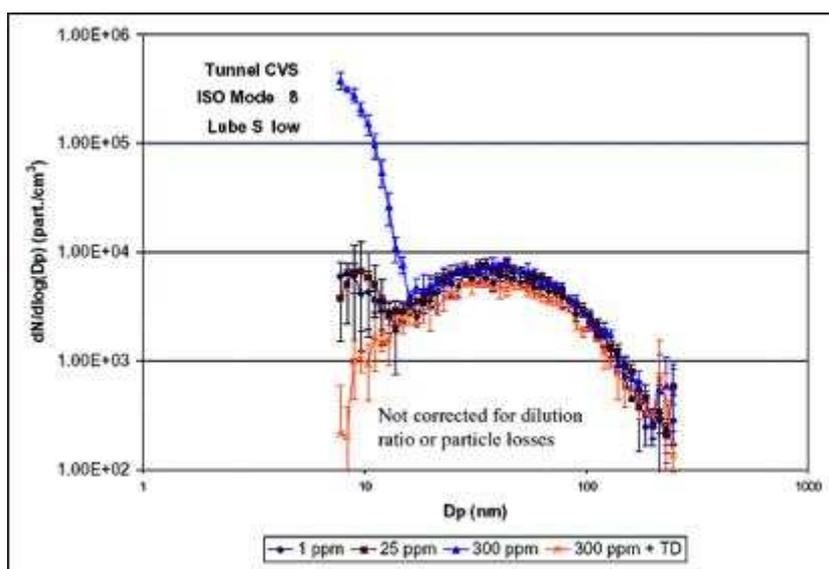


Figura 3.29 Influencia del contenido de azufre del combustible. Pruebas a motor pesado 1200 rpm a carga de 50%⁴⁰

Los resultados de pruebas realizadas en dinamómetro de motor a 1500 rpm y carga media, muestran la distribución de las partículas según la concentración de azufre en el combustible, se probó con: 300 ppm (color azul claro), 25 ppm (color café), 1 ppm (color azul marino) de azufre y 300 ppm + TD (thermodenuder) que representa el uso de un sistema de acondicionamiento a alta temperatura (color anaranjado).

El efecto del contenido de azufre del combustible diesel en los dispositivos retrofit ha sido investigado debido al impacto importante que el azufre puede tener en su efectividad. En la figura 3.30 se presenta el impacto negativo que el azufre tiene sobre la capacidad de un dispositivo retrofit avanzado para controlar las emisiones de varios contaminantes.

⁴⁰ Kittelson, D., Centro de Investigación del Diesel, Universidad de Minnesota

En pruebas efectuadas en dispositivos de diferentes tecnologías, donde el dispositivo A es un filtro catalizador, el dispositivo B es un sistema que utiliza un catalizador antes del filtro donde la función principal es la oxidación de NO, y el dispositivo C es un filtro activo que requiere el uso de aditivo catalizador al combustible (FBC), dichas pruebas se las realizó en un dinamómetro de chasis siguiendo lineamientos formales de la CARB para su certificación, los resultados revelaron el nivel diferente de reducción de emisiones obtenido por las tecnologías investigadas y el mejoramiento del control de las emisiones de PM conforme se disminuye el contenido de azufre.

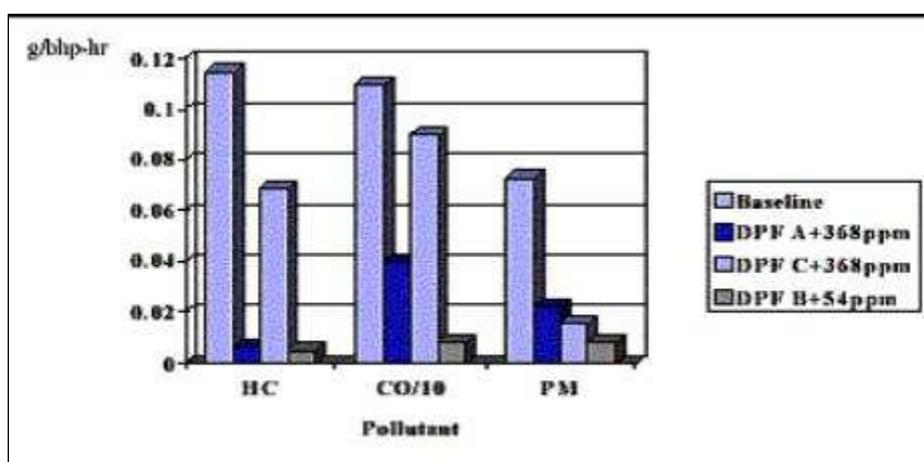


Figura 3.30. Influencia del azufre en el combustible en la efectividad del dispositivo retrofit. Pruebas a motor a diesel pesado sobre FTP⁴¹

En este estudio, dos de las tecnologías investigadas (DPF A y DPF C) utilizaron diesel con un alto contenido de azufre (368 ppm) y, sin embargo, la reducción de las emisiones PM fue posible con gran efectividad, mientras que el dispositivo C basado en el uso del FBC (aditivo catalizador al combustible) se aproxima en efectividad al dispositivo más avanzado que requiere combustible de bajo azufre. Es por esta razón que en Europa, los dispositivos asistidos por FBC han estado ganando mercado y parece ser la tendencia futura para los motores diesel.

⁴¹ Manufacturers of Emission Controls Association, "Demonstration of Advanced Emission Control Technologies Enabling Diesel Powered Heavy-Duty Engines To Achieve Low Emission Levels." Final Report. June 1999

En conclusión, los resultados presentados determinan la importancia del contenido de azufre en el combustible diesel y la dinámica del proceso de formación de las emisiones y partículas ultrafinas, siendo estos factores importantes para el diseño adecuado del programa de pruebas para la aceptación de dispositivos retrofit.

3.5.1 EFECTOS DEL AZUFRE EN EL DOC_s⁴²

Para determinar la capacidad de reducción de los DOC_s, se realiza pruebas para diversos porcentajes de azufre en el diesel, siendo estos 368 ppm, 54 ppm y 0 ppm de azufre. El catalizador durante las pruebas será combinado con y sin FBC (aditivo catalizador al combustible), así como un sistema de recirculación de gases (ERG) lo que determina el efecto de la combinación en la reducción de emisiones de PM, NO_x y HC.

Los resultados obtenidos reportaron que, para el diesel de 54 ppm de azufre y cualesquiera de las combinaciones mencionadas, se logra una reducción de PM entre el 23 a 29%, los HC presentan una reducción de 52 a 88% y el CO de 13 a 68%, además se logra una reducción de 53% de hidrocarburo poliaromáticos.

En tanto los resultados obtenidos de las pruebas realizadas para un catalizador de oxidación con FBC y un diesel de 368 ppm, muestran una reducción de PM en 42%, CO 53% y HC 59%. En conclusión el catalizador mejora su eficiencia al ser combinado con FBC.

Los resultados logrados al analizar la combinación de EGR, DOC y FBC para cualquier porcentaje de azufre, muestra un incremento de PM de 33%, aunque el CO y HC se reducen 33 y 46% respectivamente.

En conclusión el programa de pruebas reveló que si el DOC es probado con un diesel de con bajo contenido de azufre las emisiones de partículas están entre 0.045 y 0.038 g/bhp-hr. Se determinó cómo se relaciona la reducción de

⁴² Demonstration of advanced emission control technologies enabling diesel-powered heavy-duty engines to achieve low emission levels, MECA (Manufacturers of Emission Controls Association 1660 L Street, NW Suite 1100 Washington, DC 20036)

emisiones de partículas a la actividad del catalizador y que el contenido de azufre influye en la actividad del catalizador.

3.5.2 EFECTOS DEL AZUFRE EN LOS DPF_s

Estudios realizados por la PSA Peugeot Citroën han identificado tres efectos negativos que el azufre produce en los filtros de partículas como son:

1. El sulfato es formado en la oxidación catalítica cuando está localizada corriente arriba del DPF. Esto incrementa la caída de presión a través del DPF y se requiere una regeneración mas frecuente, esto afecta al consumo de combustible.
2. Cuando ocurre la regeneración, el sulfato en el filtro se descompone y es parcialmente convertido en dióxido de azufre (SO₂). Si un catalizador es ubicado a continuación del filtro, lo cual se está desarrollándose en los sistemas post tratamiento hacia el futuro, el SO₂ es oxidado a SO₃, esta molécula altamente higroscópica puede reaccionar con el agua para formar humo blanco. Este fenómeno es considerado aceptable y sólo ocurre cuando el combustible usado contiene más de 30 ppm de azufre.
3. El SO₂ en los gases de combustión es convertido en sulfatos debido a la oxidación catalítica corriente arriba en el DPF. En condiciones de estado estable a velocidades más altas que 100 y 120 km/h el SO₃ permanece como un gas. Estas pasan a través del DPF y se condensan corriente abajo formando partículas secundarias que pueden ser pesadas y medidas. Para prevenir la presencia de los sulfatos es necesario bajar el contenido de azufre en el combustible.

3.5.3 EFECTOS DEL AZUFRE EN LOS CRT_s

Existen dos problemas básicos con el azufre y los CRT_s. El azufre en el diesel decrece la conversión de NO a NO₂. Sin embargo, altos niveles de azufre en el diesel disminuye la temperatura de regeneración requerida por el CRT para la combustión de las partículas y entonces acorta la regeneración del filtro. La operación con combustibles de alto contenido de azufre puede causar que el

filtro se sature con las partículas, lo que provoca una combustión no controlada, pudiendo dañar los materiales del filtro debido al sobre calentamiento.

El fabricante de los catalizadores para CRT Jhonson Matthey, recomienda utilizar sistemas con combustibles de no más de 50 ppm de azufre. Actualmente existen tecnologías para regeneración de sistemas CRT_S que utilizan 20 ppm de azufre como máximo. Los fabricantes de vehículos muestran datos donde se indica la necesidad de combustibles libres de azufre para estas tecnologías.

3.5.4 EFECTOS DEL AZUFRE EN LOS SISTEMAS SCR

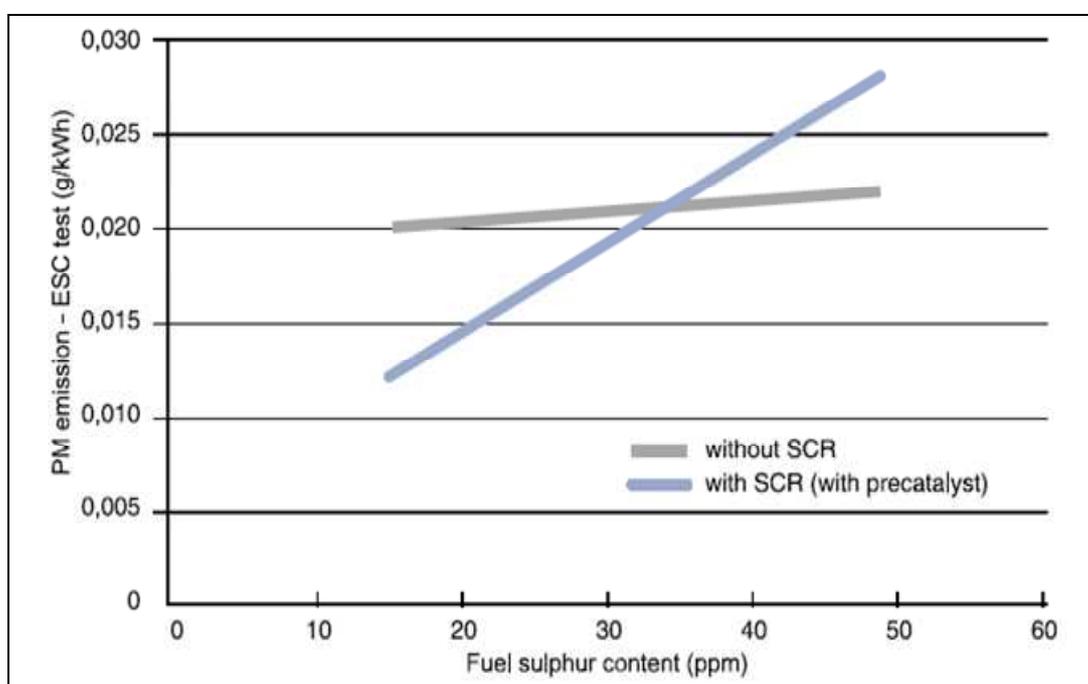


Figura 3.31. Efecto del contenido de azufre en el diesel en las emisiones de PM usando el sistema SCR – IVECO.⁴³

El sistema SCR opera conjuntamente con un pre-catalizador de oxidación donde se oxida el HC, CO y SOF del PM. Su eficiencia depende del incremento del contenido de azufre en el combustible, en la figura 3.31 se muestra la alta sensibilidad del SCR ante la presencia de azufre en el diesel. Las emisiones van de 0.027 g/kWh a 0.012 g/kWh operando con un diesel de 50 ppm y 15 ppm.

⁴³ ACEA data of the sulphur effect on advanced emission control technologies

3.6 APLICACIÓN DE LA TECNOLOGÍA POSTCOMBUSTIÓN

El uso de tecnologías postcombustión, está dirigida a la reducción de los gases contaminantes, así como el uso de combustibles limpios. Desde hace algunos años se vienen realizando pruebas para determinar su capacidad de reducción, así como las condiciones bajo las cuales debe trabajar para evitar no sólo la falla del dispositivo, sino también la del motor, por lo que se hace necesario determinar los marcos técnicos para evaluar su efectividad en condiciones reales de trabajo, las mismas que dependen del país a ser probadas.

En la tabla 3.5 se resume la aplicación de los dispositivos postcombustión en diversos países.

Tabla 3.5 Experiencia de la utilización de dispositivos postcombustión.

País	Flota	Tipo de dispositivo	Durabilidad
Suiza	6500 buses	DPF _s de regeneración pasiva	~ 10 años
Estados Unidos (California y New York)	3500 buses	DPF _s	~10 años
Hong Kong	~3000 buses	DOC _s	~ 10 años
Alemania	~ 22 buses	CRT	< 10 años
Japón		DPF, CRT, CSF	~ 10 años
El resto de Europa	~ 3000 buses	CRT	~ 10 años
Chile	~ 5000 buses	CRT, DPF	~ 5 años

Como se observa la tecnología retrofit se la viene aplicando desde hace algún tiempo, en conclusión el objetivo de este tipo de programas es obtener flotas de buses limpios y combustibles con bajo contenido de azufre, lo que genera una disminución notable de la contaminación del medio ambiente, así como las enfermedades y muertes provocadas por las mismas.

Desde el punto de vista técnico y científico, la aplicación de tecnologías postcombustión en el DMQ es una alternativa viable para controlar la contaminación ambiental producto de los gases de combustión provenientes de los vehículos con motor diesel.

