



UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA

MEDICIONES EXPERIMENTALES DE FACTORES DE EMISIÓN EN
DINAMÓMETRO DE CHASIS PARA VEHÍCULOS PESADOS

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

DAVID ALEJANDRO ELGUETA JAQUE

PROFESOR GUIA:
MAURICIO OSSES ALVARADO

MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
ROBERTO CORVALÁN PAIVA
ALIOSHA REINOSO DURÁN

SANTIAGO DE CHILE
AGOSTO 2007

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TITULO DE
INGENIERO CIVIL MECANICO
POR: DAVID ELGUETA JAQUE
FECHA: 12 de Septiembre de 2007
PROF. GUIA: Sr. MAURICIO OSSES A.

DETERMINACIÓN EXPERIMENTAL DE FACTORES DE EMISIÓN EN DINAMÓMETRO DE CHASIS PARA VEHÍCULOS PESADOS

El avance de un sistema de transporte público moderno y las variadas situaciones de contingencia ambiental, crean la necesidad de estimar los factores de emisión asociados a nuevas tecnologías de buses de transporte público en la ciudad de Santiago.

El objetivo principal del presente trabajo es determinar, mediante ensayos experimentales en un dinamómetro de chasis, los factores de emisión asociados a buses del transporte público. Esto incluye buses convencionales hasta buses pertenecientes a las nuevas tecnologías disponibles con un sistema de transporte moderno. Con esto se espera contribuir a la generación de inventarios de emisión representativos de las tecnologías y modos de operación del transporte público en Santiago.

La metodología se dividió en 3 etapas. La primera etapa corresponde a la realización del ensayo de desaceleración libre, con el objetivo de determinar experimentalmente la inercia y coeficientes de roce del aire y las ruedas para cada bus ensayado. La segunda etapa fue el desarrollo de 32 ensayos experimentales en un dinamómetro de chasis para vehículos pesados, perteneciente al Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV). La tercera etapa consistió en el procesamiento de los datos. Se compararon las emisiones contaminantes dependiendo de las tecnologías de los buses, los ciclos de conducción, el nivel de azufre en los combustibles y las fases de cada ciclo.

Se obtuvieron factores de emisión para 8 tecnologías de buses existentes en Santiago en 5 contaminantes; hidrocarburos totales (HC), óxido de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂) y material particulado respirable (MP10). Al ensayar los buses con distintos ciclos de conducción, aquellos correspondientes a la ciudad de Santiago resultaron ser más exigentes que el ciclo internacional, lo que se traduce en mayores emisiones contaminantes. A modo de ejemplo, se obtuvo en promedio un 37% mayor de hidrocarburos (HC), un 43% mayor de óxidos de nitrógeno (NO_x) y un 67% mayor de material particulado respirable en los ciclos locales.

El resultado más importante en el presente trabajo corresponde a los factores de emisión para los buses de transporte público en la Región Metropolitana. Al concluir sobre estos factores, su obtención queda determinada por variables propias de cada vehículo como son su tecnología y capacidad de pasajeros, además de variables externas como son las condiciones de circulación y su nivel de mantención. Realizando un análisis de los resultados de los factores de emisión, se puede concluir que la mayor reducción en términos de emisiones corresponde a la implementación del uso de filtros de partículas y oxidación catalítica de gases. La comparación de emisiones utilizando dos ciclos de conducción diferentes indica que las emisiones son mayores en todos los contaminantes al utilizar ciclos locales, principalmente debido a que el ciclo internacional es menos exigente que los ciclos Santiago ya que el ciclo internacional presenta menores detenciones (6% en ralentí), lo cual reduce los modos de aceleración al compararlo con los ciclos locales los cuales presentan un promedio de 21% en ralentí.

Índice

1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	1
1.2.1. Objetivo General	1
1.2.2. Objetivos Específicos	2
1.3. Metodología General	3
2. Antecedentes Generales	4
2.1. Referencia a Trabajo Realizado	4
2.2. Procedimiento de Coast-Down o Desaceleración Libre	7
2.2.1. Cálculo Teórico	8
2.2.2. Cálculo Experimental	10
2.3. Factores de Emisión	10
2.4. Mediciones en Dinamómetro de Chasis	12
2.4.1. Emisiones máscas	12
2.4.2. Medición gases escape	12
2.5. Ciclos de Conducción	17
2.5.1. Ciclo de referencia internacional	17
2.5.2. Ciclos representativos de Santiago	18
2.5.3. Análisis y conclusiones	20
3. Metodología	23
3.1. Descripción del Laboratorio	23
3.2. Metodología de Trabajo	29
3.2.1. Primera campaña de mediciones	30
3.2.2. Segunda campaña de mediciones	30

3.2.3.	Tercera campaña de mediciones	30
3.2.4.	Procedimiento preparación y montaje del vehículo en el dinamómetro	30
3.3.	Ciclos de Conducción Utilizados	32
3.4.	Flota Utilizada en el Estudio	33
4.	Resultados	35
4.1.	Resultados Coast-Down	35
4.1.1.	Cálculo Teórico	36
4.1.2.	Cálculo Experimental	37
4.1.3.	Discusión y conclusiones	40
4.2.	Factores de Emisión	44
4.2.1.	Buses que cumplen las exigencias antes del Transantiago	44
4.2.2.	Buses que cumplen las exigencias estándar del Transantiago o Euro III	46
4.2.3.	Buses que permiten superar la exigencia estándar del Transantiago .	48
4.3.	Comparación de Emisiones de cada Fase de los Ciclos de Conducción	54
4.4.	Comparación Emisiones Ciclo ETC y Santiago	58
4.5.	Comparación de Emisiones Utilizando Combustible Referencia y Combustible Comercial	61
4.6.	Comparación Emisiones Tecnologías con y sin Filtros	65
4.7.	Comparación de emisiones según tipo de coast down	68
5.	Discusión y Conclusiones	70
5.1.	Conclusiones Generales	70
5.2.	Discusión y Conclusiones de la Metodología	71
5.3.	Discusión y Conclusiones de los Resultados	71
6.	Bibliografía	73
7.	Anexos	75

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

La ciudad de Santiago es una de las metrópolis más contaminadas del mundo en materia ambiental, con una situación topoclimatológica caracterizada por una cuenca cerrada y sometida a una capa de inversión térmica que impide la dispersión de los contaminantes atmosféricos.

El antiguo sistema de locomoción colectiva se encontraba obsoleto y se espera que el nuevo sistema o Transantiago modernice todo el transporte público. Esto debe modificar completamente la forma de viajar por la ciudad de Santiago y mejorar en forma significativa la calidad de vida de sus usuarios y habitantes debido a la menor contaminación ambiental que se producirá con un sistema más moderno.

Para reconocer este beneficio, es necesario medir los factores de emisión representativos de esta nueva tecnología, es decir, medir una relación entre la cantidad de contaminante emitido a la atmósfera y unidad de actividad, que puede corresponder a kilómetros recorridos por un móvil o unidad de potencia. Estos factores de emisión actualmente se desconocen en la ciudad de Santiago y son necesarios para un mejor manejo en el control y gestión de la contaminación ambiental.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo General

El objetivo general de la presente memoria es determinar experimentalmente los factores de emisión, es decir, g/km de hidrocarburos (HC), monóxido de carbono (CO), dióxido de carbono (CO₂), óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado respirable (MP10),

asociados a buses del transporte público de la Región Metropolitana.

1.2.2. Objetivos Específicos

Los objetivos específicos son:

- Realizar una revisión bibliográfica de factores de emisión existente internacionalmente.
- Identificar las flotas representativas de las tecnologías de buses existentes en la Región Metropolitana.
- Identificar ciclos de conducción representativos del transporte público en la ciudad de Santiago.
- Determinar experimentalmente las características de inercia para distintos tipos de chasis de buses¹.
- Efectuar medición de emisiones en dinamómetro de chasis en base al ciclo de conducción europeo transiente de referencia, ETC.²
- Efectuar medición de emisiones en dinamómetro de chasis en base a ciclos de conducción representativos de la ciudad de Santiago.
- Determinar factores de emisión CO , HC , NO_x y MP_{10} para distintas tecnologías de buses de la ciudad de Santiago.
- Realizar comparación de emisiones entre los ciclos de conducción Santiago y ETC.
- Realizar comparación de emisiones entre las fases 1 y 2 (ver capítulo 2, sección 2.5) de los ciclos Santiago y ETC.
- Realizar comparación de emisiones al utilizar 2 tipos de combustibles.
- Realizar comparación entre tecnologías de buses con y sin filtros de partículas.

¹Coast-Down, Ensayo de aceleración libre

²European Transient test Cycle

1.3. Metodología General

En la siguiente figura se precisan los pasos considerados más importantes para obtener los factores de emisión para vehículos del transporte público.

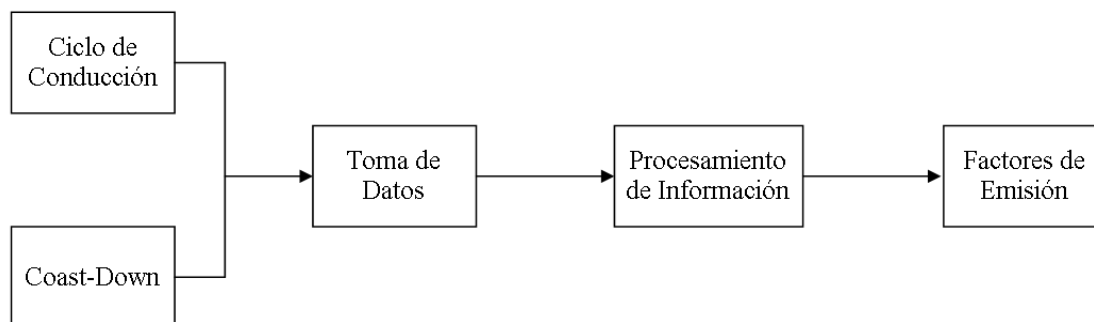


Figura 1.1: Etapas del Trabajo

Las etapas de trabajo mostradas en la figura 1.1 se subdividen en las siguientes labores:

- Recopilación de antecedentes sobre experiencias realizadas anteriormente en vehículos pesados.
- Recopilación de antecedentes sobre ciclos de conducción usados nacional e internacionalmente.
- Realización de pruebas experimentales de desaceleración libre o Coast-Down.
- Ejecución de los ensayos en el banco del dinamómetro en 3 campañas de medición.
- Proposición de factores de emisión para vehículos pesados.
- Realización de diversos análisis comparativos.
- Recomendación sobre líneas de acción futuras de investigación.

Capítulo 2

Antecedentes Generales

En esta sección se presentan los trabajos e información utilizada en la elaboración del informe. En primer lugar se presenta una investigación realizada en California EEUU, en la cual se obtienen factores de emisión de vehículos pesados. En segundo lugar se realiza una breve introducción al cálculo de la inercia de cada bus necesaria para realizar procedimientos experimentales en un dinamómetro de chasis. En tercer lugar se presenta una breve descripción del significado de factores de emisión y de su dependencia de ciertas variables. En cuarto lugar se presentan aspectos relacionados con la medición de vehículos pesados y su teoría de medición. Por último se presentan ciclos de conducción que pretenden simular las condiciones de circulación en particular.

2.1. Referencia a Trabajo Realizado

Se ha realizado un gran número de trabajos e investigaciones relacionados con la medición de emisiones vehiculares en dinamómetros de chasis. La mayoría tiene el propósito de caracterizar los factores de emisión del transporte público y urbano de una ciudad, además de caracterizar las tecnologías de transporte representativas del lugar, tanto para agencias reguladoras como instituciones de investigación, entre otras. Se presenta a continuación un breve resumen de una de las más importantes referencias.

Resultados de Emisiones en Dinamómetro de Chasis para Buses con Combustible Diesel y Alternativos [1]

El propósito de este artículo fue el de proveer de datos de emisión para vehículos que han sido analizados en los lugares de prueba de la MTA¹ (Autoridad Metropolitana de Transporte

¹ Los Angeles County Metropolitan Transportation Authority

del Condado de Los Ángeles).

La metodología usada en el desarrollo de la presente memoria, es muy similar a la utilizada en esta referencia. Los pasos fueron los siguientes:

- Desarrollo de un ciclo representativo de conducción. Para este caso se utilizó el ciclo ADB² (Ciclo de Bus de Diseño Avanzado), el cual provee los requerimientos de desempeño para buses de transporte público y es utilizado para la evaluación de vehículos de la ETF³ (Procedimiento Federal de Pruebas). Este ciclo consiste de 3 partes (ver figura 2.1 y 2.2), las cuales fueron diseñadas para representar el espectro de servicio que desarrolla un bus de transporte público en operación.