CAPITULO IV

SELECCIÓN DE DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTIÓN

4.1 INTRODUCCIÓN

El uso de la tecnología retrofit, descrita en el capítulo 3, es una de las estrategias que se aplica en varios países para disminuir la contaminación, por lo que se la considera como una alternativa de control y disminución de los gases contaminantes, en especial el PM_{10} , provenientes de los vehículos a diesel, siendo factible aplicar a los que circulan en el DMQ. Para su aplicación se deben establecer las características del parque automotor, tipo de combustible, topografía de la ciudad, las mismas que permiten diseñar él o los dispositivos postcombustión acordes a esta realidad.

En este capítulo, se establecen los criterios necesarios para la selección adecuada de los dispositivos postcombustión factibles a aplicarse en la flota vehicular diesel de transporte público urbano que circula en el DMQ.

4.2 SELECCIÓN DEL DISPOSITIVO POSTCOMBUSTIÓN

El estudio previo a la selección de cualquier tecnología postcombustión, se basa en:

- Análisis costo – beneficio de la implantación, y
- Selección técnica de los dispositivos.

4.2.1 ANALISIS COSTO – BENEFICIO (C/B)

El análisis Costo – Beneficio, permite definir la factibilidad de la aplicación de dispositivos retrofit en el DMQ.

Para establecer la relación C/B, es necesario un análisis de los distintos factores que se consideran para la determinación del costo del programa con respecto a la implantación del mismo, este análisis se basa en información publicada, sobre la experiencia en Suiza, de la experiencia en California y de la Ciudad de México.

A continuación se presenta un análisis de los costos totales de la implantación, además se estima los beneficios que se lograría en función del tiempo de aplicación de la medida considerando además criterios sociales.

4.2.1.1 Costos totales.

Para determinar el costo total se definen los costos fijos y los costos variables.

4.2.1.1.1 Costos fijos de la aplicación de un dispositivo postcombustión en el DMQ.

Los costos fijos dependen de:

- Compra e instalación del dispositivo
- Costo del equipo auxiliar de control y monitoreo.

En la tabla 4.1 se presenta algunas estimaciones de costo de las tecnologías, las mismas que pueden variar dependiendo de las necesidades del programa y características del parque automotor; por ejemplo: una alta demanda permitiría la reducción del precio del dispositivo de control de emisiones instalado en un bus nuevo y su costo será menor en comparación al que se obtendría con una modificación. Los siguientes rangos de precios se refieren a los costos de inversión del equipo.

Tabla 4.1 Estimación de costos de tecnologías post combustión⁴⁴.

EQUIPAMIENTO TÉCNICO	COSTOS DE INVERSIÓN (USD)
Filtros de particulado diesel (DPFs):	6.000 - 10.000
Catalizadores de oxidación diesel (DOCs):	1.000 - 3.000
Recirculación de gases de escapes (EGR):	800 - 1.500
Reducción catalítica selectiva (SCR):	10.000 - 35.000

Establecido el costo del dispositivo, se determina el costo que implica su instalación, este depende del vehículo seleccionado.

En la tabla 4.2 se presentan los rangos que se obtuvo de estudios realizados en Suiza y California, sobre el costo que implica la aplicación e instalación de filtro

⁴⁴ www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/propertyvalue-19514.html

de partículas diesel (DPF) para lograr una reducción mínima del 85% en emisiones PM₁₀ en vehículos tipo Euro 2.

Tabla 4.2. Costo total fijo de compra e instalación del dispositivo postcombustión y su sistema de control, en Suiza y California pronosticados para los años 2003 a 2005.⁴⁵

	Costos en Suiza (USD)		Costos en California (USD)	
	min.	máx.	min.	máx.
Costo del dispositivo en el mercado	3286	8571	1900	9500
Instalación del dispositivo	714	1.071	13	563
Sistema de control del dispositivo	714	714	130	150
Costo total fijo por dispositivo	4714	10357	2043	10213

Tabla 4.3. Costo total fijo de compra e instalación del dispositivo postcombustión y su sistema de control para el DMQ.

	Costos en Suiza (USD)		Costos en DMQ (USD)	
	min.	máx.	min.	máx.
Costo del dispositivo en el mercado	3286	8571	4600	11999
Instalación del dispositivo	714	1071	714	1071
Sistema de control del dispositivo	714	714	714	714
Costo total fijo por dispositivo	4714	10357	6028	13784

En la tabla 4.3 se indica el costo que implica la compra e instalación de dispositivos postcombustión en DMQ, para determinar dichos costos se toma como referencia los valores dados por Suiza y se usa el impuesto dado para nacionalizarlo (40%⁴⁶). En cuanto a los costos de instalación y sistema de control se asume un valor similar.

⁴⁵ Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscapare (SAEFL), "Particulate traps for heavy duty vehicles," Environmental Documentatino No. 130. Air. <http://www.admin.ch/buwal/publikat/d/>. 2000.

⁴⁶ Valor definido por el Sistema de Aduanas del Ecuador.

Establecido el costo fijo total que implica instalar tecnologías postcombustión en el DMQ, es indispensable definir los costos que se generan durante su funcionamiento, es decir los costos variables.

4.2.1.1.2 Costos variables de la aplicación de dispositivos postcombustión en el DMQ

Los costos variables son:

- Costo de mantenimiento del dispositivo postcombustión,
- Costo de operación (regeneración del dispositivo postcombustión).

Los costos variables que implica la aplicación de este tipo de dispositivos en el DMQ, se los establece tomando como referencia los resultados obtenidos del estudio en Suiza y California, tabla 4.4.

Tabla 4.4. Costo anual de operación y mantenimiento de dispositivos postcombustión en Suiza y California pronosticados para los años 2003 a 2005⁴⁷.

	Costo anual de instalación y seguimiento			
	Costo Suiza (USD/año)		Costo California (USD/año)	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Operación del dispositivo	810	1890	199	170
Mantenimiento del dispositivo y vehículo.	358	358	155	776
Costo total por año	1168	2248	354	946

Para elaborar la tabla 4.5 se asume que los costos variables son los mismos que en Suiza y se supone que las características del parque automotor diesel es similar.

⁴⁷ Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscpare (SAEFL), "Particulate traps for heavy duty vehicles," Environmental Documentatino No. 130. Air. <http://www.admin.ch/buwal/publikat/d/>. 2000.

Tabla 4.5 Costos variables del uso de dispositivos postcombustión en el DMQ.

	Costo Suiza (USD/año)		Costo DMQ (USD/año)	
	Min.	Máx.	Min.	Máx.
Operación del dispositivo	810	1890	810	1890
Mantenimiento del dispositivo y vehículo.	358	358	358	358
Costo total variable por año	1168	2248	1168	2248

4.2.1.2 Valoración económica de la reducción de emisiones de PM₁₀

Estudios realizados por el Banco Mundial presentan los efectos causados por la emisión de PM₁₀, así como los beneficios que se lograría con su reducción en la población de distintas ciudades del mundo.

4.2.1.2.1 Efectos:

Morbilidad: Irritación de ojos, enfermedades respiratorias, efectos cardiovasculares, bronquitis crónica, días de actividad restringida.

Mortalidad: Aguda y crónica

Estimaciones recientes del aumento de mortalidad diaria indican que, en una escala mundial, del 4% al 8% de las muertes prematuras se deben a la exposición a material particulado y que alrededor del 20% al 30% de las enfermedades respiratorias se deben a la contaminación del aire. Los estudios realizados en México sobre los efectos de la contaminación por PM₁₀ en la mortalidad indican que el incremento del 1.4% en la mortalidad por cada 10 µg/m³ en la concentración de PM₁₀, mientras que en los EUA se verifica un incremento del 0.5% en la mortalidad por cada 10µg/m³ de PM₁₀.⁴⁸

⁴⁸ Organización Mundial de la Salud - Guías para la Calidad del Aire, 2002

4.2.1.2.2 Beneficios:

La evaluación de los beneficios económicos que se generan por la reducción de enfermedades asociadas con la contaminación atmosférica en especial del PM_{10} , dependen:

- El costo de enfermedad es decir todos los costos directos de una enfermedad;
- Pérdida de productividad que son los días de trabajo que se pierden por enfermarse; y
- La disponibilidad de pago siendo esta la cantidad que un individuo está dispuesto a pagar para reducir un riesgo.

Según el Programa de Verificación Vehicular de la Zona Metropolitana del Valle de México, en ésta circula un total de 3260919 vehículos de los cuales el 0.38% corresponde al parque automotor diesel (12505 autobuses).

En el año 2003 se registró que la emisión de PM_{10} proveniente de las fuentes móviles a diesel fue de 7133 ton/año, es decir el 0.35% del total de emisiones de PM_{10} provenientes de las diversas fuentes como: vegetación y suelos, aéreas y puntuales. Datos provenientes de PROAIRE, la reducción de emisiones estimada, con respecto a la línea base, de autobuses, al año 2010 será de 6362 ton/año de NO_x , 1012 ton/año de HC y 640 ton/año de PM_{10} , mientras que el Banco Mundial reporta 10017 ton/año de NO_x ; 3217 ton/año HC; 640 ton/año de PM_{10} ; 5,694 ton/año CO y 1597 ton/año de SO_2 .⁴⁹

La evaluación del costo de la contaminación en Ciudad de México se centró en costos médicos directos, como medicinas, consultas hospitalarias y reducción de la productividad (ingresos perdidos por los enfermos). Expertos en la calidad del aire y exposición a éste, epidemiólogos y especialistas de salud pública, economistas y estadísticos evaluaron una amplia gama de beneficios en salud y ahorros, como la disposición de la población a pagar por una mejor atención médica y una vida potencialmente más larga. La investigación concluyó que la

⁴⁹ Co-Control of Urban Air Pollutants and Greenhouse Gases in Mexico City – Appendices, J. Jason West, Patricia Osnaya, Israel Laguna, Julia Martinez, and Adrián Fernández February 2003

reducción de PM_{10} traería beneficios sanitarios y financieros, ya que la reducción de un microgramo por centímetro cúbico ($1\mu\text{m}/\text{cm}^3$) representaría el ahorro de 100 millones de dólares al año. La reducción del 10% de 640 toneladas de PM_{10} ahorraría 760 millones de dólares anuales, lo que representa un beneficio de 10 dólares por cada kilogramo de PM_{10} reducido por bus. En términos humanos, esto implicaría por ejemplo que, en 2010, hubiera 33287 consultas y 4188 ingresos hospitalarios menos por trastornos respiratorios. Además, se impediría anualmente la muerte de 266 infantes, un punto importante no expresable en dinero.⁵⁰

4.2.1.3 Estimación de la reducción de PM_{10} del parque automotor diesel del DMQ.

Para determinar el beneficio económico que se produciría en el DMQ con la reducción del PM_{10} se necesita determinar la línea base de emisiones a la cual están expuestos los habitantes y sobre la cual los dispositivos postcombustión procederán.

A continuación se presenta la proyección aproximada de las emisiones de PM_{10} , en los siguientes 10 años, a partir del 2005, para lo cual se utilizan los coeficientes técnicos utilizados por la REMMAQ en el inventario de emisiones anual, así como el total de autobuses que circulan en el DMQ, el mismo que hace referencia a los datos que tiene la EMSAT.

En este análisis se consideran los siguientes parámetros:

- Días de actividad del autobús, (DA)⁵¹
- Factor de emisión de PM_{10} ,
- Kilómetros anuales que recorre un autobús en una ruta promedio.
- Proyección del parque automotor diesel hasta el 2014.

$$DA = 6 * 52 + 1 = 313 \quad (4.1)$$

⁵⁰ [Technical Paper: Evaluation of Human Exposure to Ambient PM10 in the Metropolitan Area of Mexico City Using a GIS-Based Methodology](#)

⁵¹ Dato tomado del inventario de emisiones de la REMMAQ.

El factor de emisión de PM₁₀ para vehículos a diesel es 1,5(g/km)⁵², este valor es similar al que utiliza México en su inventario de emisiones, debido a las características geográficas, así como la similitud de su parque automotor.

Del estudio realizado en 12 autobuses que circulan en diferentes rutas del DMQ, se establece que la ruta promedio que recorre un autobús es de aproximadamente 33.2km (ida y vuelta), realizando 6 vueltas al día, con lo que se determina que su recorrido total es 199.4 km/día. En la tabla 4.6 se presenta los resultados obtenidos en el estudio, se indica la ruta y los kilómetros que el bus recorre diariamente en su ciclo real de trabajo.

Tabla 4.6 Resultados del estudio realizado (kilómetros recorridos diariamente por ruta).

MARCA	OPERADORA	RECORRIDO	
		RUTA	(km/día)
Isuzu CHR	Bellavista	San Juan - Pintado	156.0
Isuzu CHR	Bellavista	Colón – Camal	181.3
Isuzu FTR	San Cristóbal	La forestal – Bellavista	174.6
Volkswagen	6 de Diciembre	Barrionuevo – La Gasca	190.2
Volkswagen	San Francisco	Hospital Militar – La Merced (Chillogallo)	228.0
Volkswagen	San Francisco	24 de Mayo – La independencia (Chillogallo)	169.8
Volkswagen	Latina S.A.	Vicentina – Registro Civil	213.6
Mercedes Benz	6 de Diciembre	Villaflora – San Martín	172.8
Mercedes Benz	San Cristóbal	La Marín – San Luis	198.8
Mercedes Benz	San Cristóbal	La Marín – Ciudadela Ibarra	217.0
Hino GD	San Cristóbal	La Marín – San Luis	198.8
Hino GD	Latina S.A.	La Marín – 23 de Mayo (Chillogallo)	174.0
Hino FF	San Cristóbal	La Forestal – Bellavista	174.6

Fuente: Elaboración del autor.

⁵² Dato tomado del inventario de emisiones de la REMMAQ.

Los kilómetros recorridos anualmente (KM) en un bus es:

$$KM = 199.4 * 313 = 62424.7 \text{ (km / año)}$$

Para determinar la proyección del parque automotor diesel en los próximos diez años, se aplica la tasa de crecimiento anual estimada por la AEADE, siendo ésta del 4.86% para los autobuses en el 2005, además se estima que cada año el 3%⁵³ de estos cumplen con su periodo de vida útil (20 años) y por ende están obligados a salir de circulación del DMQ, con esta medida se pretende regular el parque automotor diesel.

Tabla 4.7 Proyección del parque automotor diesel del DMQ.

AÑO	AUTOBUSES	km/año
2005	2495	155749676
2006	2540	158553170
2007	2586	161407127
2008	2632	164312455
2009	2680	167270080
2010	2728	170280941
2011	2777	173345998
2012	2827	176466226
2013	2878	179642618
2014	2930	182876185

Fuente: Elaboración del autor.

Con la información de las proyecciones del parque automotor, el coeficiente de emisión (1.5 g/km) y asumiendo un crecimiento despreciable para las emisiones de PM₁₀ en las fuentes fijas, se proyecta la línea base de emisiones para el parque automotor diesel sin la aplicación de dispositivos postcombustión, a continuación se presenta una proyección de las toneladas de PM₁₀ que se emitirán desde el 2005 hasta el 2014.

⁵³ Co-Control of Urban Air Pollutants and Greenhouse Gases in Mexico City – Appendices, J. Jason West, Patricia Osnaya, Israel Laguna, Julia Martinez, and Adrián Fernández February 2003

Para establecer la cantidad de contaminante (PM₁₀) emitido al año, se aplica la siguiente formula:

$$M = FE * 10^{-6} * KM^{54} \quad (4.2)$$

Donde: M: Cantidad de contaminante emitido al año (ton/año)

FE: Factor de emisión del autobús (g/km)

KM: Distancia recorrida al año (km/año)

Tabla 4.8. Proyección de las emisiones de PM10 del parque automotor diesel, hasta el 2014.

AÑO	km/año	línea base (ton/año)
2005	155749676,4	233,62
2006	158553170,6	237,83
2007	161407127,6	242,11
2008	164312455,9	246,47
2009	167270080,2	250,91
2010	170280941,6	255,42
2011	173345998,5	260,02
2012	176466226,5	264,70
2013	179642618,6	269,46
2014	182876185,7	274,31

Fuente: Elaboración del autor.

Establecida la línea base de emisiones de PM₁₀, se determina la reducción que se obtendría al aplicar dispositivos postcombustión de características similares pero de eficiencia diferente, para el análisis y la elaboración de la tabla 4.9, se establecen dos escenarios. En el primer escenario se asume una reducción del 50% de las emisiones, lo que significa una reducción de las emisiones desde 1.5 a 0.75 g/km, mientras que en el segundo escenario la reducción es del 85%, por tanto la reducción es de 1,5 a 1.28 g/km. Las diferencias entre la línea base y las emisiones determinadas en los distintos escenarios, presenta el nivel

⁵⁴ Dato tomado del inventario de emisiones de la REMMAQ.

de reducción de emisiones generado con la aplicación de dispositivos postcombustión en cada año.

Como se estableció en el capítulo 3 el contenido de azufre en el diesel es un factor importante para lograr reducciones mayores, por lo tanto se supone que en ambos escenarios se utilizará diesel premium⁵⁵ (500 ppm de azufre).

Tabla 4.9. Proyección de la reducción de PM₁₀, para el periodo 2005 – 2014, al aplicar dispositivos postcombustión con eficiencias de 50 y 85%, sobre la línea base de emisiones.

AÑO	Línea base (ton/año)	Emisiones totales (ton/año)		Reducciones (ton/año)	
		M1 (50%)	M2 (85%)	R1 (50%)	R2 (85%)
2005	233,62	116,81	35,82	116,8	197,80
2006	237,83	118,91	36,47	118,9	201,36
2007	242,11	121,06	37,12	121,1	204,99
2008	246,47	123,23	37,79	123,2	208,68
2009	250,91	125,45	38,47	125,5	212,43
2010	255,42	127,71	39,16	127,7	216,26
2011	260,02	130,01	39,87	130,0	220,15
2012	264,70	132,35	40,59	132,3	224,11
2013	269,46	134,73	41,32	134,7	228,15
2014	274,31	137,16	42,06	137,2	232,25

Fuente: Elaboración del autor.

4.2.1.4 Estimación del beneficio económico de la reducción de PM₁₀ del parque automotor diesel del DMQ

El análisis costo-beneficio de la aplicación de dispositivos postcombustión como medida de descontaminación presupone que los beneficios de la medida se pueden cuantificar, la misma que resulta de la reducción de las concentraciones de PM₁₀. Cabe añadir que, como en cualquier análisis económico, los

⁵⁵ Diesel expedido en el DMQ por Ordenanza Metropolitana 0119

resultados dependen de las estimaciones, las mismas que dependen de la información existente y su correcta comparación.

Para establecer el beneficio económico que se obtendrá en el DMQ con la aplicación de dispositivos postcombustión para la disminución de las emisiones de PM_{10} , se toma como referencia los resultados obtenidos en estudios realizados en la ZMVM (México), debido a que se encuentra a una altitud similar la del DMQ, la edad del parque automotor diesel con el que cuenta es de características similares.

A continuación se presenta el beneficio económico que se obtendrá con la aplicación de dispositivos postcombustión como medida de descontaminación en el DMQ, los valores obtenidos dependerán del tamaño del parque automotor diesel, así como la disposición de la población a pagar por disminuir sus días de improductividad y enfermedad.

La relación entre el beneficio económico y las toneladas de contaminante se determina de la siguiente forma:

$$f = \frac{Be}{Ton_R} \quad (\text{millones de USD/ ton}) \quad (4.3)$$

Donde: Be: Beneficio económico anual obtenido con la reducción del 10% de PM_{10} .

Ton_R : Toneladas de PM_{10} reducidas al año.

El valor de f se lo establece en base a los resultados obtenidos en México, por ende el beneficio económico es de 760 millones de USD por cada tonelada y las toneladas de PM_{10} reducido son 640.

Entonces f es:

$$f = \frac{760}{640} = 1.187 \quad (\text{millones de USD/ ton})$$

En la tabla 4.10 se aprecia el beneficio económico logrado en los escenarios propuestos (reducción de 50% y 85%).

Tabla 4.10. Determinación del beneficio económico que se lograría con la aplicación de dispositivos postcombustión en el DMQ, 2005 – 2010.

AÑO	REDUCCIÓN (toneladas / año)		BENEFICIO ECONOMICO (millones USD)	
	R1 50%	R2 85%	B1 50%	B2 85%
2005	116,8	197,80	138,66	234,79
2006	118,9	201,36	141,15	239,02
2007	121,1	204,99	143,69	243,32
2008	123,2	208,68	146,28	247,70
2009	125,5	212,43	148,91	252,16
2010	127,7	216,26	151,59	256,70
2011	130,0	220,15	154,32	261,32
2012	132,3	224,11	157,10	266,02
2013	134,7	228,15	159,93	270,81
2014	137,2	232,25	162,81	275,68

Fuente: Elaboración del autor.

Tabla 4.11 Relación Costo – Beneficio de la aplicación del programa retrofit.

AÑO	BENEFICIO (millones USD)			COSTO (millones USD)	RELACION B/C		
	E1 (50%)	E2 (85%)	E3 (10%)		E1 (50%)	E2 (85%)	E3 (10%)
2005	138,66	234,79	27,73	43,35	3,20	5,42	0,64
2006	141,15	239,02	28,23	16,92	8,34	14,13	1,67
2007	143,69	243,32	28,74	12,33	11,66	19,74	2,33
2008	146,28	247,70	29,26	11,67	12,54	21,23	2,51
2009	148,91	252,16	29,78	11,72	12,71	21,52	2,54
2010	151,59	256,70	30,32	11,90	12,74	21,57	2,55
2011	154,32	261,32	30,86	12,11	12,74	21,58	2,55
2012	157,10	266,02	31,42	12,33	12,74	21,58	2,55
2013	159,93	270,81	31,99	12,55	12,74	21,58	2,55
2014	162,81	275,68	32,56	12,78	12,74	21,58	2,55

Fuente: Elaboración del autor.

En la tabla 4.11 se muestran los valores obtenidos para relación B/C de los escenarios propuestos, además se puede apreciar que el análisis de la viabilidad de la aplicación se los realizó para una reducción del 10% del PM_{10} emitido por el parque automotor diesel en estudio.

En la siguiente figura se presenta la relación beneficio – costo de la aplicación de dispositivos postcombustión en el DMQ, durante el periodo 2005 – 2014.

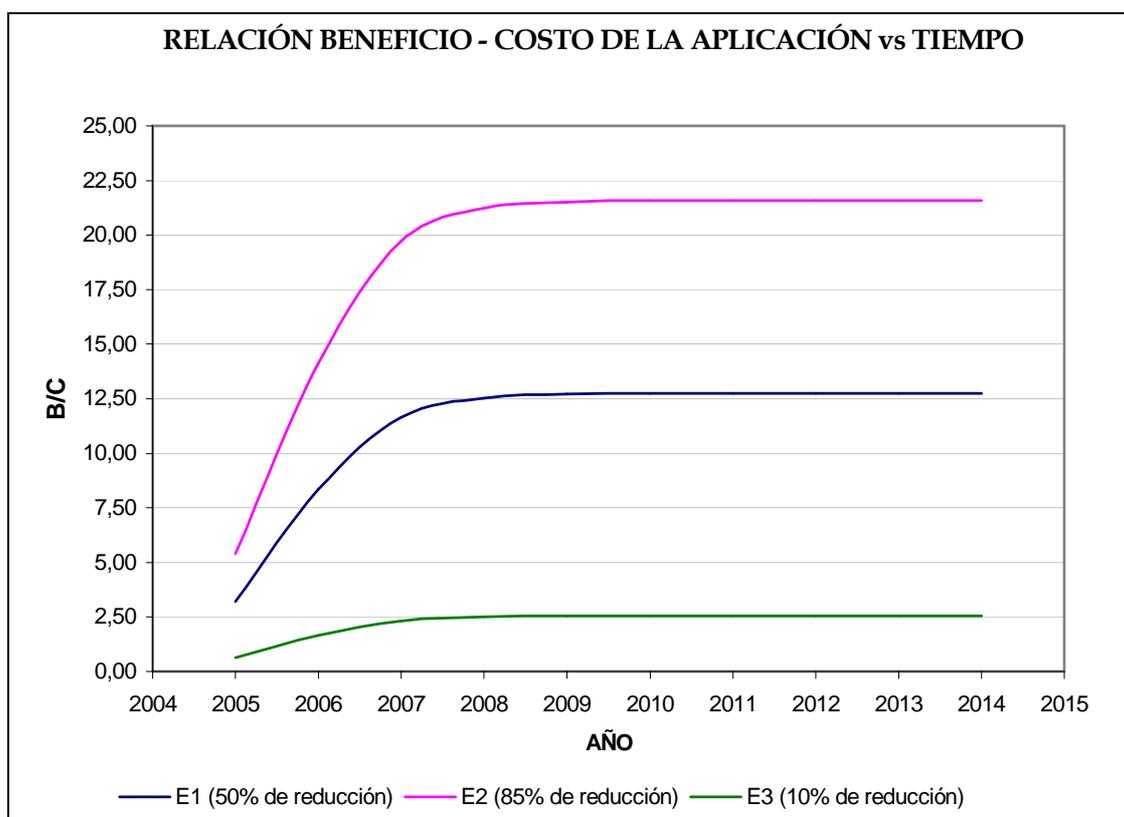


Figura 4.1. Relación B/C que se obtiene con la aplicación de dispositivos postcombustión en el DMQ, en 3 escenarios.

En el análisis presentado, se indica que la relación B/C de la aplicación es viable, por tanto el uso de dispositivos postcombustión es una alternativa para lograr la reducción de emisiones de PM_{10} y por ende la disminución de enfermedades de tipo respiratorio.

4.2.2 SELECCIÓN TÉCNICA DEL DISPOSITIVO POSTCOMBUSTIÓN

Una vez establecido la factibilidad de la aplicación, del universo de dispositivos postcombustión existentes en el mercado se selecciona en base a:

- Características del parque automotor diesel,
 - Edad del parque,
 - Tipo de tecnología,
- Mantenimiento,
- Combustible, y
- Caracterización de las rutas.

4.2.2.1 Características técnicas del parque vehicular

Los organismos reguladores del sistema de transporte público del DMQ (EMSAT y la DMT), cuentan con la base de datos del parque automotor diesel de transporte urbano que circulan en el distrito.

El parque vehicular diesel del DMQ cuenta con alrededor de 2495 unidades, de las cuales los modelos por año más representativos son 1994 a 1999 con un 46.71% y del año 2001 en adelante con un 47.83%, además se determina que los autobuses del 2001 en adelante cuentan con tecnología de emisiones EURO II.

En cuanto a los fabricantes de motores, se establece que las marcas representativas son: Chevrolet Isuzu (CHR y FTR); Hino (GD, FF); Volvo B10M (articulado), Volkswagen 17210 y Mercedes Benz OF1721, las mismas que representan el 81.17% del parque vehicular total, por lo que deberán estar presentes en la muestra de vehículos escogidos para el análisis.

Tabla 4.12 Datos Técnicos de las marcas de autobuses representativos del DMQ.

Marca	Motor	Potencia	Ubicación del motor	Emisiones	Posición del tubo de escape
Chevrolet Isuzu FTR 32M	6HK11- TC	202,5 HP	Delantero	Euro 2	<ul style="list-style-type: none"> • abajo a la izquierda; • posterior abajo; • o posterior arriba.
Chevrolet Isuzu CHR	6HJ11- TC	202,5 HP	Trasero	Euro 2	<ul style="list-style-type: none"> • posterior abajo • posterior arriba.
Mercedes Benz OF 1721	OM 366 LA	207,9 HP	Delantero	Euro 2	<ul style="list-style-type: none"> • abajo a la izquierda; • posterior abajo; • o posterior arriba.
Volkswagen OF 17210	MWM 6.10 TCA	203,2 HP	Delantero	Euro 2	<ul style="list-style-type: none"> • abajo a la izquierda; • posterior abajo; • o posterior arriba.
Hino FF	J08C - TT	242 HP	Delantero	Euro 2	<ul style="list-style-type: none"> • abajo a la izquierda; • posterior abajo; • o posterior arriba.
Hino GD	J011C - TT	242 HP	Delantero	Euro 2	<ul style="list-style-type: none"> • abajo a la izquierda; • posterior abajo; • o posterior arriba.
Volvo B10M articulado	DH10A - 340	343,3 HP	Central	Euro 2	abajo a la derecha

4.2.2.2 Mantenimiento.

El tipo de mantenimiento con el que cuenta el parque automotor diesel depende del propietario, no se cumple con lo recomendado por el fabricante. Su mantenimiento se basa en el chequeo y/o cambio de elementos menos complicados como: filtros de aceite, aire y otros, mientras que los elementos más sensibles e importantes son desatendidos lo que genera la falla del motor, provocando pérdidas económicas.

Debido a la falta de planes de mantenimiento, los dispositivos a probar deben ser aquellos que no requieran mantenimiento continuo ni complicado, por lo que se aconseja utilizar dispositivos con regeneración pasiva.

Determinar el estado real del motor es necesario previa a la instalación del dispositivo, para ello, se debe efectuar el mantenimiento, calibración del sistema de combustible para condiciones normales de funcionamiento en altura y la evaluación del estado del motor y turbocompresor, así como su reparación de ser necesario.