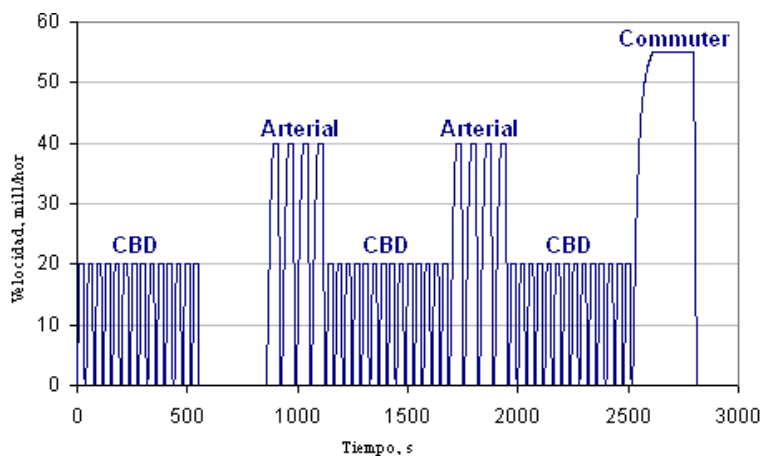


Figura 2.1: Composición del Ciclo ADB

²Advanced Design Bus Cycle

³Federal Test Procedure

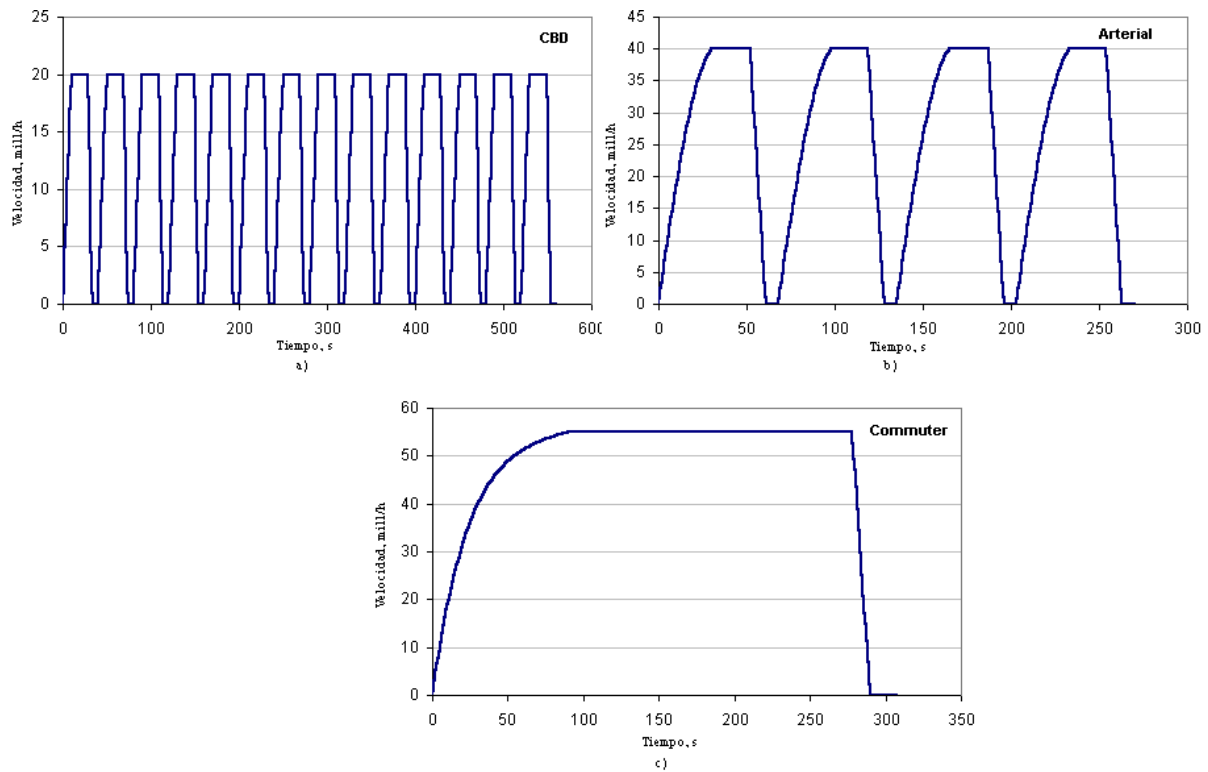


Figura 2.2: Fases del Ciclo ADB. a)segmento CBD, b)segmento Arterial, c)segmento Commuter

Los ciclos de conducción fueron seguidos por un chofer utilizando un controlador gráfico el cual proyecta el ciclo de conducción en la pantalla.

- Simulación de la Carga del Camino. Para medir las emisiones de un vehículo durante la operación en el ciclo, es necesario simular en el dinamómetro las condiciones de conducción en las calles de la ciudad donde se realiza el estudio. En otras palabras, mientras el vehículo está operando, el dinamómetro debe medir las fuerzas que actúan sobre el vehículo como si éste estuviese viajando en la ciudad.
- Resultados del Test de Emisiones. La tabla 2.1 muestra un resumen de los datos obtenidos luego de realizar los ensayos.

Tabla 2.1: Resumen de los Datos del Test

Fecha de Ensayo	Número del Vehículo	Tipo de Combustible	Motor	Ciclo	Peso (lbs)	Emisiones Promedio (g/milla)			
						HC	CO	NOx	MP
Abr-92	8841	Diesel	1981 6V92 DDC	CBD	27500	1,8	9,1	21,5	1,3
Abr-92	8695	Diesel	1981 6V92 DDC	CBD	27500	1,3	9,7	23,7	1,2
Abr-92	8707	Meth/Avocet	1981 6V92 DDC	CBD	30950	5.0 ¹	7,3	20,5	0,5
Abr-92	RTA 3001	M100	1990 6V92 DDC	CBD	32080	0.12 ¹	1.0	19,6	0,3
May-92	8251	Meth/Avocet	1981 6V92 DDC	CBD	27500	5.0 ¹	20,8	14,2	0,5
May-92	8251	Meth/Avocet	1981 6V92 DDC	CBD	30950	5.1 ¹	22,2	15,4	0,5
Jun-92	2009	Diesel	1988 6V92 DDC	CBD	31250	1,7	15,6	28,0	1,9
Jul-92	2009	Diesel	1988 6V92 DDC	EPA	31250	1,3	7,4	19,1	nm ²
Jun-92	2394	Diesel	1989 6V92 DDC	CBD	31250	1,6	9,3	27,4	1,4
Jun-92	2394	Diesel	1989 6V92 DDC	ART	31250	1,1	3,2	25,1	0,7
Jun-92	2394	Diesel	1989 6V92 DDC	EPA	31250	1,3	5,2	20,7	1,0
Nov-92	2394	Diesel	1989 6V92 DDC	CBD	31250	1,8	6,1	28,5	1,0
Ago-92	1168	Diesel	1987 6V92 DDC	CBD	32250	1,7	16,0	26,9	0,3
Ago-92	1168	Diesel	1988 6V92 DDC	CBD	32250	1,8	25,2	27,7	0,4
Ago-92	1168	Diesel	1989 6V92 DDC	CBD	32250	1,8	15,6	26,3	0,3
Sep-92	1800	CNG	1989 Cummins L10	CBD	35350	15.8 ³	20,6	14,2	0,1
Sep-92	1800	CNG	1989 Cummins L10	ART	35350	16.6 ³	19,0	14,7	0,1

1 HC meth= emisiones de HC son directamente medidas desde el analizador HFID, incluye emisiones de Metanol.

2 nm= no medido.

3 son el total de hidrocarburos, HC

2.2. Procedimiento de Coast-Down o Desaceleración Libre

Para simular correctamente la operación de los autobuses hay que considerar los factores que contribuyen a las pérdidas energéticas al transitar en un camino, por ejemplo, resistencia al roce con el aire, pérdidas debidas al roce de los neumáticos con el pavimento y pérdidas debido a la existencia de pendientes en el camino. Este cálculo se realiza mediante el procedimiento de Coast-Down o ensayo de desaceleración libre, con lo cual se obtiene la inercia de los vehículos y los coeficientes de pérdida mencionados anteriormente.

El movimiento de un vehículo se puede simular según la siguiente ecuación:

$$m \cdot v \cdot \frac{dv}{dt} = \underbrace{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^3}_{F_2} + \underbrace{\mu \cdot m \cdot g \cdot v}_{F_0} + \underbrace{m \cdot g \cdot \text{sen}(\theta) \cdot v}_{F_1} \quad (2.1)$$

Donde:

$mv \frac{dv}{dt}$: Potencia inercial del vehículo.

$\frac{1}{2} \rho A C_d v^3$: Pérdida de potencia debido a resistencia aerodinámica.

μmgv : Pérdida de potencia debido al roce de los neumáticos con el pavimento.

$mgv\text{sen}(\theta)$: Pérdida/Aumento de potencia debida (o) a pendientes en el camino.

m: masa vehicular [kg].

C_d : Coeficiente de pérdida Aerodinámica.

A: Área frontal [m^2].

ρ : Densidad del aire [kg/m^3].

v: Velocidad del vehículo [m/s].

g: Aceleración Gravitacional [m/s^2].

μ : Coeficiente de resistencia a la rotación.

θ : Pendiente de la carretera.

En la ecuación (2.1) los factores agrupados como F_0 , F_1 y F_2 corresponden a factores de carga debido al roce de los neumáticos con el pavimento, a la existencia de pendientes y al roce del vehículo con el aire, respectivamente. Estos factores son necesarios para que el dinamómetro pueda simular la inercia propia de cada bus, por lo que su cálculo resulta de vital importancia.

Para obtener estos valores se puede proceder de 2 maneras distintas, las cuales se explican a continuación.

2.2.1. Cálculo Teórico

Teóricamente la ecuación (2.1) se puede escribir de la siguiente manera:

$$P_{resistiva} = P_{resistiva\ rodadura} + P_{resistiva\ aerodinámica} \quad (2.2)$$

Para la ecuación anterior se omitió el término que implica pérdidas debido a pendientes en el camino. La potencia de resistencia a la rodadura o resistencia de los neumáticos con el pavimento ($P_{resistiva\ rodadura}$) se calcula como:

$$P_{resistiva\ rodadura} = \mu \cdot m \cdot g \cdot v = F_0 \cdot v \quad (2.3)$$

Donde:

$$F_0 = \mu mg.$$

De la ecuación anterior, el valor de μ es el único que no se puede calcular empíricamente.

Mediante estudios realizados anteriormente, los valores para μ se determinan según la tabla 2.2.[2]:

Tabla 2.2: Coeficiente de Roce Aerodinámico

Tipo vehiculo		Peso bruto vehicular [ton]	
		categoría	μ
Urban bus	midi	hasta 15	0,00713
	standard	15 a 18	0,00652
	articulado	Mayor que 18	0,0067

Para calcular la potencia resistiva aerodinámica ($P_{resistiva\ aerodinámica}$), se utiliza la ecuación (2.4):

$$P_{resistiva\ aerodinamica} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^3 = F_2 \cdot v^3 \quad (2.4)$$

Donde:

$$F_2 = \frac{1}{2} \rho A C_d.$$

Al igual que en el caso anterior, el valor de C_d no es posible calcularlo empíricamente.

Los valores para C_d se determinan según la tabla 2.3[2]:

Tabla 2.3: Coeficiente de Roce a la Rodadura

Tipo vehiculo		Peso bruto vehicular [ton]	
		categoría	C_d
Urban bus	midi	hasta 15	0,55
	standard	15 a 18	0,58
	articulado	Mayor que 18	0,62

Luego, con los valores anteriores de μ y C_d , más los datos propios del vehículo se obtienen los factores F_0 y F_2 .

Para el cálculo anterior no se consideraron pérdidas energéticas debido a la existencia de pendientes por lo que el factor F_1 es nulo.

2.2.2. Cálculo Experimental

Experimentalmente los factores F_0 , F_1 y F_2 se determinan en pista. Para esto es necesario determinar las velocidades y los tiempos que toma el bus en detenerse, a partir de una velocidad dada. Puesto que el coeficiente de roce de los neumáticos con el pavimento (μ) y el coeficiente de roce del vehículo con el aire (C_d) no se pueden determinar con medidas estáticas, se emplea un método empírico para determinar estos valores. Se coloca cada vehículo del programa en un camino nivelado y se le lleva hasta una velocidad v y luego se permite que el vehículo desacecelere libremente mientras se recopilan los datos mediante loggers del sistema de posicionamiento global o GPS.

Luego se manipulan los datos de velocidad-tiempo para obtener un mapa de aceleración dv/dt versus v^2 . Para lo cual es necesario reescribir la ecuación (2.1) de la siguiente manera.

$$\frac{m \cdot dv}{dt} = \frac{\rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2}{2} + m \cdot \mu \cdot g \quad (2.5)$$

donde a los términos $\frac{\rho A C_d v^2}{2 \cdot m}$ y $m \mu g$ se les llama C_1 y C_2 .