4.2.2.3 Combustible.

El contenido de azufre existente en el combustible es un factor importante que se debe tomar en cuenta para el diseño del dispositivo, como se sabe el azufre no solo incrementan las emisiones del material particulado, sino que además es causa un efecto negativo sobre la efectividad del dispositivo a tal punto que éste puede llegar a dañarse.

La ordenanza Municipal 0119 establece que para el DMQ el contenido de azufre en el combustible diesel no puede exceder de 0.05 % en peso⁵⁶ (500 ppm).

En la tabla 4.13 se realiza el análisis comparativo de los dispositivos en función a la cantidad de azufre, se establece la cantidad de azufre que debe existir en el combustible diesel para que puedan lograr mayor porcentaje en la reducción de PM₁₀.

Tabla 4.13 Requerimientos de los dispositivos con relación al contenido de azufre en el combustible.

Dispositivo	Contenido de azufre (ppm)	
	Mínimo	Máxima
DPF	-	> 500
CRT	-	< 50
DOC	< 500	< 50
SCR	-	15
Reactor de partículas	< 500	< 50

4.2.2.4 Caracterización de las rutas

Quito se caracteriza por su topografía irregular, cuenta con rutas de pendientes críticas las cuales provocan que el autobús se someta a esfuerzos mayores, incremento en el consumo de combustible, y por ende se generen grandes cantidades de gases contaminantes, además se encuentra rodeada de

⁵⁶ Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:89, "Productos Derivados del Petróleo, Diesel, requisitos"

montañas razón por la cual se presenta la acumulación de los gases en la superficie.

Las tecnologías postcombustión requieren ser examinadas en ruta, ya que esto le permitirá evaluar su comportamiento en condiciones de trabajo real, y determinar los beneficios y perjuicios que estos podrían causar a los vehículos y al medio ambiente.

La extensión y alturas de las rutas es variada, registrándose alturas desde 2789 m.s.n.m, hasta 3165 m.s.n.m, existiendo variaciones importantes entre terminales de hasta 341m.

4.2.2.5 Identificación de los dispositivos factibles para la flota del DMQ.

Definidos los parámetros, se realiza la selección del dispositivo. En la tabla 4.14 se establecen sus requerimientos, con esto se pretende definir cuales se adaptan y pueden lograr mejores resultados para su aplicación en el parque vehicular diesel del DMQ.

Parámetros:

- A: No requiere de carga alta para combustionar.
- B: Puede instalar en vehículos con motores nuevos o usados (1994 en adelante).
- C: Sistema de fácil instalación y mantenimiento.
- D: Puede ser instalado en reemplazo del silenciador.
- E: Limpieza periódica y automática.
- F: No afecta al rendimiento del motor.
- G: Combustible (500 ppm).

Tabla 4.14 Características técnicas de los dispositivos preseleccionados para

un programa retrofit en el DMQ.

IDENTIFICACIÓN	CARACTERÍSTICAS							DESEMPEÑO
	A	B	C	D	E	F	G	%
DPF (Filtro de partículas diesel)	X	X	X	X	X	X	X	100.00
CRT (Trampa de regeneración continua)		X	X	X		X		57.10
DOC (Catalizadores de oxidación de diesel)		X	X	X	X	X	X	85.71
SCR (Sistema de reducción catalítica)				X				14.28
Reactor de partículas	X	X		X	X	X	X	85.71

Del resultado obtenido en base al desempeño de cada una de las tecnologías, se determina que se pueden probar: DPF, DOC y Reactor de Partículas, además se puede intentar estudiar la factibilidad de la aplicación del CRT.

4.2.3 APLICACIÓN DE DISPOSITIVOS POSTCOMBUSTION EN EL DMQ

La capacidad de filtración de los dispositivos se basa en la reducción de emisiones contaminantes, entonces como primer paso, se debe establecer la línea base de emisiones, ya que ésta permite determinar el nivel de emisiones del parque automotor diesel en condiciones reales de trabajo. La línea base es una herramienta importante, debido a que al aplicar cualesquier tecnología se podrá determinar su eficiencia para reducir el PM₁₀.

De experiencias en países donde se aplicaron tecnologías postcombustión, se plantea la aplicación de un plan piloto, donde se establece el tamaño del parque automotor diesel a analizar durante un cierto periodo, por ejemplo en México se realizaron pruebas en 20 vehículos, mientras que en Chile la muestra fue de 10 vehículos.

El propósito de las pruebas realizadas en el plan piloto, es determinar la efectividad del uso de los dispositivos postcombustión, estado del motor, condiciones de manejo, tipo de combustible y el efecto de la altura, además se define su manejabilidad, el consumo de combustible y lubricante, el desempeño del vehículo, así como la durabilidad del motor y del dispositivo, y

mantenimiento de los mismos. Dentro del plan piloto es necesario ejecutar un sistema de seguimiento del autobús con y sin dispositivo, para recopilar información sobre la efectividad del dispositivo, así como su tiempo de vida útil.

La selección de los autobuses depende de su estado mecánico para lo cual se los someterán a pruebas de compresión al motor y presión al turbo, una vez seleccionados se procede a la calibración del sistema de alimentación de combustible del autobús a condiciones de altura de la ciudad de Quito. Establecidas las condiciones de trabajo de los autobuses, se medirá periódicamente la opacidad y emisiones, obteniéndose datos reales en cuanto a emisiones de gases contaminantes.

Con los resultados obtenidos en una escala mínima sobre la efectividad de los dispositivos, desempeño de los motores, así como el programa de mantenimiento y manejabilidad de los vehículos, se podrá realizar la instalación en la flota total de vehículos.

Es importante definir el plan de mantenimiento adecuado tanto para el parque vehicular como para los dispositivos, promover la capacitación del personal, así como la instalación de talleres especializados de donde se puedan realizar estos trabajos.

Por último, la implantación del dispositivo seleccionado en la flota total de vehículos, permitirá cuantificar el beneficio en la salud pública; así como el mejoramiento del aspecto físico de la ciudad.

CAPITULO V

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1 CONCLUSIONES

1. El objetivo principal de aplicar tecnologías postcombustión en el DMQ, es disminuir gradualmente la cantidad de los gases contaminantes emitidos por el parque vehicular diesel.
2. A julio de 2005 el parque automotor Diesel del DMQ está conformado por 2495 unidades, distribuidas de la siguiente manera Chevrolet Isuzu 23.09%, Hino (GD, FF) 28.7%, Volvo B10M 2.69%, Volkswagen 17210 con el 12.37% y Mercedes Benz OF1721 con el 19.32%
3. Para determinar la reducción real del dispositivo postcombustión es necesario determinar la línea base de emisiones en condiciones normales de trabajo y a condiciones de la altura de Quito.
4. En base a los datos registrados en el estudio referente a la determinación de la línea base de emisiones del parque automotor diesel del DMQ se obtienen los siguientes resultados:
 - a. La distancia de las rutas varían entre 156 y 228 km, con un valor promedio de 188.42 km.
 - b. La altitud de las rutas varían entre 3165 y 2789 m.s.n.m, con variaciones entre terminales de hasta 341 m.
5. De la información recopilada de estudios realizados en distintos países se determina que la mortalidad en la población se incrementa entre el 0.5% al 1.4% por cada $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la concentración de PM_{10} .
6. Del estudio en México se establece que la reducción del 10% de (640 toneladas) de PM_{10} genera un beneficio económico de 760 millones de dólares anuales, lo que representa un beneficio de 10 dólares por cada kilogramo de PM_{10} reducido por bus.

7. Todos los dispositivos postcombustión posibles a probar en el parque automotor diesel, tendrán mayor eficiencia si el combustible diesel que se utilice cumpla con la ordenanza municipal O119, donde se establece que el contenido de azufre en el combustible no exceda de las 500 ppm.
8. En el análisis económico realizado para el parque automotor del DMQ se establece que la relación beneficio – costo para los dos escenarios planteados varía entre 3,20 y 21,58, demostrándose de esta forma que la aplicación es viable.
9. En cuanto a la aplicación de tecnologías postcombustión que logren una reducción de sólo el 10% del PM_{10} , se concluye que la medida se torna viable en función del tiempo.
10. Del análisis técnico realizado en el capítulo 4 se concluye que los dispositivos seleccionados son:
 - a. Filtros de partículas Diesel de regeneración pasiva,
 - b. Catalizadores de oxidación de diesel,
 - c. Reactores de partículas.
11. De la selección realizada, las características de los dispositivos a probar deben ser:
 - a. Fácil mantenimiento e instalación.
 - b. No requerir aditivo ni carga extra de combustible para combustionar.
 - c. Además no debe afectar el rendimiento del autobús.
 - d. Pueden ser usados con combustible diesel de 500 ppm de azufre.
 - e. Instalación en lugar del silenciador.
12. Los dispositivos a probar en el parque automotor diesel del DMQ, serán sometidos a cambios bruscos de temperatura y presión de los gases de escape, los mismos que se debe a características topográficas de la ciudad, condiciones de manejo y tráfico vehicular.

13. De experiencias en otros países se concluye que dentro del plan piloto es necesario realizar pruebas en banco para analizar el motor y el dispositivo postcombustión en condiciones extremas de trabajo, las mismas que pueden ser controladas, con esto se puede establecer los requerimientos de instalación, manejo y mantenimiento de los dispositivos en evolución.
14. Un programa de análisis y seguimiento del vehículo con dispositivo, es un avance científico, el mismo que podría servir de base para programas similares en ciudades con características similares a las de la ciudad de Quito.

5.2 RECOMENDACIONES

1. Se recomienda que los autobuses que ingresen al DMQ en los próximos años cuenten con dispositivos postcombustión o sistemas de control de las emisiones de gases contaminantes.
2. Debido al efecto negativo del azufre en el combustible se recomienda disminuir este elemento, hasta lograr un diesel libre de azufre.
3. Se recomienda incentivar a los propietarios de los autobuses a calibrar sus unidades para condiciones de altura de Quito, así como definir un plan de mantenimiento, el mismo que debe ser realizado en forma periódica y programada.
4. Implantación de campañas referentes al tipo de mantenimiento que se debe efectuar en el parque automotor diesel, ya que esto permite alargar la vida útil del motor y del dispositivo postcombustión.
5. El planteamiento de una aplicación secuencial permite garantizar la efectividad de las medidas, ya que la información obtenida es confiable y corresponde a condiciones locales y reales de trabajo, además se derivan proyectos importantes que permiten lograr el fortalecimiento de las capacidades locales tanto para la evaluación, operación y control de dicha información.

6. Debido al alto costo que implica la instalación del dispositivo y su sistema de control, se recomienda dar incentivos económicos a los propietarios de las unidades a modificar.
7. Se recomienda subsidiar la adquisición del dispositivo a través de créditos preferenciales, establecer una tarifa preferencial, así como la extensión del periodo de vida útil del autobús en el DMQ.
8. Debido al impacto que generan las medidas de para disminuir la contaminación, se recomienda difundir los estudios que se encuentren ejecutando, es decir su campo de aplicación, alcances y los resultados obtenidos.

BIBLIOGRAFÍA

- http://www.epa.gov/ies/documents/mexico/mexico_cocontrol_appendices.pdf
- <http://www.envtox.ucdavis.edu/cehs/TOXINS/SPANISH/diesel.htm>
- <http://www.autocity.com/documentos-tecnicos/?cat=3&codigoDoc=133>
- http://web.idrc.ca/es/ev-64513-201-1-DO_TOPIC.html
- GUÍAS PARA LA CALIDAD DEL AIRE Organización Mundial de la Salud OPS/CEPIS/PUB/04.110
- J.M. Alonso, TÉCNICAS DEL AUTOMÓVIL, editorial Paraninfo, Madrid España, 2001
- Simón Figueroa S.; MANTENIMIENTO DE MOTORES DIESEL, Merida, 1997
- <http://www.epa.gov/ttn/catc/cica/cicaspa.html#Invfact>
- <http://quipu.uni.edu.pe/OtrosWWW/webproof/public/revistas/tecnia/vol9n1/09art>
- http://www.usergioarboleda.edu.co/postgrados/material_recursosnaturales/POSSERGIOARB.ppt.
- http://www.nrdc.org/air/transportation/schoolbus/intro_sp.asp#note24
- <http://www.nett.ca/es/products.html>
- South Coast Air Quality Management District, "Multiple Air Toxics Exposure Study in the South Coast Air Basin (MATES-II)," March 2000, p. ES-2. California Air Resources Board, "Risk Reduction Plan to Reduce Particulate Matter Emissions From Diesel-Fueled Engines and Vehicles," draft (July 13, 2000).
- State and Territorial Air Pollution Program Administrators and the Association of Local Air Pollution Control Officials, "Cancer Risk from Diesel Particulate: National and Metropolitan Area Estimates for the United States," March 15, 2000.

- Bagley, Susan T., et al., Health Effects Institute, "Characterization of Fuel and Aftertreatment Device Effects of Diesel Emissions," Research Report, 76, September 1996.
- Dockery, D.W., et al., "An Association Between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities," *New England Journal of Medicine*, 329: 1753-59, 1993. Pope III, C.A., et al., "Particulate Air Pollution as a Predictor of Mortality in a Prospective Study of U.S. Adults," *Am. J. Resp. Crit. Care Med.*, 1995;
- Shprentz, D., "Breathtaking: Premature Mortality Due to Particulate Air Pollution in 239 American Cities," New York, NRDC, May 1996.
- Lipsett, "The Hazards of Air Pollution to Children," in S. Brooks, et al. (eds), *Environmental Medicine*, St. Louis: Mosby, 1995;
- Wiley, J., J. Robinson, T. Piazza, L. Stork and K. Pladsen, "Final Report Study of Children's Activity Pattern," California State Senate, 1993; California State Senate (Ref. 24,25,26), "SB 25 Environmental Health Protection: Children," December 7, 1998, Amended 3/3/99; Natural Resources Defense Council, "Our Children at Risk: The 5 Worst Environmental Threats to Their Health," NRDC: New York, 1997.
- Gauderman, W. James, et al., "Association between Air Pollution and Lung Function Growth in Southern California Children," May 2, 2000.
- U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air and Radiation, Office of Planning and Standards Fact Sheet, "Health and Environmental Effects of Particulate Matter," July 17, 1997; Kreutzer, Richard, M. Lipsett, J. Von Behren and E. Yamada., "Asthma in California: Laying the Foundation for Statewide Strategy," California Policy Seminar. Brief series, August 1998.
- Miyamoto, T., "Epidemiology of Pollution-Induced Airway Disease in Japan," *Allergy*, 52: 30-34, 1997; Albright, J.F. and R.A. Goldstein, "Airborne Pollutants and the Immune System," *Otolaryngol Head Neck Surg*, 114(2): 232-8, 1996; Sagai, M., A. Furuyama and T. Ichinose, "Biological Effects of Diesel Exhaust Particles (DEP): Pathogenesis of

- Asthma-Like Symptoms in Mice," *Free Radic. Biol. Med.*, 21(2):199- 209, 1996.
- Hiura, T.S., et al., "Chemicals in Diesel Exhaust Particles Generate Reactive Oxygen Radicals and Induce Apoptosis in Macrophages," *J. Immunol*, 163(10): 5582-91, 1999;
 - O. Fahy, et al., "Effects of Diesel Organic Extracts on Chemokine Production by Peripheral Blood Mononuclear Cells," *J. Allergy Clin. Immunol.*, 103(6):1, 1999.
 - State and Territorial Air Pollution Program Administrators and the Association of Local Air Pollution Control Officials, "Cancer Risk from Diesel Particulate: National and Metropolitan Area Estimates for the United States," March 15, 2000.
 - South Coast Air Quality Management District, "Multiple Air Toxics Exposure Study in the South Coast Air Basin (MATES-II)," March 2000, p. ES-2. California Air Resources Board, "Risk Reduction Plan to Reduce Particulate Matter Emissions From Diesel-Fueled Engines and Vehicles," September 2000.
 - Cal EPA, "Chemical Known to the State to Cause Cancer or Reproductive Toxicity," Revised May 1, 1997; Discussed in U.S. EPA Office of Research and Development, Health Assessment Document for Diesel Emissions, Review Draft, EPA/600/8-90/057C, February 1998. Chapter 5.
 - http://www.gencat.net/mediamb/cast/aire/e_auto.
 - <http://www.monografias.com/trabajos14/impacto-ambiental/impacto-ambiental.shtml>
 - <http://es.geocities.com/ecored2000/hollin.html>
 - <http://www.pvem.org.mx/contaminacion.htm>
 - <http://www.iangv.org/files/ngv2004/pag17/Gregorio%20Kopyto/C%E1mar a%20Argentina%20del%20GNC,%20Gregorio%20Kopyto.pdf>

- <http://www.luiscifuentes.cl/Docs/CostosSaludyDieselLimpio-7Agosto2001.pdf>

ANEXOS

ANEXO A: EXPERIENCIA CHILENA.

ANEXO B: EXPERIENCIA MEXICANA

**ANEXO C: EXPERIENCIA EN NEW YORK
CITY**

PROGRAMAS RETROFIT - EXPERIENCIAS

La aplicación de dispositivos postcombustión en vehículos de transporte público a diesel, está dirigida a la reducción de la polución provocada por dichos vehículos, así como lograr un combustible con bajo contenido de azufre lo que permitirá el uso de nuevas tecnologías para el sector del transporte.

Para su aplicación se han diseñado diversos programas Retrofit, los cuales dependen de las características tanto del parque automotor diesel así como de la ciudad donde va a ser aplicado, se espera resultados significativos en cuanto a la reducción de emisiones contaminantes sobre todo de PM.

Estos programas, permitirán determinar el o los dispositivos que mejores resultados den en relación a la reducción de emisiones de PM, costos de instalación y tipo de mantenimiento que requiere el dispositivo. Cada programa ejecutado pretende dar una visión general para su aplicación en otros sitios.

A continuación se describe las experiencias de programas Retrofit ejecutados en otros países, los resultados obtenidos por los diferentes fabricantes de dispositivos postcombustión.

ANEXO A

EXPERIENCIA CHILENA.

ANTECEDENTES

El sistema de transporte público de Santiago ha experimentado un deterioro creciente en las dos últimas décadas, lo que, a su vez, se ha traducido en servicios e infraestructura congestionados, tiempos de viaje en aumento constante y operación ambientalmente dañina. Este fenómeno, cuyas expresiones más visibles son el creciente uso del automóvil, el difícil control de la congestión y los problemas ambientales relacionados con la operación del transporte, adquiere creciente importancia no sólo en el ámbito técnico, sino también en los campos económico, social y ecológico.

La información recopilada por la Encuesta Origen Destino reveló que entre 1991 y 2001 se produjo un cambio drástico en la proporción de viajes efectuados en transporte público y en automóvil particular: los viajes en micro disminuyeron desde 59,6% a un 42,1% y los viajes en metro descendieron desde 8,5% a 7,4%. En contraste, los desplazamientos en automóviles se dispararon desde el 18,5% al 38,1%. Así los casi 20 puntos porcentuales en que bajaron combinadamente los principales modos de transporte público fueron compensados por el automóvil particular. Esto en un contexto de expansión urbana extremadamente alta en los últimos 15 años.

El transporte público y privado genera el 48% del material particulado respirable (PM₁₀), 84% de los óxidos de nitrógeno (NO_x) y 91% del monóxido de carbono (CO).

La evaluación de la ciudadanía sobre el transporte público es radicalmente negativa: siempre destaca el exceso de micros, la congestión, la inseguridad, la conducción descuidada y agresiva, el deterioro de los vehículos y su aporte de contaminantes atmosféricos y acústicos. Los usuarios no pueden predecir los tiempos de viaje ni la frecuencia de los servicios. La incapacidad del sistema para reflejar un nexo comercial entre el servicio y sus clientes es la fuente de la mayor parte de los defectos que la población identifica en el transporte público.

Santiago de Chile, cuenta con el llamado Plan de Prevención de Descontaminación Atmosférica de la Región Metropolitana (PPDA) que establece un compromiso de reducir en un 75% el material particulado (PM) emitido y en un 40% las emisiones de óxidos de nitrógeno. Con este propósito, las autoridades de Transportes, el Consejo Nacional de Medio Ambiente (CONAMA) y la Intendencia Metropolitana han puesto a punto el llamado proyecto Transantiago, que es una estrategia global y sistemática que abarca varios frentes de acción, que estipula metas y cronogramas de reducción, lo cual se espera que se traduzca en una significativa mejora en la calidad de vida de los habitantes de Santiago.

Transantiago, el Plan de Transporte Urbano, representa el compromiso con todos los ciudadanos por lograr una mejor calidad de vida, aire más limpio y mayor seguridad en las calles, se lo implantará desde 2005 un nuevo sistema de transporte público con una mayor red de metro; una nueva malla de servicios para el transporte de superficie; la integración tarifario a través de una tarjeta sin contacto; la renovación continua de la flota de buses; un nuevo sistema de gestión empresarial y laboral en el sector, e inversiones en infraestructura para nuevas vías, paraderos, estaciones de transbordo y estaciones de intercambio modal.

En una segunda etapa (2005-2010) se enfatizará en una mayor y mejor infraestructura (más líneas y estaciones de metro, estaciones de transbordo y de intercambio modal) superior tecnología de información y fiscalización y la renovación total de la flota de buses.

El Plan contempla una reestructuración del sistema de transportes, se enfoca en la disminución de la flota vehicular que circula por la ciudad; una baja importante de los kilómetros recorridos; normas más estrictas de emisión de los motores y el uso exclusivo de tecnología limpia en los recorridos alimentadores del centro de Santiago.

Para la ejecución del plan de descontaminación se tiene como medida necesaria la incorporación de tecnologías menos contaminantes, (entre ellas los filtros de material particulado), así como un diesel de mejor calidad el mismo

que se espera una reducción de 300 a 50 ppm (partes por millón) de azufre, en julio de 2004.

Renovación de la flota. Se estima que en mayo de 2005, al menos un 20% de la flota que se desplace por Santiago será nueva, estimándose que la renovación completa de los buses culmine en el 2010, lo que reducirá aún más la contaminación de la ciudad. Exigencia de reducción de opacidad en 30% para buses Euro I y Euro II

Es importante resaltar que para la ejecución de Transantiago se contó con una donación de 7 millones de dólares del Fondo para el Medio Ambiente Mundial (GEF) que realizó al proyecto Calidad de Aire y Transporte Sustentable para Santiago.

En coordinación con los fabricantes y expertos extranjeros, las autoridades de la gestión del aire en Santiago pusieron en marcha en el año 2004 un programa piloto para evaluar la flota de buses y los dispositivos retrofit. Este programa de alrededor de dos meses y basado en menos de diez unidades de tipo Euro II y Euro II, servirá para definir los requerimientos técnicos para los dispositivos retrofit entre los que se encuentran un catalizador, dispositivos pasivos tipo CRT, CSF, y FBC, y un dispositivo activo tipo quemador de diesel. Una variedad de dispositivos ha sido incluida con el fin de efectuar pruebas en los vehículos para comprobar su efectividad a través de una evaluación real con los buses en servicio.

En el plan piloto TRANSANTIAGO se hicieron varias pruebas con dispositivos de diversas marcas con tecnologías similares y con requerimientos en cuanto a las características del combustible y al parque automotor a probar. De esta prueba se obtuvieron varios resultados de los cuales se pueden rescatar los pro y los contra del uso de estas tecnologías.

Los requisitos que se establecieron para el uso de los DPF fueron:

- Vehículos con buen mantenimiento
- Combustible con bajo contenido de azufre y aceite lubricante.
- Instructivos de manejo del vehículo.
- Control periódico del parque seleccionado.

- DPF con certificación VERT y equipado con OBC.
- Fabricado en base a experiencia científica.

1.5.1.1.1.1.3 En el Plan piloto desarrollado se ejecutaron las siguientes etapas

- Selección de una muestra de 10 vehículos
- Toma de datos correspondientes a emisiones, consumo de combustible, consumo de aceite.
- Selección de los filtros a utilizar basado en los requerimientos.
- Monitoreo de la muestra alrededor de 10 meses en ciclo de trabajo pesado
- Control de emisiones en un dinamómetro de chasis, durante 2 meses o 10000 km y monitoreo de temperaturas y contrapresiones.

DESCRIPCIÓN DEL PLAN, OBJETIVOS Y RESULTADOS OBTENIDOS

Existe un programa periódico de monitoreo de vehículos, dentro del cual cada bus se somete a inspección bianual de emisiones a través del monitoreo de la opacidad de los gases de escape y las autoridades de tránsito tienen la capacidad de sacar del servicio a buses que emiten excesivamente. La flota de buses es homogénea, con 90% que son de origen Mercedes Benz y manufacturados en Brasil del tipo Euro I y Euro II. Con este contexto, la estrategia de Transantiago incluye, entre otros, el retiro de los buses más viejos, la reducción de las compañías dueñas de buses, el mejoramiento del combustible, y el programa retrofit de aproximadamente 4000 buses.

Las características de los vehículos seleccionados se presentan en la tabla A1.

Tabla A1 vehículos y DPF seleccionados.

Aftertreatment system			Retrofit Date	License Plate	Mileage [km]
Adastra	DPF VERT	Fuel-Additive	01.09	TF 5204	446'417
Airmeex	DPF VERT	Fuel-Additive	06.09	RR 1547	
Engelhard	DPF VERT	Catalytic Coating	10.09	NR 4362	424'147
Engelhard	DPF VERT	Catalytic Coating	10.09	TT 2191	411'881
HJS	DPF VERT	CRT	17.08	TE 3776	593'734
HJS	DPF VERT	CRT		TJ 9289	
HJS	DPF VERT	CRT		VF 3742	
HJS	DPF VERT	CRT	12.08	TB 8691	629925
Huss	DPF VERT	Diesel Burner	28.08	LD 8523	144'557
Huss	DPF VERT	Diesel Burner	26.08	SZ 5875	368'539
Sudchemie	DOC	Oxidation Catalyst	13.09	UZ 2582	288'838
Bekaert *	DPF	Electric heating	24.08	UK 8319	
ETG *	DPF	Catalytic Coating	07.09	UY 5202	
Clean air	DPF	Catalytic Coating	06.10	TZ 7737	

Fuente: Santiago BUS-DPF-Retrofit Swiss Contributions and Lessons of the Pilot Project 2004 Andreas Mayer / TTM

Diseño del Plan⁵⁷

- Eficiencia en la reducción del material particulado.
- Seguimiento operacional para examinar el comportamiento en ruido y opacidad.
- Seguimiento operacional para examinar contrapresiones y temperaturas.

⁵⁷[www2.mtt.cl/cms/archivos/seminario3cv_Descripcion,%20Objetivos%20y%20Resultados%20\(Aliosha%20Reinoso\).pdf](http://www2.mtt.cl/cms/archivos/seminario3cv_Descripcion,%20Objetivos%20y%20Resultados%20(Aliosha%20Reinoso).pdf)

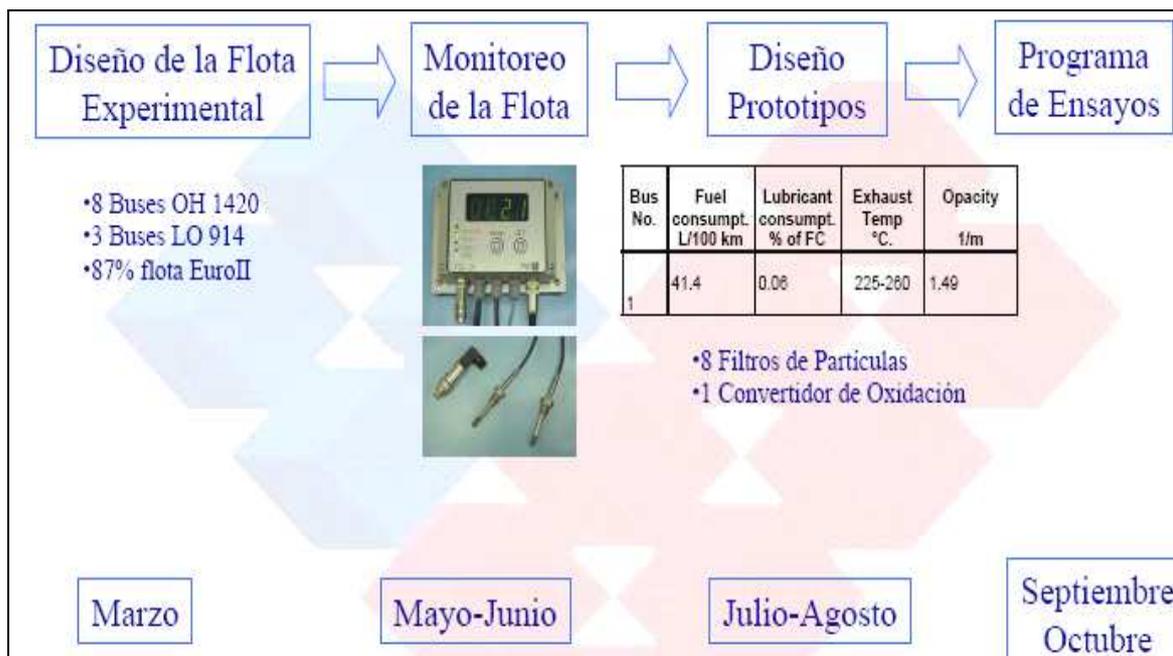


Figura AA – 1. Descripción del programa ejecutar para Transantiago.