Sometiendo a una regresión lineal de mínimos cuadrados los datos de la aceleración dv/dt versus v^2 , se obtiene una ecuación de recta con las constantes C_1 y C_2 de donde se despejan las variables μ y C_d , con lo cual se calculan los coeficientes F_0 y F_2 .

La metodología y resultados de ambos procedimientos señalados anteriormente se verán con mayor detalle en el capítulo 4, sección 4.1 del presente trabajo.

2.3. Factores de Emisión

Para el caso de los vehículos, lo que interesa es la cantidad del contaminante emitido durante su funcionamiento, y a esto se le llama factor de emisión, el que puede expresarse en términos de moléculas o masa por unidad de potencia o por unidad de distancia recorrida. Las unidades frecuentemente utilizadas son g/kWh o g/km .

Cuando un motor se ensaya en un dinamómetro de motor, no existe distancia recorrida, por lo que las emisiones se miden en g/kWh . Sólo es posible obtener medidas en gramos por kilómetro cuando se utiliza un dinamómetro de chasis. Esta manera de medir es la más representativa ya que no es sólo el motor, sino todo el vehículo con su propio peso el que está siendo evaluado.

El consumo de combustible y las emisiones de contaminantes de vehículos dependen de una gran variedad de factores, entre los cuales se incluyen: tipo de vehículo y motor, antigüedad del vehículo y condiciones de afinamiento, condiciones climáticas y temperatura del motor.

Las condiciones reales de operación de los vehículos, como las condiciones del tráfico (camino urbanos congestionados, caminos rurales expeditos, etc.), el uso del vehículo (viajes cortos o largos, frecuencia de los viajes, etc.) y las conductas del conductor (mayores o menores niveles de aceleración) amplían la gama de variaciones de consumo de combustible y de emisiones de contaminantes.

- Velocidad. Al reducir la velocidad con que transita un vehículo, las emisiones (en su gran mayoría, exceptuando los NOx) disminuyen pero en una menor proporción. Esto se traduce en un aumento de las emisiones por kilómetro cuando se reduce la velocidad promedio.
- Potencia. Al existir factores de emisión expresados en g/kWh para cada categoría de vehículo, entonces se deduce que a mayor potencia, mayores son las emisiones. Una mayor potencia puede darse en los siguientes casos:
 - Para acelerar se deben aumentar las revoluciones por minuto del motor y para ello se le exige una mayor potencia, lo que se traduce en mayores emisiones. Un motor más revolucionado no significa necesariamente mayor velocidad del vehículo, ya que dicha relación depende del cambio en que se esté operando.
 - Al ir de subida o al cargar un peso mayor, la potencia exigida al motor será mayor y esto aumentará la emisión de contaminantes.
 - Para una misma categoría de vehículo, a mayor cilindrada mayor será la potencia media entregada por el motor y por consecuencia emitirá más.
- Temperatura Ambiente. Las emisiones evaporativas generadas por los vehículos pueden ser separadas en 2 tipos. La primera son las emisiones a temperatura estable de funcionamiento o emisiones en caliente y las segundas son las emisiones durante el tiempo en que el vehículo se está calentando o emisiones en frío. Los motores de combustión interna producen una mayor emisión durante el tiempo en que el motor se está calentando antes de alcanzar su temperatura estable de funcionamiento, es decir, las emisiones

en frío son mayores que las emisiones en caliente. Mientras menor es la temperatura ambiente, mayor es el tiempo que demora el motor en alcanzar su temperatura normal de funcionamiento, y por lo tanto, mayor y por más tiempo es la emisión adicional generada por el vehículo. Sin embargo si el vehículo es utilizado todo el día, como es el caso de los buses, la proporción del tiempo en estado frío es pequeña y por lo tanto las emisiones promedio durante todo el día son poco sensibles a la temperatura ambiente.

- Tecnología. Cada año los vehículos son más eficientes y tienen incorporadas modificaciones de acuerdo a las nuevas tecnologías, así tienden a ser menos contaminantes que los mismos modelos de años anteriores. Esto no sólo se debe a la preocupación por el tema ambiental sino a que también los vehículos son cada vez más eficientes en cuanto al consumo de combustible, lo que se traduce en menores emisiones.
- Deterioro. Los vehículos de un mismo año/modelo aumentan sus emisiones a medida que envejecen debido al deterioro que sufren por el uso.

2.4. Mediciones en Dinamómetro de Chasis

2.4.1. Emisiones másicas

La medición de la masa de los contaminantes emitidos se realiza por medio de los llamados ensayos de emisiones, en los cuales se mide la masa de un contaminante dado, expresándola en unidades de masa dividida por la longitud del recorrido (gramos/kilómetro, libras/milla, etc). Este tipo de medición permite asignar un factor de emisión a cada categoría vehicular, el cual queda referido al ciclo de conducción usado en su determinación.

2.4.2. Medición gases escape

La medición de gases de escape es una medición másica de CO₂, CO, NO_x y HC. Para ello, es necesario conocer la concentración de cada uno de estos gases, su densidad y el volumen total en que se encuentran diluidos. Este procedimiento se cumple para cada uno de los gases según las ecuaciones siguientes:

$$HC_{mass} = \rho_{HC} \cdot V_{mix} \cdot HC_{conc}/1,000,000 \quad (2.6)$$

$$CO_{mass} = \rho_{CO} \cdot V_{mix} \cdot CO_{conc}/1,000,000 \quad (2.7)$$

$$CO_{2, mass} = \rho_{CO_2} \cdot V_{mix} \cdot CO_{2, conc} \cdot 0,01 \quad (2.8)$$

$$NOx_{mass} = \rho_{NO_2} \cdot V_{mix} \cdot NOx_{conc} \cdot K_h / 1,000,000 \quad (2.9)$$

donde:

HC_{mass} = Emisiones másicas de HC medidas en gramos durante un ensayo.

CO_{mass} = Emisiones másicas de CO medidas en gramos durante un ensayo.

$CO_{2, mass}$ = Emisiones másicas de CO_2 medidas en gramos durante un ensayo.

NOx_{mass} = Emisiones másicas de NOx medidas en gramos durante un ensayo.

ρ_{HC} = densidad de HC, en gr/cm^3 .

ρ_{CO} = densidad de CO, en gr/cm^3 .

ρ_{CO_2} = densidad de CO_2 , en gr/cm^3 .

ρ_{NO_2} = densidad de NO_2 , en gr/cm^3 .

HC_{conc} = Concentración de HC en los gases diluidos a las condiciones del ensayo y corregido por el background, en ppm.

$NO_{2, conc}$ = Concentración de NO_2 en los gases diluidos a las condiciones del ensayo y corregido por el background, en ppm.

CO_{conc} = Concentración de CO en los gases diluidos a las condiciones del ensayo y corregido por el background, en ppm.

$CO_{2, conc}$ = Concentración de CO_2 en los gases diluidos a las condiciones del ensayo y corregido por el background, en %.

V_{mix} = Volumen total de gases de escape diluidos dentro del túnel, corregido a condiciones estándar (293K, y 101.3kPa).

K_h = Factor de corrección producto de la humedad del ambiente en que se realiza el ensayo.

Hay que notar que las emisiones pueden ser durante un tiempo, una cantidad de kilómetro, unidad de potencia al freno, etc. Según las ecuaciones anteriores las emisiones másicas de los gases mencionados se obtienen del valor de una densidad (constante), una concentración y un volumen. En las siguientes secciones se individualizarán los términos de concentración para cada uno de los gases, volumen y factor de corrección por humedad del ambiente.

Concentraciones de los gases

En términos generales, las concentraciones de cada uno de los gases se miden a partir de la concentración del gas en los gases de escape diluidos descontando la concentración del gas en el aire que fue aportado para realizar la dilución, pero considerando la proporción en que gases y aire se encuentran mezclados. Esto se traduce en las siguientes ecuaciones para cada uno de los gases.

$$HC_{conc} = HC_e - HC_d \cdot \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (2.10)$$

$$CO_{conc} = CO_e - CO_d \cdot \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (2.11)$$

$$CO_{2,conc} = CO_{2,e} - CO_{2,d} \cdot \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (2.12)$$

$$NOx_{conc} = NOx_e - NOx_d \cdot \left(1 - \frac{1}{DF}\right) \quad (2.13)$$

Donde:

HC_e = concentración de HC en los gases de escape diluidos, en ppm.

HC_d = concentración de HC en el aire de dilución.

CO_e = concentración de CO en los gases de escape diluidos en ppm.

CO_d = concentración de CO en el aire de dilución, en ppm.

$CO_{2,e}$ = concentración de CO₂ en los gases de escape diluidos, en %.

$CO_{2,d}$ = concentración de CO₂ en el aire de dilución, en %.

NOx_e = concentración de NOx en los gases de escape diluidos, en ppm.

NOx_d = concentración de NOx en el aire de dilución, en ppm.

DF = factor de dilución para diesel y gasolina.

De los términos recién mencionados, las concentraciones de HC, CO₂ y NOx de los gases de escape diluidos y aire de dilución, son datos de entrada para el protocolo de cálculo, los restantes términos se pueden apreciar en las ecuaciones (2.14), (2.15) y (2.16)

$$CO_e = (1 - 0,01925 \cdot CO_2 - 0,000323 \cdot R) \cdot CO_{em} \quad (2.14)$$

$$CO_d = (1 - 0,000323 \cdot R) \cdot CO_{dm} \quad (2.15)$$

$$DF = \frac{13,4}{CO_2 + (HC_e + CO_e) \cdot 10^{-4}} \quad (2.16)$$

donde:

CO_{em} = concentración de CO en los gases de escape diluidos, en ppm.

CO_{dm} = concentración de CO en el aire de dilución, en ppm.

R = humedad relativa del ambiente en que se realiza el ensayo, en %.

x e y = composición del combustible Cx Hy

Volumen de los gases[8]

Las concentraciones antes medidas son concentraciones volumétricas, por lo que sabiendo el valor del volumen total de gases desplazado por la bomba durante el ensayo, y más la densidad, es posible obtener las emisiones máscas de gases. De esta forma, V_{mix} se obtiene según la ecuación (2.17) o (2.18), según el sistema de medición que se utilice.

$$V_{mix} = \frac{V_0 \cdot N \cdot (P_p - \Delta P) \cdot 293}{101,3 \cdot T_p} \quad (2.17)$$

$$V_{mix} = \frac{V_0 \cdot N \cdot (P_p - \Delta P) \cdot 528}{760 \cdot T_p} \quad (2.18)$$

donde:

V_0 = volumen desplazado por la bomba, a condiciones T_p y P_p obtenido a partir de la curva de calibración de la bomba, según la presión a la entrada y la depresión en ella, en m^3/rev .

V_{mix} = Volumen total de gas m^3 que ha circulado por la bomba, corregido a condiciones estándares 68°F (20°C) y 760 mmHg (101.3 kPa).

$N [rev]$ = Número de revoluciones de la bomba durante el ensayo.

P_p = Presión barométrica a la entrada de la bomba.

ΔP = Diferencia de presión en la bomba.

T_p = Temperatura del flujo a la entrada de la bomba.

ΔP y P_p = [kPa] Para la ecuación (2.17) y en [mmHg] para la ecuación (2.18).

T_p = [°K] Para la ecuación (2.17) y en [°R] para la ecuación (2.18).

Factor de corrección K_h

Los NOx necesitan ser corregidos por un factor que depende de las condiciones de humedad del ambiente en que se está realizando el ensayo. Aquí se presenta el protocolo para el cálculo de este factor K_h , el que depende sólo de la humedad absoluta, según la ecuación (2.19) o (2.20) según el sistema de medición que se utilice.

$$K_h = \frac{1}{1 - 0,0329 \cdot (H - 10,71)} \quad (2.19)$$

$$K_h = \frac{1}{1 - 0,0047 \cdot (H - 75)} \quad (2.20)$$

Donde:

$$H \left[\frac{g \text{ agua}}{kg \text{ aire seco}} \right] = \text{Humedad absoluta del ambiente, ecuación (2.19).}$$

$$H \left[\frac{g \text{ agua}}{lb \text{ aire seco}} \right] = \text{Humedad absoluta del ambiente, ecuación (2.20).}$$

La humedad absoluta se calcula a partir de las condiciones (presión, temperatura y humedad relativa) del ambiente en que se desarrolla el ensayo, según las dos ecuaciones siguientes dependiendo del sistema de medición que se utilice.

$$H = \frac{6,211 \cdot R \cdot P_d}{P_b - (P_d \cdot R/100)} \quad (2.21)$$

$$H = \frac{43,438 \cdot R \cdot P_d}{P_b - (P_d \cdot R/100)} \quad (2.22)$$

$$P_d = 25,4 \cdot (-4,14438 \cdot 10^{-3} + 5,76645 \cdot 10^{-3} \cdot T_d - 6,32788 \cdot 10^{-5} \cdot T_d^2) + 25,4 \cdot (2,12294 \cdot 10^{-6} \cdot T_d^3 - 7,85415 \cdot 10^{-9} \cdot T_d^4 + 6,55263 \cdot 10^{-11} \cdot T_d^5) \quad (2.23)$$

donde:

P_d = presión de vapor de agua saturado, calculado a partir de la temperatura T_d según la ecuación (2.23).