Medición de la Eficiencia

- Masa
- Distribución de tamaño
- Superficie

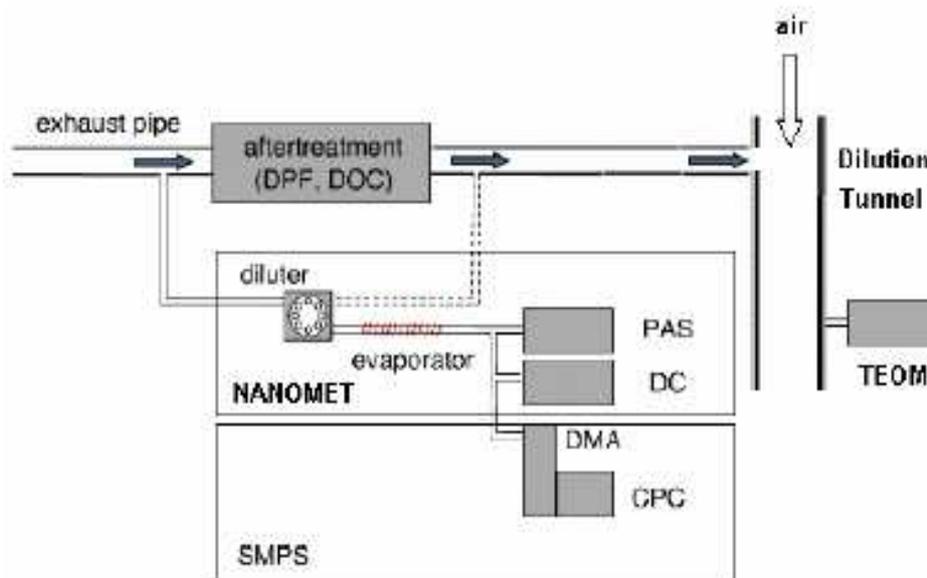


Figura AA - 2. Esquema de la Medición de la eficiencia del dispositivo.

Resultados de Eficiencia 1

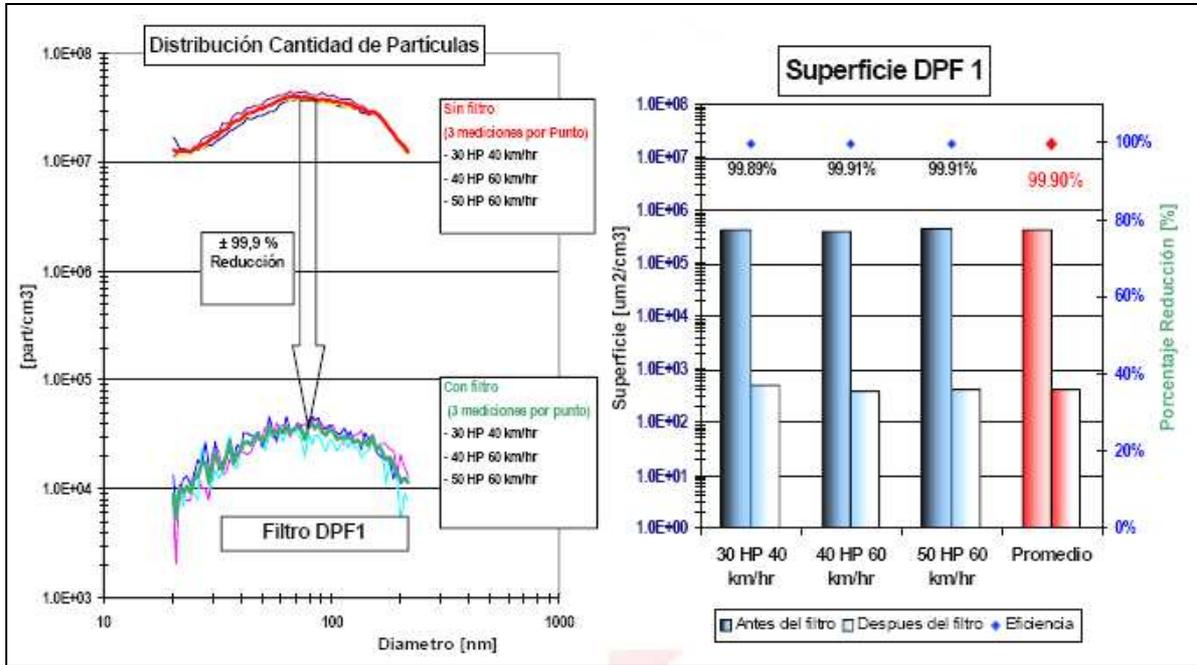


Figura AA – 3. Resultados de las mediciones, se puede observar la distribución de partículas en función de su diámetro

Resultados de Eficiencia 2

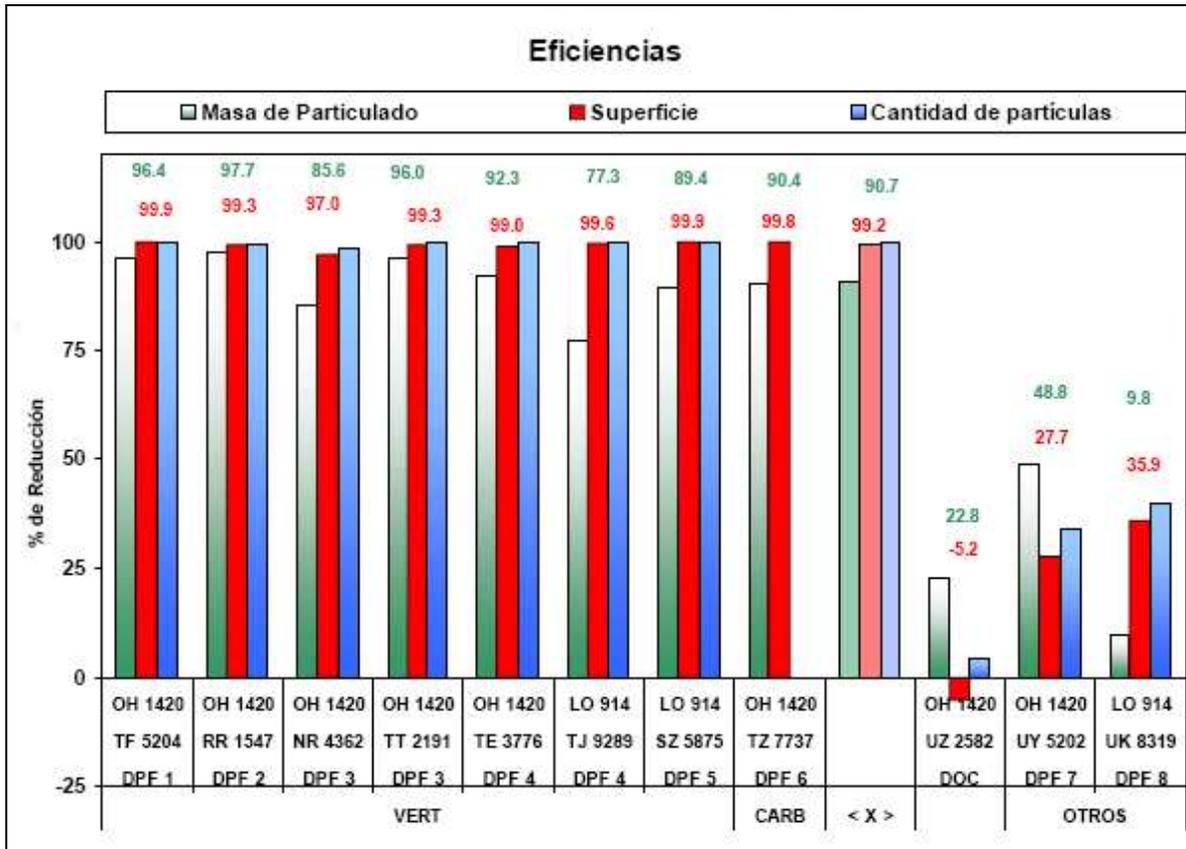


Figura AA – 4. Resultados de las mediciones, en diferentes dispositivos.

Seguimiento Operacional

1. Medición de temperatura y Contrapresión

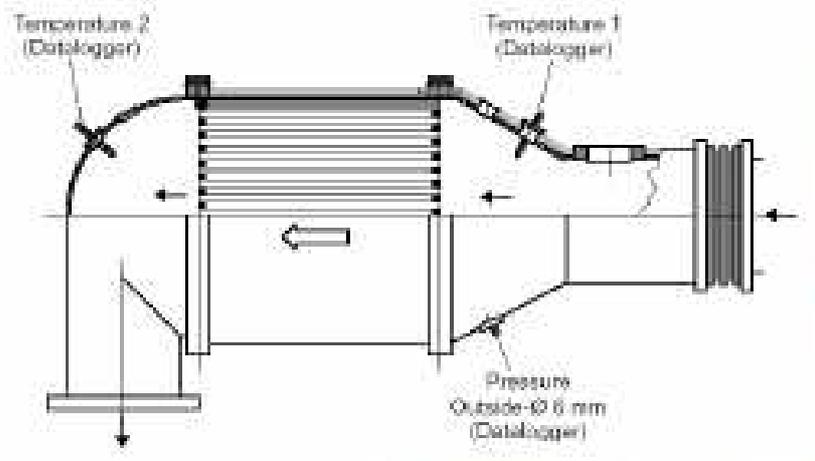


Figura AA – 5. Esquema para la medición de temperatura y contrapresión con la ayuda de un datalogger

2. Resultados Seguimiento Operacional

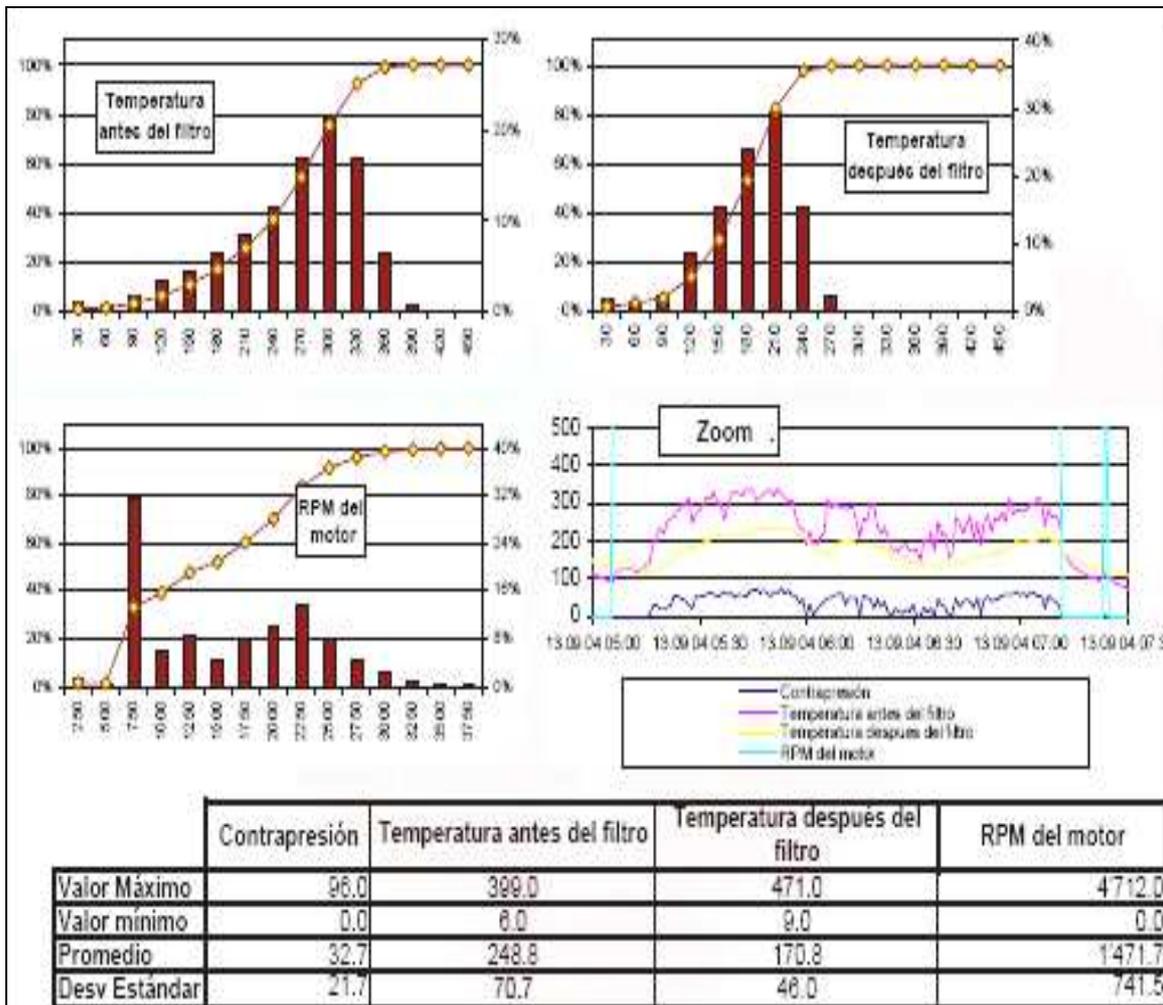
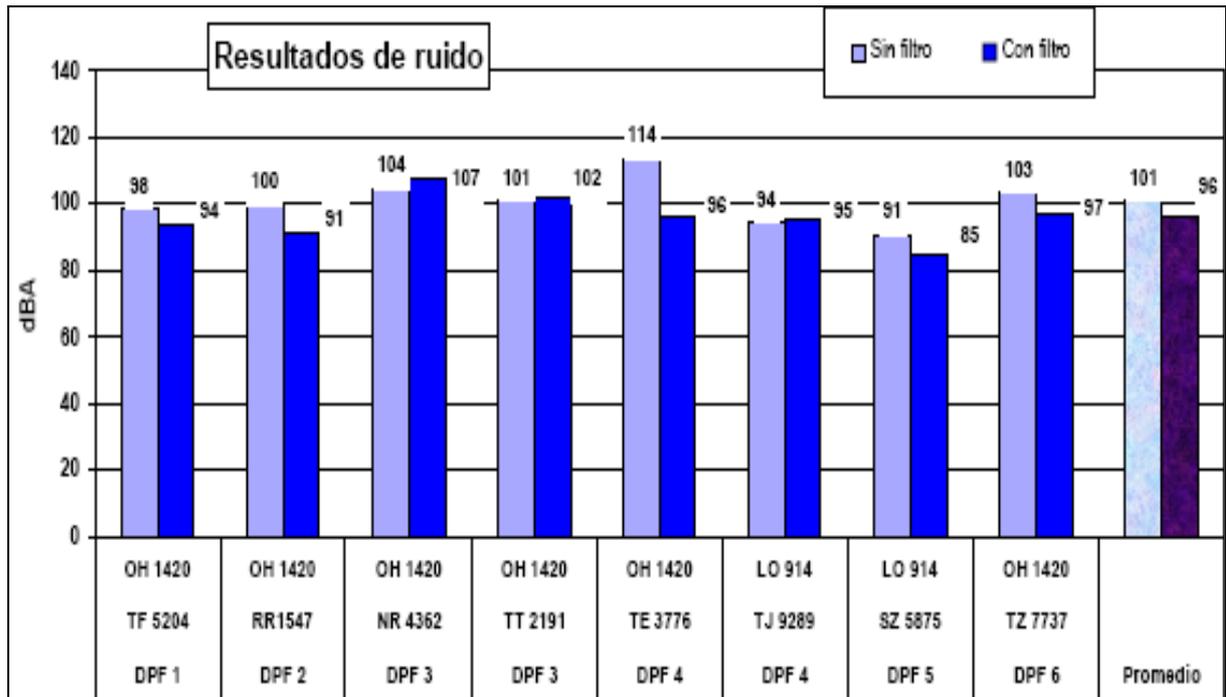