T_d = temperatura de bulbo seco [°F].

P_b = presión barométrica ambiente.

R = humedad relativa del aire ambiente, en %.

P_d y P_b = [kPa] para la ecuación (2.21) y en [mmHg] para la ecuación (2.22).
 P_d = [mmHg] para la ecuación (2.23).

2.5. Ciclos de Conducción

La determinación de la masa de contaminantes emitidos por un vehículo motorizado depende fuertemente del ciclo de conducción utilizado en su determinación. El ciclo de conducción es un conjunto de secuencias de tiempo-velocidad que provienen de información estadísticamente representativa de un área de estudio previamente determinada. Estas secuencias describen distintos parámetros característicos de conducción en el área de estudio.

Los ciclos de conducción pueden ser de dos tipos. El primer tipo, llamado ciclo transiente, representa lo más fielmente posible lo que sucede cuando un automóvil se encuentra transitando por un lugar. El otro tipo es el llamado ciclo estacionario, el cual trabaja con velocidades constantes definidas a partir del procesamiento estadístico de datos reales obtenidos en ensayos.

Actualmente se han desarrollado numerosos ciclos de conducción en diversos lugares del planeta. En Chile específicamente, se utilizan ciclos de conducción desarrollados por EEUU y Europa; sin embargo, existen trabajos relacionados con ciclos de conducción representativos de la ciudad de Santiago.

Las campañas de emisión efectuadas en el laboratorio 3CV (ver capítulo 3) utilizaron 4 ciclos de conducción. En la siguiente sección se detallan los ciclos de conducción utilizados en la experiencia.

2.5.1. Ciclo de referencia internacional

European Transient Cycle (ETC)

El ciclo ETC (también conocido como el ciclo transiente FIGE) se introdujo junto con el ESC (ciclo Europeo estacionario), para certificación de motores pesados en Europa comenzando en el año 2000 (Directiva 1999/96/EC del 13 de diciembre de 1999). Los ciclos ESC y ETC reemplazan el test R.49.

El ciclo ETC fue desarrollado en el FIGE Institute, Aachen, Alemania y se fundamenta en mediciones de ciclo real en ruta de vehículos pesados (Reporte FIGE 10405316, enero 1994). El ciclo ETC final, es una versión acortada y ligeramente modificada de la versión

Tabla 2.4: Características fases 1 y 2 ciclo ETC

Características	Fase 1	Fase 2	Ciclo Total
N° puntos (seg)	600	600	1200
Ralentí (%)	12	0	6
Operación (%)	88	100	94
Aceleración (%)	64	63	63
Frenada (%)	26	37	37
Vel. Prom.(km/hr)	23,2	69,24	46,22
Acel. Prom. (m/s ²)	0,61	0,59	0,6
Fren. Prom. (m/s ²)	-0,76	-0,69	-0,72
Vel. Max. (km/hr)	49,9	87,5	68,7

original propuesta por FIGE⁴.

Diferentes condiciones de conducción son representadas por las tres fases del ciclo ETC, las cuales incluyen una fase urbana, rural y conducción por autopista. La duración del ciclo total es de 1800 segundos, donde cada fase tiene una duración de 600 segundos. En este trabajo de memoria se emplearon las fases 1 y 2 (tabla 2.4) debido a que la tercera fase no corresponde a las condiciones de operación para buses urbanos de transporte público.

El FIGE Institute desarrolló el ciclo en dos variantes: como prueba en dinamómetro de chasis y prueba en dinamómetro de motor. El gráfico de velocidad versus tiempo para pruebas en dinamómetro de chasis, fases 1 y 2, se muestra en la Figura 2.3.

2.5.2. Ciclos representativos de Santiago

Para el estudio en el dinamómetro de chasis se generaron ciclos de conducción simulando las condiciones de operación de Transantiago en régimen. Estos ciclos distinguen el tipo de recorrido y de chasis del vehículo. Se definieron dos tipos de conducción dependiendo del tipo de servicio (troncal o local) y, a su vez, los servicios troncales se subdividen según el tipo de bus (articulado o rígido). Esto genera 3 tipos distintos de ciclo de conducción, todos ellos medidos en buses que simulan la operación en régimen de Transantiago.

- Ciclo Transantiago Antes (CTSA): representa los hábitos de conducción anterior a la implementación del sistema de transporte público para buses antiguos con chasis rígido o tipo M.

⁴Forschungsinstitut Geräusche und Erschütterungen

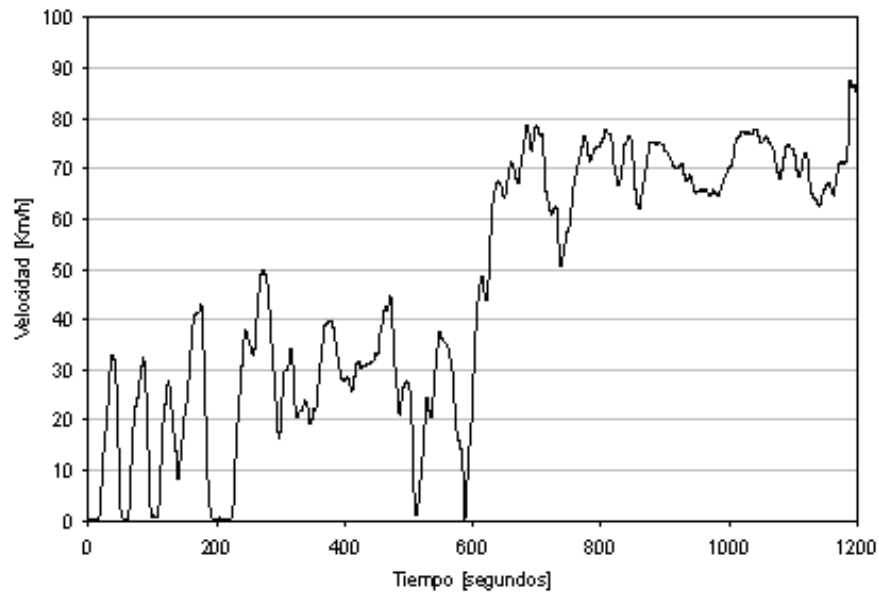


Figura 2.3: Ciclo Conducción ETC

- Ciclo Transantiago Modelado 1 (CTSM-1): representa los hábitos de conducción después de la implementación del sistema de transporte público con chasis articulado de 18 metros o buses tipo C2.
- Ciclo Transantiago Modelado 2 (CTSM-2): representa los hábitos de conducción después de la implementación del sistema de transporte público, para buses con chasis rígido de 12 metros o tipo B2.

A continuación se presentan los ciclos que corresponden a la situación antes y después de la entrada del nuevo sistema de transporte. Los ciclos explicados a continuación son llamados ciclos locales o ciclos Santiago. El primer ciclo corresponde a la etapa antes del Transantiago, ciclo de buses amarillos (CTSA); los dos ciclos siguientes representan lo que será Transantiago en su etapa de régimen, a) el ciclo para buses articulados de 18 metros (CTSM-1) y b) el ciclo para buses rígidos de 12 metros (CTSM-2). A continuación se muestran las principales variables de cada ciclo, así como sus gráficos explicativos.

Ciclo Transantiago Antes (CTSA)

El ciclo CTSA, ver figura 2.4, corresponde al ciclo sin Transantiago, el cual está compuesto por 2 etapas de 600 segundos, que representan baja y alta velocidad media respectivamente.

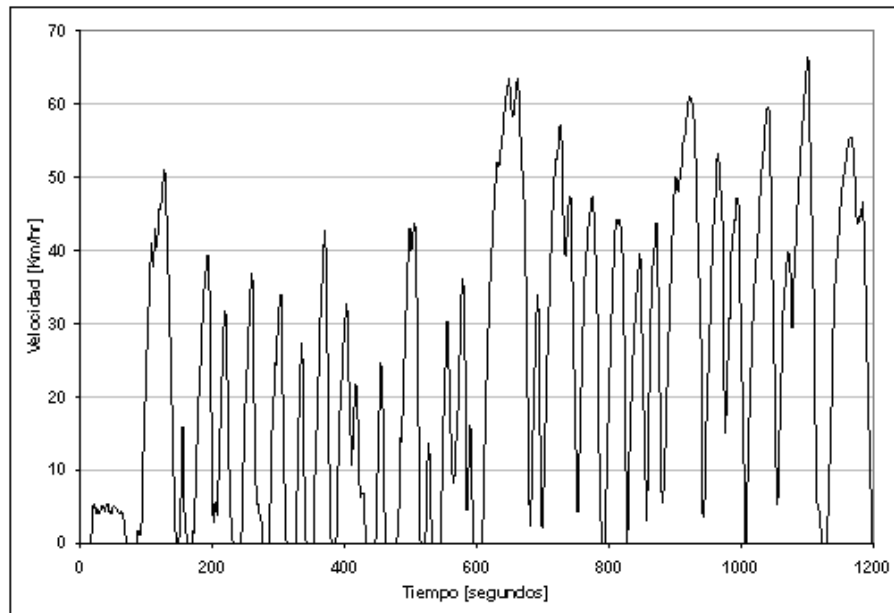


Figura 2.4: Ciclo Conducción CTSA

Se observa que el ciclo final tiene una velocidad promedio de 24 km/hr y un porcentaje de tiempo detenido de 16% .

Ciclo Transantiago Modelado 1 (CTSM-1)

El ciclo CTSM-1, ver figura 2.5, corresponde a la representación de los buses articulados de 18 metros emulando el estado de régimen del plan Transantiago. Se determinó utilizar las mediciones realizadas durante la etapa de transición del nuevo sistema provenientes de ejes principales cuyo comportamiento fuese similar a los recorridos troncales definitivos. Se escogieron los ejes Alameda-Pajaritos, Américo Vespucio sur-oriente y Grecia-Irarrázaval.

Ciclo Transantiago Modelado 2 (CTSM-2)

En el caso de los buses rígidos de 12 metros, se definió considerar los recorridos tanto troncales como alimentadores, debido a que en etapa de régimen estos buses circularán en ambas modalidades. De esta manera se obtiene el ciclo que se muestra en la figura 2.6.

2.5.3. Análisis y conclusiones

En la tabla 2.5 muestra un resumen de las principales características de los ciclos propuestos para las pruebas de emisión en el laboratorio.

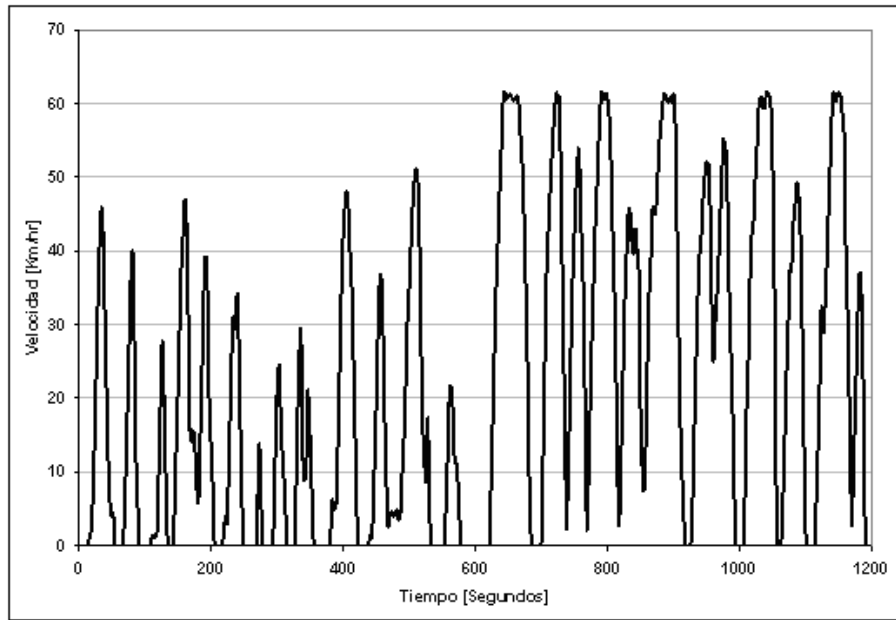


Figura 2.5: Ciclo Conducción CTSM-1

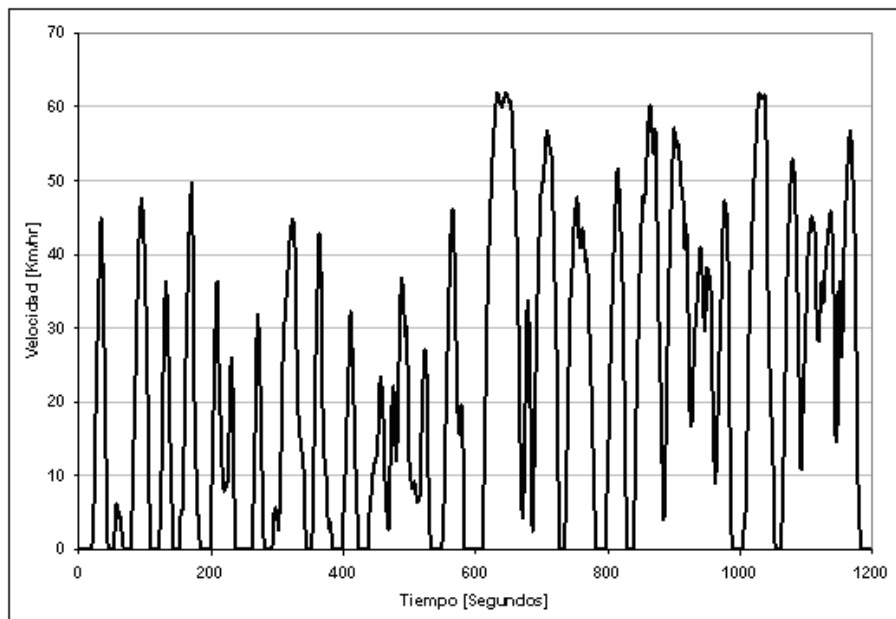


Figura 2.6: Ciclo Conducción CTSM-2

Tabla 2.5: Características Generales de los Ciclos de Conducción para Buses.

Características	ETC	CTSA	CTSM-1	CTSM-2
Nº puntos [seg]	1200	1200	1200	1200
Ralentí	6%	16%	24%	23%
Operación	94%	84%	76%	77%
Acelerando	63%	51%	43%	42%
Frenada	37%	33%	33%	35%
Vel. Prom. [Km/hr]	46,22	23,65	22,36	21,91
Acc. Prom. [m/s^2]	0,6	0,54	0,62	0,66
Fren Prom. [m/s^2]	-0,72	-0,78	-0,76	-0,77
Vel max. [Km/hr]	68,7	66	62	62

Los ciclos obtenidos presentan una marcada diferencia entre el ciclo antes de Transantiago (CTSA) y los ciclos con Transantiago (CTSM). Esta diferencia aparece en el porcentaje de tiempo detenido. En el primer caso este porcentaje es de un 16% mientras que en los ciclos Santiago alcanza un valor de 23%.

El resultado de los buses amarillos con menores tiempos de ralentí se explica por el sistema de detención accionado por la abertura de puertas. Este sistema incorporado a los buses de Transantiago provoca que la operación de subida y bajada de pasajeros sea más extensa en los buses nuevos que en los antiguos.

La otra diferencia que se aprecia al analizar los ciclos construidos es la aceleración, la cual es del orden de $0,1 m/s^2$ mayor en los buses Transantiago versus los buses amarillos. En efecto se observa que los buses Transantiago tienen una aceleración mayor a los buses amarillos pero una vez que alcanzan los $60 km/hr$ se mantienen a esa velocidad. Este comportamiento es más claro en el ciclo para buses articulados (CTSM-1) en la fase de mayor velocidad. En los rígidos este efecto no es tan claro debido a que se consideraron recorridos con carácter de alimentador y troncal mientras que en los articulados sólo se utilizaron recorridos con carácter troncal.

Capítulo 3

Metodología

El programa experimental consiste en el ensayo de distintas tecnologías de buses que se encuentran actualmente en circulación por las calles de Santiago en un dinamómetro de chasis.

3.1. Descripción del Laboratorio

El programa experimental y la toma de datos se realizaron en el Laboratorio de Vehículos Pesados perteneciente al Centro de Control y Certificación Vehicular (3CV). Posée un terreno de 13.000 m^2 de las cuales 1.600 m^2 se encuentran edificados y subdivididos en las siguientes secciones:

- Área de verificación de Normas Constructivas, en las cuales se encuentra ubicado el equipamiento capaz de realizar inspecciones de emisiones y aspectos de seguridad vehicular.
- Área de Homologación y Certificación, la cual se encuentra dividida en el Laboratorio de Emisiones, Laboratorio de Combustibles y el Laboratorio de Vehículos Pesados.
- Área Administrativa, en la cual se encuentran las oficinas que desarrollan el control y gestión del 3CV.

El laboratorio de vehículos pesados posee el siguiente equipamiento:

a) Dinamómetro de Chasis

Dinamómetro eléctrico marca AVL-Zöllner, ver figura 3.1, con rodillo simple de 48 pulgadas de diámetro. La capacidad de inercia máxima es de 30 [ton] y su potencia máxima de 300 [kW].



Figura 3.1: Dinamómetro de Chasis

Las ruedas traseras del bus descansan sobre el rodillo del dinamómetro el cual está conectado al generador, mientras que la fuerza de roce que produce el generador viene dada por los factores de inercia que se calculan mediante el ensayo de desaceleración libre o coast-down. El generador utilizado corresponde a un dinamómetro de rodillo simple de 48 pulgadas AVL ZÖLLNER. El dinamómetro puede realizar diversas operaciones entre las cuales se pueden aplicar curvas de velocidad, obtener y aplicar curvas de calibración, programar macros, paradas de emergencia, registro de diversos datos, etc.

b) Túnel de Dilución

Túnel de doble dilución marca AVL-Pierburg, ver figura 3.2, de acero inoxidable, con sistema de muestreo gravimétrico para material particulado. Esta configuración cumple con la Directiva Europea 1999/96 EC

c) CVS-CFV

Sistema de muestreo de volumen constante, ver figura 3.3, mediante control de flujo por venturis, con sistema de regulación de temperatura de los gases de escape diluidos mediante un intercambiador de calor. El equipo cuenta con dos pares de bolsas para la acumulación de muestras de gases de escape diluidos y de aire de dilución, separadamente en cada par.

Este sistema de medición está diseñado para medir la cantidad real de masa de las emisiones gaseosas provenientes del sistema de motores a gasolina o diesel. En el concepto CVS para medir la masa de las emisiones contaminantes, dos condiciones deben ser cumplidas:

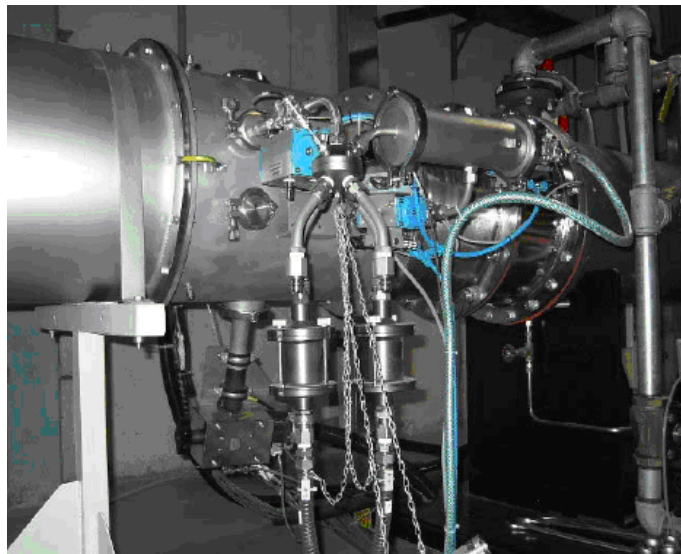


Figura 3.2: Túnel de Dilución

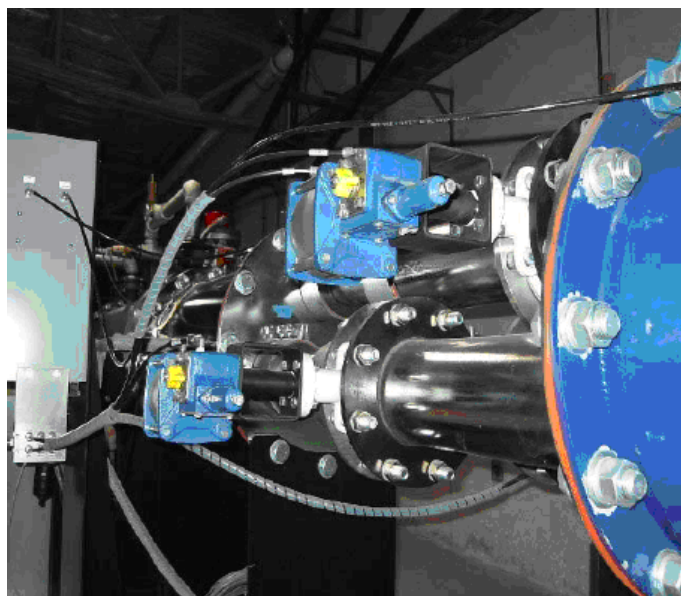


Figura 3.3: CVS-CFV



Figura 3.4: Analizadores AMA 4000

primero, el volumen total de la mezcla de escape y aire de dilución deben ser medidos, y segundo, continuamente debe tomarse una muestra proporcional del volumen de esa mezcla para su análisis. Así entonces la masa de los gases de escape se determinan a partir de la concentración de la muestra y del flujo total adquirido a lo largo de la prueba. Este sistema corresponde a un muestreo por venturi de flujo crítico y está basado en los principios de la dinámica de los flujos asociados al escurrimiento crítico. En este tipo de escurrimiento, el flujo total de la mezcla de gases se mantiene a velocidad sónica y es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de la temperatura absoluta del gas, medida continuamente. La alicuota de la muestra se logra a través de un venturi de flujo crítico pequeño instalado en el flujo de gases. Puesto que la presión y la temperatura son las mismas en la entrada de los venturi respectivos, el volumen de cada muestra es proporcional al volumen total de la muestra de gases.

d) Banco de analizadores AMA 4000

Este banco es un sistema analizador de gases AVL-Pierburg, figura 3.4, con método FID¹ para hidrocarburos totales (HCT) y metano (CH₄). Método NDIR² para monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), y método CLD³ para óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxidos de nitrógeno (NO₂).

¹Flame Ionization Detector

²Nondispersive Infrared Sensor

³ Detector luminiscencia química

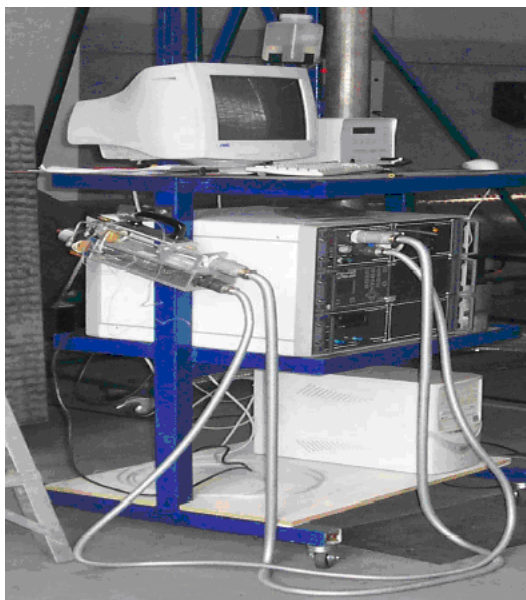


Figura 3.5: Termdilutor-CPC

e) Termdilutor-CPC

El sistema Termdilutor-CPC (Nanomet), ver figura 3.5 comprende los siguientes equipos:

- Dilutor, el cual comprende rangos de dilución entre 18 y 1800 veces.
- Acondicionador de muestra (termo-acondicionador), el cual comprende rangos de temperatura entre 0 y 400°C.
- Contador de partículas (CPC, Condensation Particle Counter), el cual permite medir partículas solidas comprendidas entre rangos de medición desde 10 nm.
- Software de control y registro.