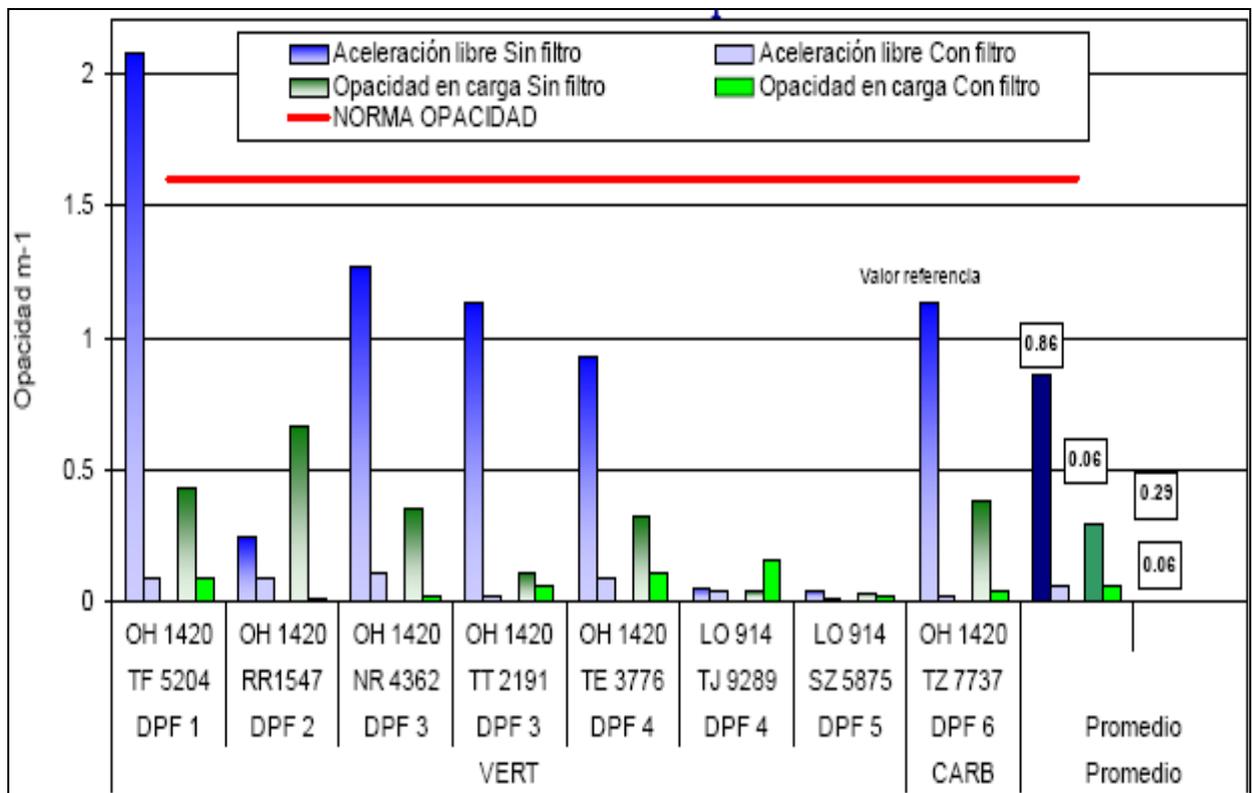
Figura AA – 6. Resultados del seguimiento realizado al dispositivo.

Seguimiento sobre el Ruido y la opacidad

1. Ruido (DS 129/2002)
2. Opacidad (DS 4/1994)
3. Resultados Seguimiento Operacional
 - a. Resultados Ruido



b. Resultados Opacidad



CONCLUSIONES

- Fueron ensayados 9 sistemas de post tratamiento (8 DPF y 1 DOC).
- Los 6 sistemas con certificación VERT o CARB demostraron alta eficiencia en reducción de material particulado en masa (90%) y en partículas sólidas ultrafinas (99%).
- El DOC mostró baja eficiencia en masa y ninguna eficiencia en partículas sólidas ultrafinas.
- Los sistemas DPF demostraron su capacidad para operar adecuadamente en la flota de Santiago.
- En la tabla A2 se presenta los resultados que se obtuvieron durante las pruebas, mostrándose, la eficiencia de la filtración.

ANEXO B

EXPERIENCIA MEXICANA

ANTECEDENTES

La Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos (EPA) y el Instituto Mundial de Recursos (WRI) seleccionaron a la ciudad de México como sede del primer proyecto piloto RETROFIT en ese país. Se trata de un proyecto que surge de la “Iniciativa de Vehículos y Combustibles Limpios”, aprobada durante la “Cumbre Mundial para el desarrollo sustentable”

A mediados del año 2004, se puso en marcha el *Proyecto Diesel Retrofit Ciudad de México*, se propuso probar la viabilidad y eficiencia de los dispositivos retroadaptados (son dispositivos postcombustión que se instalan en el vehículo en lugar del silenciador) en vehículos pesados a diesel en la ciudad de México, así como también las ventajas ambientales asociadas con el uso de diesel con ultra bajo contenido de azufre (ULSD). Al final del estudio, se espera obtener información cuantitativa sobre costos y la reducción de las emisiones de las tecnologías retrofit empleadas en México.

El proyecto Retrofit México permitirá desarrollar un programa que se puede reproducir en otras flotas y en otras ciudades del país, construir una capacidad técnica que permita implementar dicho programa.

Como antecedentes de este proyecto se tiene que el parque vehicular a diesel de la Zona Metropolitana del Valle de México (ZMVM), a pesar de que sólo representa el 4% del total de la flota, contribuye con el 42 % de la emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y el 71% de PM₁₀.

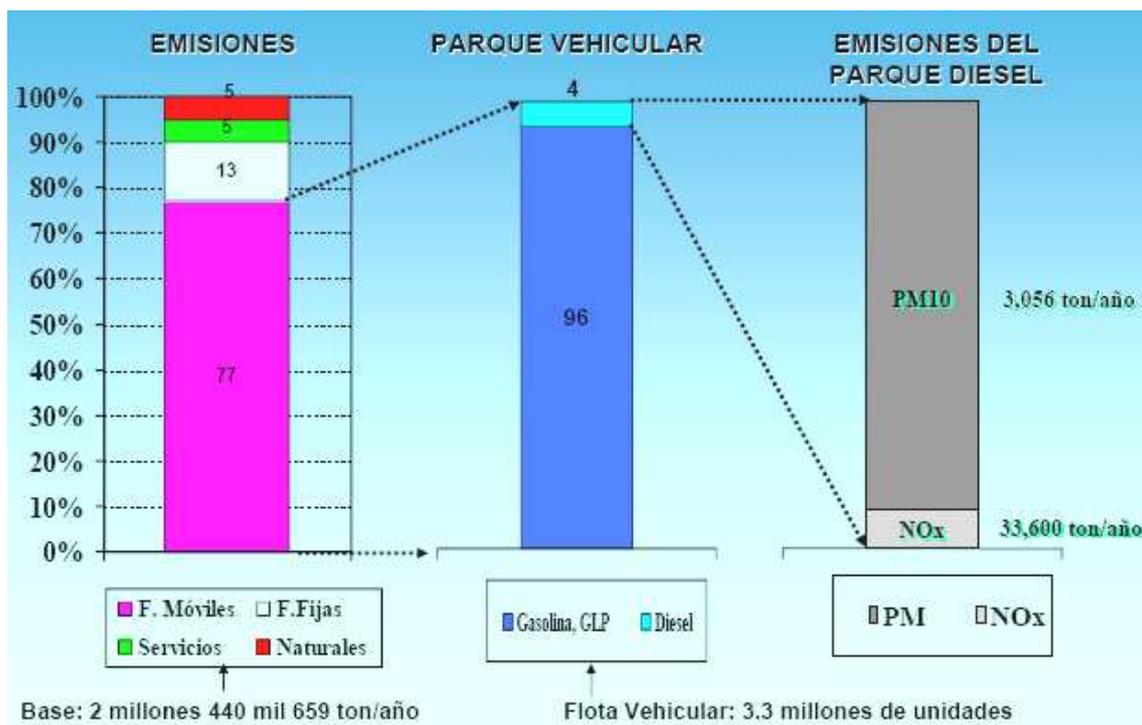


Figura AB – 1. Problemática unidades diesel en circulación.

Este programa piloto está diseñado para reducir las emisiones de partículas y otros contaminantes por más del 90% de una flota de 20 buses a diesel en la ciudad. El programa está diseñado para demostrar la factibilidad del uso de dispositivos a retrofit y diesel con bajo contenido de azufre como una estrategia para el mejoramiento de la calidad del aire. Los dispositivos siendo demostrados son pasivos de tipo CRT. El proyecto está en marcha recientemente.

- Proyectos para Vehículos a Diesel.
- Actualización de la normatividad ambiental.
- Programa de Autorregulación Ambiental.
- Programa Piloto de Retrofit.
- Proyecto del Metrobús.
- Proyectos con RTP (Red de Transporte de Pasajeros).
- Renovación de la flota vehicular
- Sustitución de motores a diesel por los de gas natural.

PROGRAMA DE AUTORREGULACIÓN AMBIENTAL PARA VEHÍCULOS DIESEL

- Obligaciones del parque vehicular a diesel autorregulado.
- Establecimiento y operación de un programa integral de mantenimiento al total de su parque vehicular a diesel.
- Emisiones de escape por debajo del 40% de lo establecido en la NOM-045-ECOL-1996 (0.76 k m⁻¹).
- Revisión trimestral del coeficiente de absorción de luz de sus unidades.
- Portar el logotipo distintivo del programa.

PROGRAMA PILOTO DE RETROFIT PARA VEHÍCULOS A DIESEL EN LA CIUDAD DE MÉXICO⁵⁸

1. Demostrar la efectividad en la reducción de emisiones generadas por vehículos a diesel al instalarles convertidores catalíticos y trampas de partículas, así como por el uso de diesel de ultra bajo contenido de azufre. Evaluar su desempeño en condiciones de operación y manejo de la Ciudad de México
2. Determinar el costo – beneficio de usar tecnología Retrofit.
3. Para la ejecución del plan piloto se realizó pruebas en 20 vehículos de transporte de pasajeros propiedad del RTP.

Instrumentación del Programa Retrofit

Se instalaron 12 trampas de partículas (8 INTERNATIONAL AYCO y 4 MERCEDES BENZ 2002) y 8 convertidores catalíticos en autobuses (8 vehículos MERCEDES BENZ 1991). Para estas pruebas PEMEX de México ha importado diesel de ULSD (15 ppm). Las tecnologías a probar deben haber sido previamente evaluadas por la EPA.

⁵⁸ [http://www.sma.df.gob.mx/sma/Auroregulacion%20y%20Retrofit_\(Diana%20Noriega\).pdf](http://www.sma.df.gob.mx/sma/Auroregulacion%20y%20Retrofit_(Diana%20Noriega).pdf)

Para implantación del programa Retrofit se capacitó al personal (40 conductores, 20 mecánicos e ingenieros) destinado para la instalación, supervisión y seguimiento de los vehículos adaptados con dispositivos.

La medición de contaminantes de escape (CO, CO₂, NOx y PM₁₀), mediante un sistema de monitoreo a bordo, en 3 fases:

- ♣ Línea base.
- ♣ A los 4,000 km. posterior a su instalación.
- ♣ Aproximadamente a los 70,000 km. de operación



Figura AB – 2. Programa de capacitación del personal para el proyecto Retrofit México.

Este programa piloto tuvo una duración de un año, el mismo que se desarrolla en condiciones de operaciones reales de los buses, está dividido en dos etapas:

- ♣ Evaluación del autobús entre 4 a 6 semanas (4000 km.)
- ♣ 10 meses posterior a la instalación.

Las tecnologías a probar hayan sido previamente evaluadas por la EPA.



Figura AB – 3. Instalación de un dispositivo postcombustión – proyecto Retrofit México.

Los resultados obtenidos después de la prueba son los siguientes:

- ♣ El tipo de vehículos utilizados en el plan piloto se adaptan perfectamente a las tecnologías probadas.
- ♣ Las tecnologías de retrofit contribuyen a disminuir significativamente la contaminación generada por los vehículos diesel en la ciudad de México.

Tabla A2 Resultados preliminares.

TIPO DE AUTOBUS	DISPOSITIVO	PM	CO	NOX
INTERNACIONAL	Trampa de Partículas	90%	90%	10%
Mercedes Benz (Modelo 1991)	Convertidor Oxidativo	20-30%	52-70%	20-33%

Resultados tomados de la primera campaña realizada en enero de 2005.

CONCLUSIONES

La introducción de este tipo de tecnologías en México implicaría contar con:

- ♣ La disponibilidad de la tecnología adecuada en el mercado a costos razonables.
- ♣ Mecanismos AD HOC de financiamiento para este tipo de proyectos.
- ♣ Diesel de bajo contenido de azufre en el país a precios especiales dirigidos a promover este tipo de tecnologías.
- ♣ Una normativa más estricta que impulse el cambio hacia mejores tecnologías y restricciones más altas en materia de contaminación.
- ♣ Del estudio se concluye que las 1300 unidades que posee la RTP un buen porcentaje podría utilizar la tecnología retrofit.
- ♣ Se abre la oportunidad de aplicar estas tecnologías en la flota de carga que usa Diesel en la Ciudad de México y el país.