La figura 3.6 corresponde a la integración de los equipos que forman el sistema Nanomet. El flujo diluido de los gases de escape con aire ambiente es nuevamente diluido en el Dilutor y acondicionado térmicamente mediante el Termdilutor, con lo cual mediante rayos ultravioleta, el equipo CPC cuenta las partículas sólidas.

f) Sistema Gravimétrico

La masa total de material particulado se determina a través del método gravimétrico. Para ello una muestra de los gases diluidos es conducida a través de filtros que acumulan

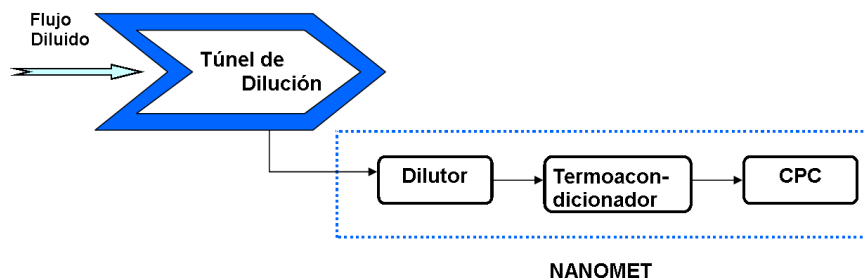


Figura 3.6: Integración Equipos Nanomet

el material particulado. Dichos filtros son medidos en una cámara de pesaje acondicionada, previa estabilización de 3 o más horas, en condiciones de humedad y temperatura controladas. La masa de material particulado se determina mediante la diferencia entre el peso del filtro con material particulado, y el peso del filtro medido antes del ensayo. Adicionalmente, otra muestra se conduce al equipo TEOM⁴, que calcula instantáneamente la concentración de material particulado, mediante un elemento oscilante, por variación de la frecuencia de oscilación, asociada a la variación de la masa en un filtro dispuesto en dicho elemento.

g) Integración de los equipos

Los equipos del laboratorio, a excepción del Termodilutor-CPC, están integrados (ver figura 3.7) a través de un Sistema de Automatización que controla y sincroniza la operación de los equipos, registra los valores medidos y calcula las emisiones de HC, NO_x, CO, CO₂ y Material Particulado durante la prueba, en gramos por kilómetro. La muestra de gases de escape es conducida al túnel de dilución en donde se diluye con aire ambiente el cual previamente es limpiado en un sistema de filtros. Esta mezcla se diluye aún más mientras avanza a través del túnel de dilución hasta la zona de muestreo. En esta zona del túnel se encuentran conectados los equipos encargados de realizar las mediciones contaminantes (Sistema gravimétrico, TEOM, Nanomet y Ama 4000). El resto de los gases es enviado a la atmósfera mediante un ventilador de tiro forzado conectado a la salida del túnel de dilución.

⁴Equipo marca Rupprecht & Patashnick Co. Inc, modelo Teom Serie 1105, para medir la concentración instantánea de la masa de partículas totales, en microgramos por metro cúbico.

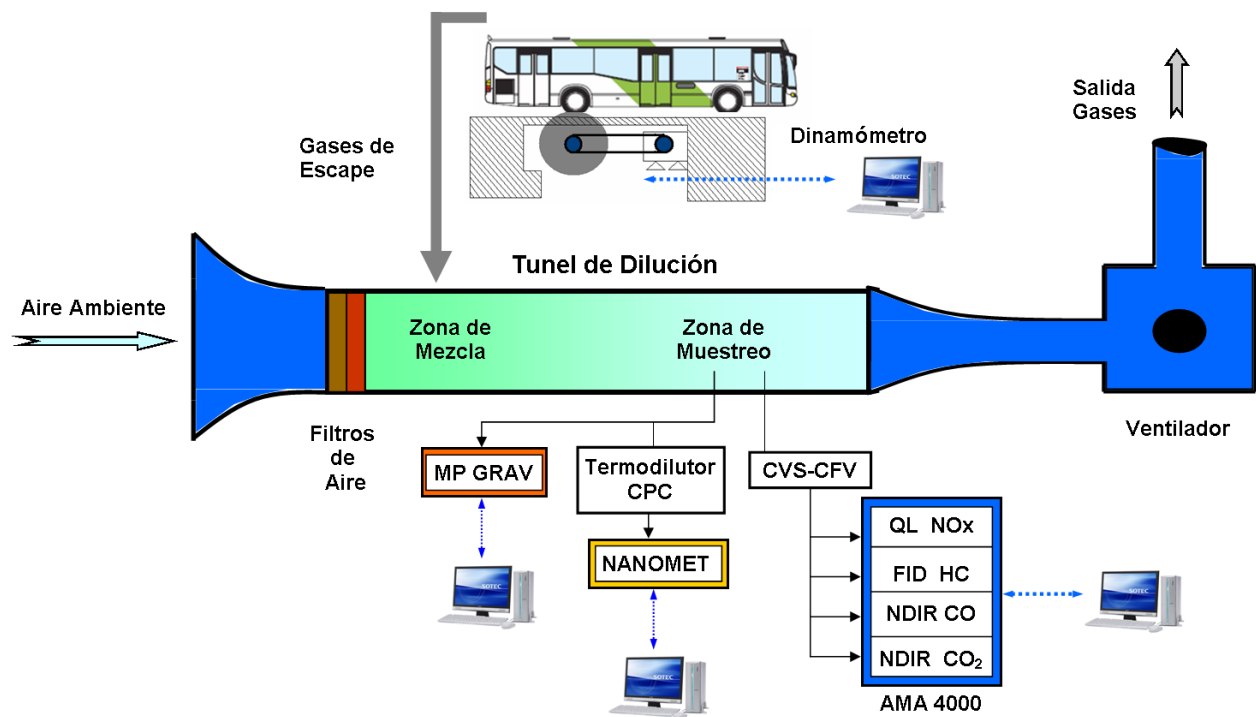


Figura 3.7: Integración de los Equipos en el Laboratorio de Vehículos Pesados

3.2. Metodología de Trabajo

Para realizar una medición representativa de las tecnologías presentes en la locomoción colectiva, se constituyó una flota con tecnologías Euro I, Euro II y Euro III (Anexo A) que cumplen las normas de emisión antes de la implementación del Transantiago. Además se incorporaron buses Euro III, que cumplen las normas estándar exigidas por el Transantiago y buses Euro III con sistemas de filtro de partículas los cuales permiten disminuir en una mayor medida las emisiones contaminantes.

Una vez designada la flota de buses a ensayar, se definieron los ciclos de conducción a utilizar. Para realizar una comparación de tecnologías con la llegada del nuevo sistema de transporte público, se utilizaron los ciclos locales o ciclos Santiago (CTSA, CTSM-1 o CTSM-2) todos con combustible comercial. Mientras que para realizar una comparación internacional, se utilizaron las fases 1 y 2 del ciclo ETC.

Se realizaron 3 campañas de trabajo o campañas de mediciones, de las cuales se utilizaron las campañas 2 y 3 para trabajar con los datos, debido a que la primera campaña (campaña 1)

correspondió a un acondicionamiento del dinamómetro y de las instalaciones del laboratorio.

3.2.1. Primera campaña de mediciones

En la primera campaña de mediciones se midieron 8 buses (ver tabla 3.1) bajo la primera fase del ciclo ETC; sin embargo estos datos no se utilizaron en la confección de esta memoria, debido a que el laboratorio no estaba en pleno funcionamiento.

3.2.2. Segunda campaña de mediciones

Para la segunda campaña de mediciones se midieron 11 buses (ver tabla 3.1) los cuales se ensayaron bajo 2 ciclos de conducción, un ciclo internacional (ETC) y un ciclo local o Santiago (CTSA, CTSM-1 o CTSM-2) dependiendo del tipo de bus que se tratara. En cuanto al ciclo internacional ETC, cada bus se midió 2 veces utilizando distinto combustible en cada situación. Se utilizó un combustible de referencia perteneciente al 3CV con un contenido de azufre menor a 3 ppm, y un combustible comercial utilizado en Santiago, con un contenido de azufre menor a 50 ppm.

Hay que mencionar que cada ensayo fue repetido al menos 3 veces (un test de calentamiento y dos ensayos con medición de emisiones).

3.2.3. Tercera campaña de mediciones

Para la tercera campaña de mediciones, se utilizaron 8 buses (ver tabla 3.1) los cuales al igual que en la campaña anterior se midieron bajo 2 ciclos de conducción pero solamente utilizando combustible diesel comercial. Al igual que en la segunda campaña cada ensayo fue repetido al menos 3 veces.

En la siguiente sección se detalla el procedimiento a seguir una vez recibido el bus en el laboratorio.

3.2.4. Procedimiento preparación y montaje del vehículo en el dinamómetro

Esta operación se realiza cada vez que se recibe y se monta algún vehículo sobre los rodillos del dinamómetro. El no realizarla puede dañar al vehículo, como también provocar algún accidente debido a que un vehículo puede salirse de los rodillos.

1. Cada vehículo se recibe alrededor de las 8:30 a 9:00 de la mañana, y se mantiene en el laboratorio entre 1 y 2 días.

2. Con el vehículo en el laboratorio se procede a tomar una muestra del combustible comercial utilizado por el bus, con el propósito de poder comparar sus componentes con un combustible estándar que posee el 3CV.
3. Luego de esto se procede a medir la opacidad (medir la absorción y dispersión de la luz por el flujo total de gases de escape mediante una fuente luminosa y un sensor fotoeléctrico) y luego el ruido que emite el bus. Esto es necesario para evitar la saturación de los equipos. Además si es necesario, se desconectan los fusibles limitadores de velocidad u otro dispositivo que afecte el regular funcionamiento de la prueba. Finalizado esto el bus está listo para poder ser montado en el dinamómetro.
4. Una vez que el dinamómetro se encuentra encendido y terminado su proceso de calentamiento ("Warm-Up") se puede proceder a ingresar el vehículo a la sala de medición y posicionarlo sobre los rodillos.
5. Previo al ingreso del vehículo se debe poner frenos a los rodillos, de forma tal que no se permita su giro. El vehículo debe ingresar lo más centrado posible a lo ancho de los rodillos del dinamómetro y se debe ubicar en la parte más alta de éstos. Luego de esto se le debe indicar al conductor que se detenga y que bloquee el vehículo por sus propios frenos, en especial el freno de mano.
6. Instalar las 4 torres de sujeción, 2 adelante y 2 atrás del vehículo. No se deben instalar las torres entre el inicio y el fin del vehículo. Se debe verificar que las torres estén apernadas (4 pernos) a las lozas de sujeción al suelo.
7. Se deben instalar las cuerdas de género al vehículo con el fin de sujetarlo ante cualquier imprevisto. Preferentemente estas cuerdas deben sujetarse al chasis del vehículo o en cualquier parte de la estructura, evitando dañar el vehículo.
8. A las torres se enganchan las cadenas, y a éstas se enganchan las cuerdas de género; la altura debe ser tal que se evite levantar el vehículo. En la parte posterior deberá ponerse especial cuidado en dejar las cadenas a 90 grados entre ellas (cruzadas). Se debe tensar las cadenas lo máximo posible.
9. Soltar los frenos del vehículo.

10. Comenzar a regular la posición del vehículo mediante el afloje o tensado de las cadenas primero desde la parte trasera y continuar con su parte delantera, con lo que se logra centrar al vehículo lo más posible sobre los rodillos.
11. Revisar la tensión de las cadenas y cerciorarse que la tensión este igual en todas ellas.
12. Revisar la existencia de piedras las cuales deben ser retiradas haciendo rodar el vehículo a una velocidad inferior a 2 km/hr.
13. Revisar la banda de rodadura de los neumáticos, así como si poseen defectos o un desgaste disparejo, ya que esto puede afectar la seguridad del dinamómetro.
14. Instalar y conectar una pantalla de computador al vehículo, por la cual se le indica al conductor el ciclo de conducción que debe realizar.
15. Terminado este proceso se toma el control del sistema desde el computador ubicado en sala de control.

3.3. Ciclos de Conducción Utilizados

Los ciclos de conducción utilizados corresponden a los nombrados en la sección 2.5 del presente informe. En resumen los ciclos utilizados fueron los siguientes:

- Ciclo ETC: Modelado para la certificación de motores pesados en Europa, utilizado para buses tipo M, B2 y C2
- Ciclo Transantiago Antes (CTSA): representa los hábitos de conducción anterior a la implementación del sistema de transporte público para buses tipo M con chasis rígido.
- Ciclo Transantiago Modelado 1 (CTSM-1): representa los hábitos de conducción después de la implementación del sistema de transporte público, para buses tipo C2 con chasis articulado de 18 metros.
- Ciclo Transantiago Modelado 2 (CTSM-2): representa los hábitos de conducción después de la implementación del sistema de transporte público, para buses tipo B2 con chasis rígido de 12 metros.

3.4. Flota Utilizada en el Estudio

La flota utilizada en el estudio corresponde a una pequeña muestra del espacio de buses de transporte público que existe en la capital. Se tomaron como espacio muestral distintas tecnologías representativas del transporte público antes y después del nuevo sistema de transporte en Santiago. Estas categorías se dividen en 3; buses que cumplen las exigencias antes del Transantiago, buses que cumplen las exigencias estándar del Transantiago y buses que permiten superar la exigencia estándar del Transantiago o Euro III, mediante el uso de filtros de partículas y catalizadores de oxidación.

Se utilizó un código X.Y.Z para designar cada bus. La simbología es la siguiente:

$$\begin{array}{l}
 \mathbf{X} = \left\{ \begin{array}{l} \text{M} = \text{Chasis rígido} \\ \text{B2} = \text{Chasis rígido} \\ \text{C2} = \text{Chasis articulado} \end{array} \right. \\
 \\
 \mathbf{Y} = \left\{ \begin{array}{l} 1 = \text{Norma Euro I} \\ 2 = \text{Norma Euro II} \\ 3 = \text{Norma Euro III} \end{array} \right. \\
 \\
 \mathbf{Z} = \left\{ \begin{array}{l} 1 = \text{Sin filtro} \\ 2 = \text{Con filtro} \end{array} \right.
 \end{array}$$

Figura 3.8: Código Utilizado

En Anexos B se detalla la flota de buses utilizados en las campañas de medición. Se muestran detalles propios de cada bus, como son la potencia y capacidad de pasajeros. A su vez se detallan las campañas de medición y los ciclos de conducción utilizados en cada campaña además del tipo de combustible y su nivel de azufre.

Tabla 3.1: Flota de buses, tecnologías y ciclos empleados en el estudio

Categoría	Marca-Modelo Chasis	Patente	Código	Capacidad [pax]	Norma emisión	Ciclos utilizados	Campaña
Anterior nuevo sistema	MB OF 1318 S/F	LY 1419	M.1.1	75	EURO1	ETC, CTSA	1,2,3
	MB OH 1420 S/F	VK 6359	M.2.1	81	EURO2	ETC, CTSA	1,2,3
	MB OH 1420 S/F	VG 8587	M.2.1	81	EURO2	ETC, CTSA	2
	MB OH 1115 S/F	YE 9703	M.3.1	60	EURO3	ETC, CTSA	1,2,3
Nuevo sistema estandar	VOLVO B7 S/F	ZN 3238	B2.3.1	92	EURO3	ETC, CTSM-2	1,2,3
	VOLVO B7 S/F	ZN 3248	B2.3.1	92	EURO3	ETC, CTSM-2	2
	VOLVO B9 S/F	ZN 5800	C2.3.1	161	EURO3	ETC, CTSM-1	1,2,3
	VOLVO B9 S/F	ZN 5590	C2.3.1	161	EURO3	ETC, CTSM-1	2
Superior nuevo sistema	MB OH 1420 C/F	TE 3776	M.2.2	81	EURO2	ETC, CTSA	1,2,3
	VOLVO B7 C/F	ZN 6267	B2.3.2	92	EURO3	ETC, CTSM-2	1,2,3
	VOLVO B9 C/F	ZN 6340	C2.3.2	161	EURO3	ETC, CTSM-1	1,2,3

Cada bus indicado anteriormente fue sometido a 3 campañas de medición, de las cuales se utilizaron las últimas dos campañas para trabajar en esta memoria. En la campaña 2 se utilizaron 2 tipos de combustibles para ver la influencia del nivel de azufre del combustible sobre las emisiones, en tanto que se utilizaron las campañas 2 y 3 para realizar promedios comparativos, los cuales se señalan con mayor detalle en los capítulos siguientes. La tabla 3.1 corresponde a un resumen de los buses estudiados, sus respectivas tecnologías y los ciclos de conducción utilizados.

Capítulo 4

Resultados

4.1. Resultados Coast-Down

Antes de comenzar la medición de datos, es importante determinar los coeficientes de resistencia del dinamómetro. Si bien el dinamómetro permite simular las condiciones de conducción que uno desee, es necesario entregarle valores que simulen las pérdidas de energía a las cuales está sometido un vehículo cuando éste se encuentra circulando en la ciudad.

Como ya se mencionó en el capítulo 2, sección 2.2, las resistencias que posee un vehículo en movimiento corresponden a la resistencia al roce del aire con el chasis y a la resistencia de los neumáticos con el pavimento.

Retomando las ecuaciones (2.3) y (2.4) se tiene que las resistencias al roce del aire o aerodinámica, y la resistencia al roce con el pavimento, o resistencia a la rodadura, se determinan mediante:

$$P_{resistiva\ aerodinamica} = C_d \cdot A_{frontal} \cdot \frac{\rho}{2} \cdot v^3$$

$$P_{resistiva\ rodadura} = m \cdot g \cdot \mu \cdot v$$

En las relaciones anteriores los únicos valores no conocidos son las constantes C_d y μ , las cuales son necesarias para calcular las resistencias requeridas. Estos factores pueden ser encontrados a partir de valores que se encuentran tabulados[2], o también pueden ser calculados experimentalmente. En el presente capítulo se detallan de ambas maneras la metodología para encontrar estos valores.

Las tecnologías de buses estudiadas en el procedimiento de coast-down deben ser representativas de la flota analizada. Para tal caso se utilizaron 5 tipos de buses representativos de la flota en estudio a los cuales se les debió realizar la prueba de coast-down. Estos buses

Tabla 4.1: Buses utilizados en la prueba de coast-down

Chasis	Patente	Tecnología
MB OF1318	LY 1419	EURO I
MB OH1420	TE3776	EURO II
MB OH1115	YE 9703	EURO III
VOLVO V7	ZN 6612	EURO III
VOLVO V9	ZN 5590	EURO III

Tabla 4.2: C_d y μ para los buses en estudio

Chasis	Masa [kg]	C_d	μ
MB OF1318	11930	0,55	0,00713
MB OH1420	12350	0,55	0,00713
MB OH1115	10300	0,55	0,00713
VOLVO V7	14410	0,55	0,00713
VOLVO V9	22686	0,62	0,0067

se diferencian entre sí principalmente por el tipo de chasis y su peso (propio de la máquina y de la cantidad de pasajeros que puede transportar).

La flota de buses estudiados en el coast-down se presenta en la tabla 4.1.

Las metodologías de cálculo fueron las siguientes:

4.1.1. Cálculo Teórico

Retomando lo expuesto en la sección 2.2.1, se agrupan los distintos vehículos según su peso y luego de esto, utilizando las tablas 2.2 y 2.3, se obtiene el valor correspondiente a las constantes μ y C_d . Lo anterior se muestra en la tabla 4.2.

Con los valores de las constantes μ y C_d , sólo es necesario obtener el área A de cada bus, la densidad del aire ρ y la aceleración de gravedad g . Estos datos se detallan en la tabla 4.3, junto con el resultado de los factores de carga.

Tabla 4.3: Datos y resultados teóricos para los buses en estudio

Chasis	Masa [kg]	Área [m ²]	g [m/s ²]	Densidad [kg/m ³]	F_0 [N]	F_2 [N]/[km/h] ²
MB OF1318	11930	7,0958	9,8	1200	834	0,18
MB OH1420	12350	7,0800	9,8	1200	848	0,18
MB OH1115	10300	6,1793	9,8	1200	723	0,17
VOLVO V7	14410	7,4596	9,8	1200	916	0,19
VOLVO V9	22686	8,1653	9,8	1200	1490	0,23

El factor de carga F_1 es nulo o cero, ya que no se consideraron pérdidas energéticas debido a la existencia de pendientes.

Finalmente con los factores de carga calculados, se ingresan al dinamómetro para la simulación de inercia de cada bus.

4.1.2. Cálculo Experimental

A continuación se detalla el procedimiento de coast-down para el bus VOLVO V7 patente ZN 6612. Cabe mencionar que el procedimiento y el trabajo con los datos es idéntico para el resto de los buses, por lo que se omitirá su desarrollo.

Procedimiento toma de datos [9]

En las pruebas de coast-down, para cada bus se siguió un protocolo estándar¹ de manera de normalizar las condiciones de la prueba. El protocolo de pruebas se presenta a continuación:

1. Revisión general del vehículo
2. Revisión de la pista de pruebas
3. Carga del vehículo con sacos de arena equivalentes al 50 % de la capacidad de pasajeros máxima.
4. Equipamiento del bus con dispositivo GPS.
5. Se sitúa el vehículo en un camino nivelado con una longitud mínima de 2 km sin intersecciones ni semáforos.
6. El vehículo se acelera libremente hasta alcanzar la velocidad de 65 km/h y se mantiene a esa velocidad durante 10 seg.
7. Al final de los 10 segundos, el operario debe dejar el vehículo en neutro y dejar que el bus se detenga por efecto de la resistencia aerodinámica y la resistencia a la rodadura.
8. Los puntos 6 y 7 deben repetirse 10 veces en el siguiente orden: Norte-Sur y Sur-Norte, sucesivamente.
9. Desmontaje de GPS y carga ficticia.

¹Norma SAE J1263

El lugar de realización de las pruebas de Coastdown fue la pista principal del ex aeropuerto Los Cerrillos (2350 metros pavimentados). Debido a las características de pista de aterrizaje de aviones, el lugar presenta desniveles mínimos entre los extremos de la pista inferior a 15 metros, medidos con GPS manual.

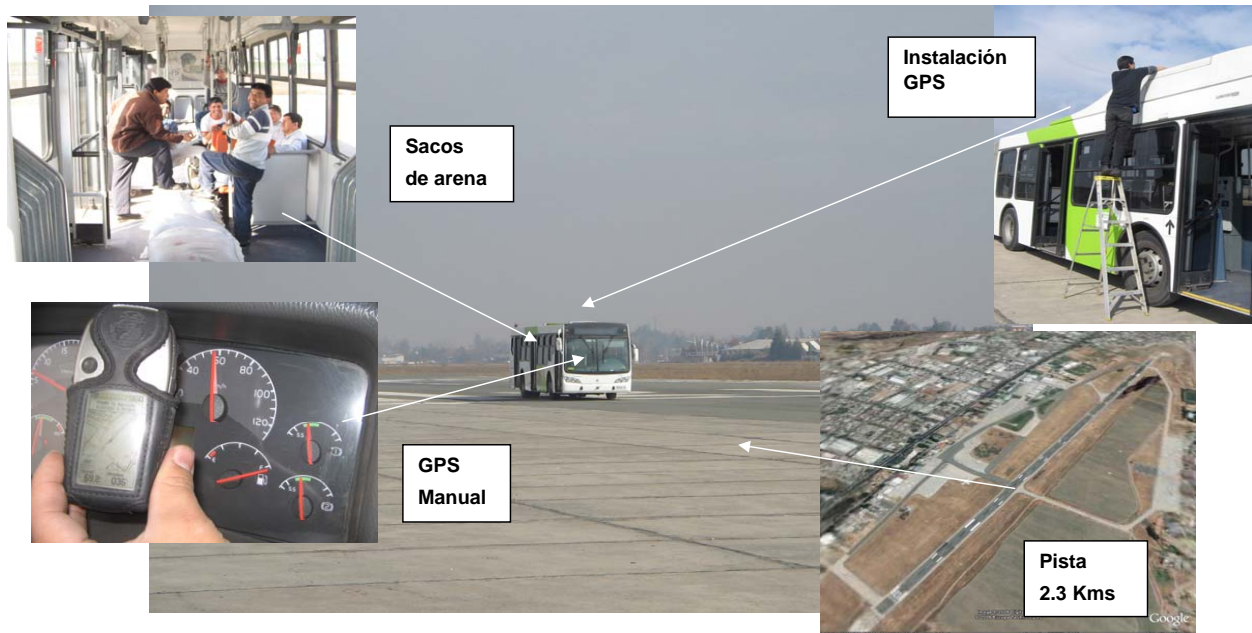


Figura 4.1: Ex aeropuerto Los Cerrillos y montaje de equipos

Procedimiento trabajo de datos

Para realizar el trabajo de adquisición de datos y posterior análisis se prosiguió de la siguiente manera:

1. Durante el tiempo en el cual el bus permanece desacelerando hasta su posterior detención, se registra la velocidad del bus segundo a segundo mediante un sistema de posicionamiento global (GPS).
2. Para evitar posibles errores, debido a la pendiente del camino, se registran datos en ambos sentidos de movimiento. En total se midieron 5 pasadas para cada lado, dando un total de 10 pasadas.
3. Como se mide segundo a segundo, se calcula la diferencia de velocidad en ese pequeño intervalo de tiempo, correspondiendo esto a dv/dt .