ANEXO C

EXPERIENCIA NEW YORK CITY

ANTECEDENTES

Con sus más de siete millones de habitantes la ciudad de Nueva York es una de las más grandes metrópolis en Norteamérica.⁵⁹

El sistema de buses del Department of Transport transporta más de 114 millones de personas anualmente a través de una combinación de servicios de buses expresos y locales que son suplidos por siete compañías privadas con franquicias. Este sistema tiene una flota de más de 1.280 buses, haciendo que ésta sea la novena flota de buses de transporte público más grande en los EE UU. Hay un total de 82 rutas locales y expresas que operan en Queens, Brooklyn, the Bronx, y Manhattan.

Aunque siete operadores de buses privados dan el servicio, la ciudad de Nueva York es propietaria de la mayoría de los buses, subsidia el costo de las operaciones, y cubre los riesgos financieros generales de dar transporte de autobuses. La ciudad también es dueña de dos terminales de buses.

La ciudad de Nueva York comenzó a subsidiar compras capitales para las compañías de autobuses privadas en 1974. En 1986, el Department of Transportation creó una Oficina de Transporte Público de Superficie para monitorear la calidad de los servicios de buses franquiciados y para manejar los subsidios federales estatales de la ciudad. En 2000, los subsidios totalizaron \$151.861.090, mientras que las entradas por concepto de tarifas fueron de \$107.034.591.

DESCRIPCIÓN DEL PROGRAMA

La Metropolitan Transportation Authority (MTA) opera las redes de transportes más grandes de Norteamérica y comprende cinco agencias, una de las cuales es Nueva York City Transit. En el año 2000 comenzó un programa de bus de

⁵⁹ http://www.nyc.gov/html/dot/html/get_around/bus/busframe.html

combustible limpio, el que plantea dar a Nueva York la flota de buses más limpia del mundo.

Sus metas son:

1. Reducir las emisiones de las flotas de buses: lograr niveles por debajo de los mandatos actuales en los EE UU.
2. Mejora del servicio: mejorar la confiabilidad del equipo; lograr una operación más silenciosa.
3. Reducir el costo de las operaciones: mejorar la economía del combustible; reducir los costos de mantención; evitar costos de infraestructura.

El programa es neutro en cuanto a la tecnología, y combina diferentes enfoques que se espera que logren buenos resultados, por lo tanto se usan buses gas natural comprimido (GNC) al mismo tiempo que buses híbridos (combinación de tecnologías), así como tecnologías de diesel limpio.

MONTAJE INSTITUCIONAL Y FINANCIAMIENTO

El programa es ejecutado por la agencia MTA del New York City Transit, que cuenta con el apoyo y financiamiento del gobierno local, por lo que dichas autoridades propusieron que el Department of Environmental Conservation que trabaje con la MTA y la comunidad ambiental en desarrollar nuevos estándares de rendimiento de emisiones para todos los buses MTA y asegurarse de que ellos cumplan o incluso que excedan las normas logradas por los buses a GNC. La MTA es una corporación pública de beneficio reconocida por el estado de Nueva York.

El programa está diseñado para dar con reducciones de emisiones rentables tan pronto como sea posible. Para lograr esto, la Metropolitan Transportation Authority (MTA) 2000 - 2004 Capital Spending Plan (Plan de Gastos Capitales 2000 - 2004 de la Autoridad de Transporte Metropolitana-MTA) incluye \$304 millones para los programas de combustible limpio.

En un comunicado de prensa la EPA afirma que este plan puede llegar a los \$250 millones de dólares, el plan prevé la compra de 550 buses nuevos de

combustible limpio, la conversión de todos los buses diesel existentes hacia la tecnología limpia y la construcción de un nuevo laboratorio de pruebas para los dispositivos en uso.

ENFOQUE POLÍTICO

El programa es una iniciativa del gobierno local en un intento explícito de establecer un ejemplo de estándares ambientales. Toma un enfoque eminentemente tecnológico, apuntando a reemplazar o modificar la flota de buses diesel existentes con tecnologías más limpias. La iniciativa va voluntariamente más allá de los estándares de control de emisiones que son obligatorios.

ENFOQUE TECNOLÓGICO

El programa es "tecnológicamente neutro", es decir, no se decide por usar una tecnología en particular. En vez de eso, varios enfoques tecnológicos se consideran que prometen ser efectivos, y estos se comparan entre sí. Tres diferentes tecnologías están siendo usadas:

1. Expandir las operaciones de buses GNC: comprar 300 buses y convertir 2 terminales a GNC.
2. Expandir programas bus híbrido: comprar 250 buses híbridos; desarrollar buses híbridos articulados y buses normales.
3. Expandir el uso de tecnologías diesel limpio: Retirar todos los motores diesel de 2 tiempos antes del 2003; convertir la flota entera para el uso de combustible con bajo contenido de azufre; modificar 3.500 buses con filtros de partículas.

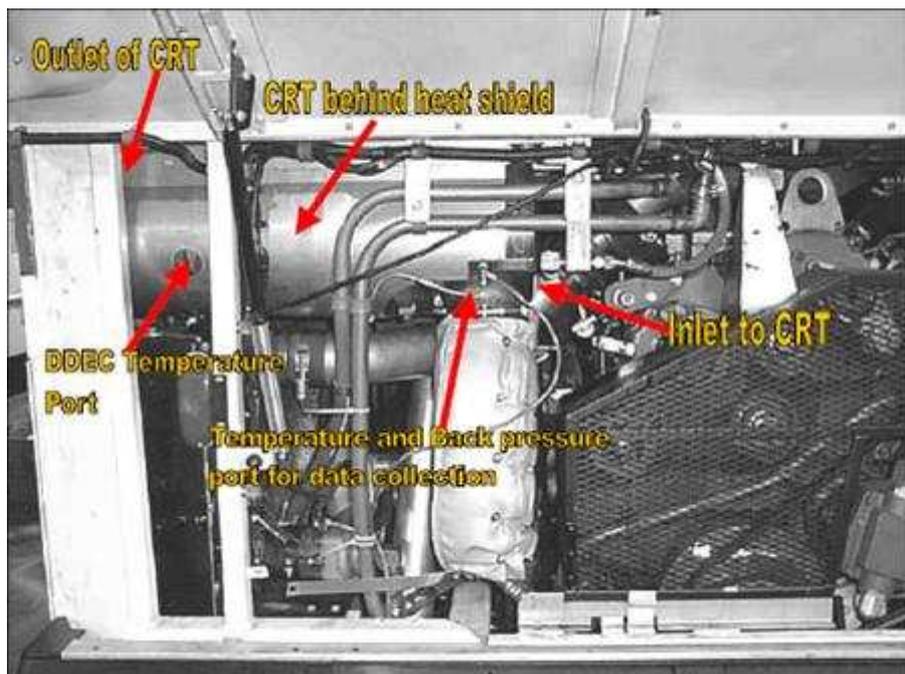


Figura AC-1. Instalación de un dispositivo postcombustión – NYCT CLEAN FUEL BUS PROGRAMS.



Figura AC-2 ORION / Lockheed Hybrid Bus – NYCT CLEAN FUEL BUS PROGRAMS.

En todos los terminales de buses diesel, se introducirá diesel con azufre de menos de 30 ppm de azufre. Dado este cambio en el combustible diesel, todos los buses diesel en la flota serán equipados con algún tipo de tecnología de post- tratamiento, como CRTs, catalizadores, inyección de úrea, u otros

dispositivos, no más allá del 31 de diciembre de 2003. Además, se planea comprar 300 buses GNC adicionales y 250 buses híbridos eléctricos adicionales.

PRINCIPALES RESULTADOS

1. Buses GNC

Tabla A3 Costos de la implementación de buses GNC.

ITEM	COSTO
Mantenimiento:	0,20\$ /milla más que los buses diesel
Combustible:	0,16\$ /milla más que diesel
Infraestructura:	<ul style="list-style-type: none"> • 5 millones /terminal para la estación de combustible (capacidad 30 buses/hora) • 10-40 millones /terminal para modificaciones de seguridad • Significativamente mayores costos para los sitios urbanos limitados, especialmente para los edificios terminales de varios pisos

La razón para los altos costos de combustibles GNC en Nueva York se debe al limitado espacio disponible para las instalaciones de expendio de este combustible, y, también, el hecho de que los talleres existentes para su mantenimiento requieren de modificaciones para acomodar los buses GNC. Otros sistemas de transporte público han experimentado costos menores.

Resultados del uso de buses GNC:

- a. Los buses GNC son sólo 50-75 % tan confiables como los buses diesel comparables.
- b. Los buses GNC son 41% menos eficientes en energía que los buses diesel en servicio de ciudad.
- c. Los buses GNC son mucho más caros de operar que los buses diesel.

2. Buses híbridos

Lecciones aprendidas de los Buses Híbridos - Operacionales:

- d. A los operadores de buses y pasajeros les gusta viajar en vehículos silenciosos, suaves; excelente aceleración y frenado.
- e. Capaz de ser usado en todas las rutas NYCT
- f. El bus no retroceda cuando esté en subidas.

Lecciones Aprendidas del Bus Híbrido - Técnicas:

- a. Reacondicionamiento de la batería del autobús.
- b. La programación debe entregar un sistema de control estable
- c. Se debe determinar la durabilidad del filtro de partículas
- d. Se necesita motores diesel pequeños "más limpios", con programación de motor específica para híbrido.

3. Tecnologías de diesel más limpios

Los filtros de partículas CRTTM que se usan en el programa de NYCT requieren de combustible con bajo contenido de azufre para su operación. Por lo tanto, dos factores tienen que considerarse en la evaluación ambiental: un combustible más limpio y el tipo de filtro.

El uso de diesel de ultra bajo contenido de azufre (ULSD) en el ciclo Central Business District (CBD) dio como resultado una reducción promedio de 76% en HC (hidrocarburos), 29% reducción promedio en CO, y 9% reducción promedio en PM.

El ciclo CBD, compara la reducción en las emisiones promedio de un vehículo con dispositivo postcombustión y un combustible ULSD obteniéndose el siguiente resultado: 92% para HC, 94% para CO, y 88% para PM.

En conclusión las reducciones de emisiones en el Ciclo de Bus de NY con el filtro CRT fueron incluso mayores que con CBD: 93 - 98% reducción de HC, CO, y PM, con respecto al CO₂ y NO_x, ni el combustible más limpio ni el filtro lograron reducciones de emisiones significativas, los valores siendo en algunos casos levemente menores, y en otros levemente mayores que para el escenario línea base.

Tabla A4 Resultados de las pruebas de emisiones con el CRT^{TM60}

Bus ID	Test Cycle	Configuration	Fuel	FE	CO2	NOx	THC	CO	PM
				(mpg)	g/mile	g/mile	g/mile	g/mile	g/mile
NYCT #6019	CBD	OEM	LSD	3.3	2942	25.6	0.18	1.8	0.21
NYCT #6019	CBD	OEM	ULSD	3.4	2946	25.6	0.06	1.2	0.16
NYCT #6019	CBD	CRT	ULSD	3.1	3236	26.4	0.03	0.16	0.04
% Reduction Baseline to ULSD					-0.2	0.0	66.7	34.7	23.8
% Reduction Baseline to ULSD & CRT					-10.0	-3.1	83.3	91.4	82.4
Bus ID	Test Cycle	Configuration	Fuel	FE	CO2	NOx	THC	CO	PM
				(mpg)	g/mile	g/mile	g/mile	g/mile	g/mile
NYCT #6019	NYBUS	OEM	LSD	1.5	6483	70.3	0.91	13	0.55
NYCT #6019	NYBUS	CRT	ULSD	1.4	7177	73.3	0.06	0.23	0.04
% Reduction Baseline to ULSD & CRT					-10.7	-4.3	93.4	98.3	93.3
Bus ID	Test Cycle	Configuration	Fuel	FE	CO2	NOx	THC	CO	PM
				(mpg)	g/mile	g/mile	g/mile	g/mile	g/mile
NYCT #6065	CBD	OEM	LSD	3.3	2897	23.3	0.26	2.1	0.18
NYCT #6065	CBD	OEM	ULSD	3.5	2884	25.1	0.04	1.6	0.12
NYCT #6065	CBD	CRT	ULSD	3.7	2879	23.8	0	0.09	0.01
% Reduction Baseline to ULSD					0.5	-7.6	85.7	23.9	35.0
% Reduction Baseline to ULSD & CRT					7.5	-2.1	100.0	95.9	94.0

Tabla A5 Resultados de las pruebas de emisiones de los CNG Buses⁶¹

Engine Type	Bus No.	Location	Test Cycle	Test Location	F.E.	CO2	NOx	THC	CO	PM
					(mpg)	(g/mile)	(g/mile)	(g/mile)	(g/mile)	(g/mile)
1999 Ser 50G **	824	NYCT	CBD	Env. Canada		2112	44	19	20	0.090
1999 Ser 50G	824	NYCT	CBD	U. West Virginia	3.2	2264	15.9	23.1	12.9	0.020
1999 Ser 50G	854	NYCT	CBD	U. West Virginia	3	2421	13.8	18	12.4	0.010
1998 Ser 50G		NYDOT	CBD	U. West Virginia	2.6	2785	9.7	26.06	10.8	0.020
1998 L10G		Mass PA	CBD	U. West Virginia	3.1	2392	25	15.2	0.6	0.020
1996 L10G	4642	LAMTA	CBD	MTA/CARB	4.39	2239	27.43	10.722	25.16	0.023
1996 L10G	4740	LAMTA	CBD	MTA/CARB	3.74	2688	42.39	11.34	0.08	0.013
Average Emission			CBD			3.37	2505	23.66	16.26	9.81
1999 Ser 50G	824	NYCT	NY Bus	Env. Canada		5064	60	77	54	0.060
1999 Ser 50G	824	NYCT	NY Bus	U. West Virginia	1.3	5660	29.8	101	42	0.010
1999 Ser 50G	854	NYCT	NY Bus	U. West Virginia	1.3	5660	22.6	57.9	32.3	0.010
1998 Ser 50G		NYDOT	NY Bus	U. West Virginia	1.1	6535	15.3	73.34	31.7	0.110
1998 L10G		Mass PA	NY Bus	U. West Virginia		6090	113	70.24	29	0.140
1996 L10G	4642	LAMTA	NY Bus	MTA/CARB	1.9	4754	22.47	51.26		0.085
1996 L10G	4740	LAMTA	NY Bus	MTA/CARB	1.74	5696	99.89	35.15	8.67	0.105
Average Emission			NY Bus			1.47	5623	51.87	66.56	32.95

⁶⁰ http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/articles-55126_interim_report.pdf⁶¹ http://www.cleanairnet.org/infopool_es/1525/articles-55126_interim_report.pdf

CONCLUSIONES

- ♣ Se espera que dentro de 10 años que el 94% del parque automotor diesel posea tecnologías limpias
- ♣ Retirar los buses de tecnologías obsoletas y reemplazarlos por buses nuevos que cuenten con tecnologías limpias siendo esto una estrategia para la reducción de emisiones, y con esto se logra disminuir los costos de inversión en salud.