4. Al mismo tiempo se calcula v^2 .
5. Al graficar ambos valores se obtienen los datos mostrados en la figura 4.2.

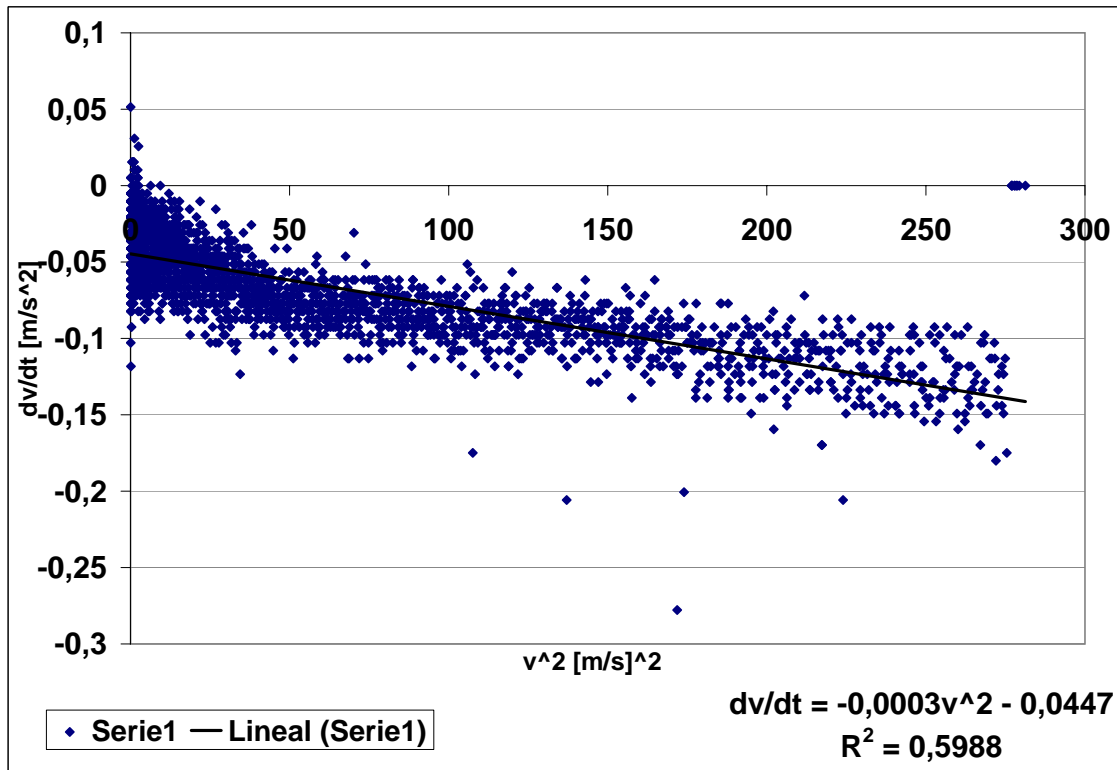


Figura 4.2: Gráfico dv/dt v/s v^2 para el bus VOLVO V7 ZN6612

6. Al realizar una regresión lineal de los datos, se obtiene la curva característica del movimiento del bus. Para el caso en exposición, ésta corresponde a:

$$\frac{dv}{dt} = -0,0003 \cdot v^2 - 0,0447 \quad (4.1)$$

Al comparar con la ecuación 2.5 la cual es:

$$\frac{dv}{dt} = \frac{\rho \cdot A \cdot C_d \cdot v^2}{2 \cdot m} + \mu \cdot g$$

Al reconocer términos se obtienen las siguientes ecuaciones:

$$\frac{\rho \cdot A \cdot C_d}{2 \cdot m} = -0,0003 \quad (4.2)$$

$$\mu \cdot g = -0,0447 \quad (4.3)$$

Los datos que faltan son los siguientes:

m: masa vehicular= 14410 [kg].

A: Área frontal= 7,4596 m².

ρ : Densidad del aire = 1200 kg/m³.

g: Aceleración gravitacional= 9,8 m/s.

Luego de reemplazar estos valores en la ecuaciones (4.2) y (4.3) y despejando se obtiene:

C_d : Coeficiente de pérdida Aerodinámica= 0,9658.

μ : Coeficiente de roce de los neumáticos con el pavimento=0,0456.

Con estos valores se obtiene F_0 y F_2 , los cuales corresponden a:

$$F_0 = \mu \cdot m \cdot g = 644[N]$$

$$F_2 = \frac{\rho A C_d v^2}{2 \cdot m} = 0,33[N]/[km/h]^2$$

Al igual que en el caso anterior, el valor de F_1 es cero debido a que no se consideraron pendientes en la simulación.

4.1.3. Discusión y conclusiones

En Anexos C se presentan las curvas de Coast-down (procedimiento experimental) y los resultados para cada bus, así como los datos utilizados. Se resaltan los valores F_0 F_1 y F_2 los cuales corresponden a los factores de carga para cada tipo de bus.

A continuación se presentan los gráficos para los distintos factores de carga (Teórico y Experimental) o pérdidas energéticas versus la velocidad del vehículo (figuras 4.3 a 4.7).

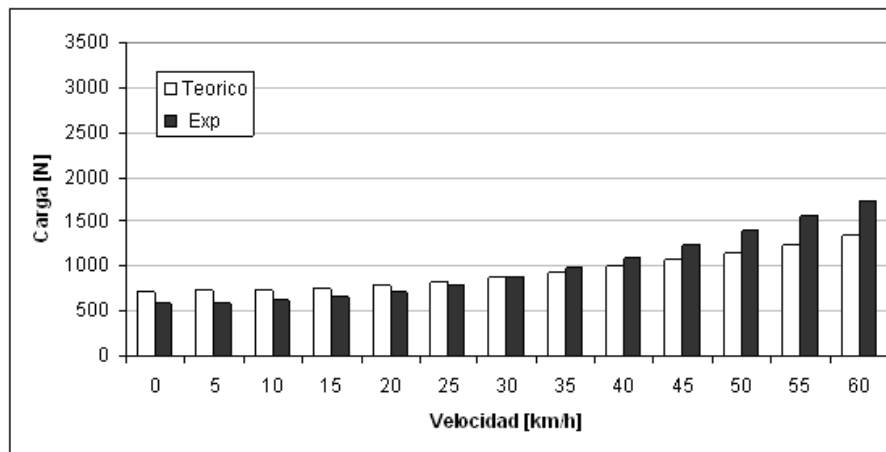


Figura 4.3: Factor de carga versus velocidad para el bus M.3.1

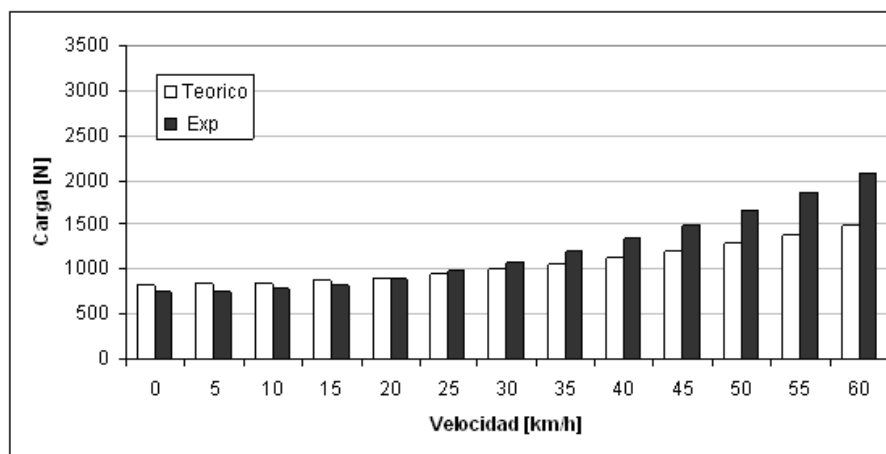


Figura 4.4: Factor de carga versus velocidad para el bus M.1.1

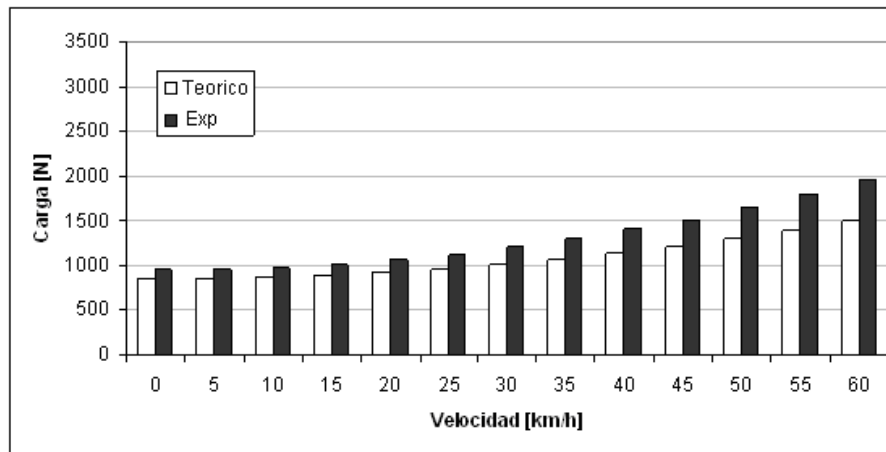


Figura 4.5: Factor de carga versus velocidad para el bus M.2.1

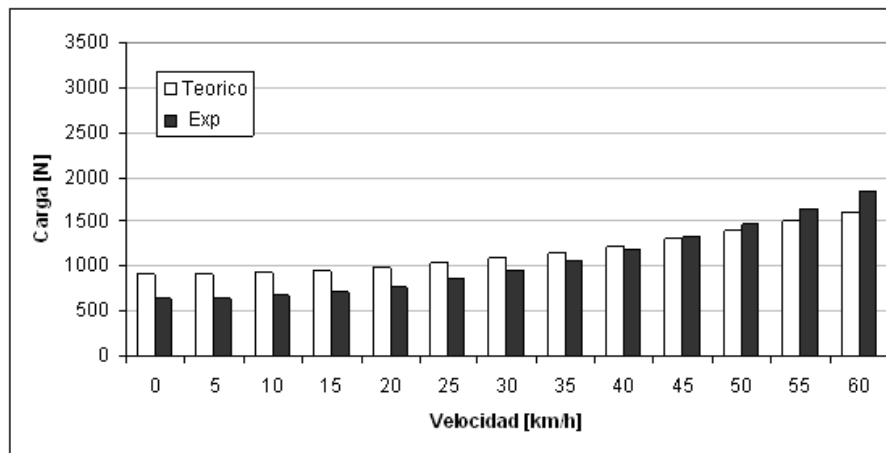


Figura 4.6: Factor de carga versus velocidad para el bus B2.3.1

Tabla 4.4: Resumen de resultados de factores teórico y experimental para los distintos buses en estudio

Chasis	F_0 [N]		F_2 [N]/[km/h]^2	
	Teórico	Experimental	Teórico	Experimental
MB OF1318	834	750	0,18	0,37
MB OH1420	848	949	0,18	0,28
MB OH1115	723	593	0,17	0,32
VOLVO V7	916	644	0,19	0,33
VOLVO V9	1490	1434	0,23	0,53

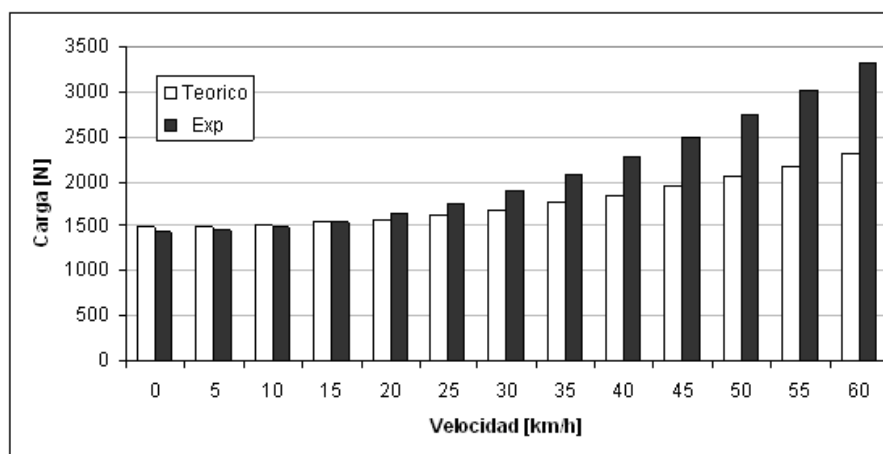


Figura 4.7: Factor de carga versus velocidad para el bus B2.3.2

Realizando un análisis de los gráficos de factores de carga versus velocidad, se puede apreciar que las pérdidas energéticas globales, al utilizar los factores de carga teóricos y experimentales, son menores al 20% por lo que no existe una gran diferencia entre ambos valores.

En la tabla 4.4 se presenta un resumen de los datos obtenidos:

La diferencia entre los valores experimentales y teóricos presentados en la tabla 4.4, podría influir directamente en las emisiones contaminantes, debido principalmente a que al utilizar factores de carga menores a los reales, el vehículo se somete a menores fuerzas en el dinamómetro. Esto influye directamente en una subestimación de las emisiones contaminantes, ocurriendo lo contrario en el caso de someterlo a cargas mayores. Este mismo efecto

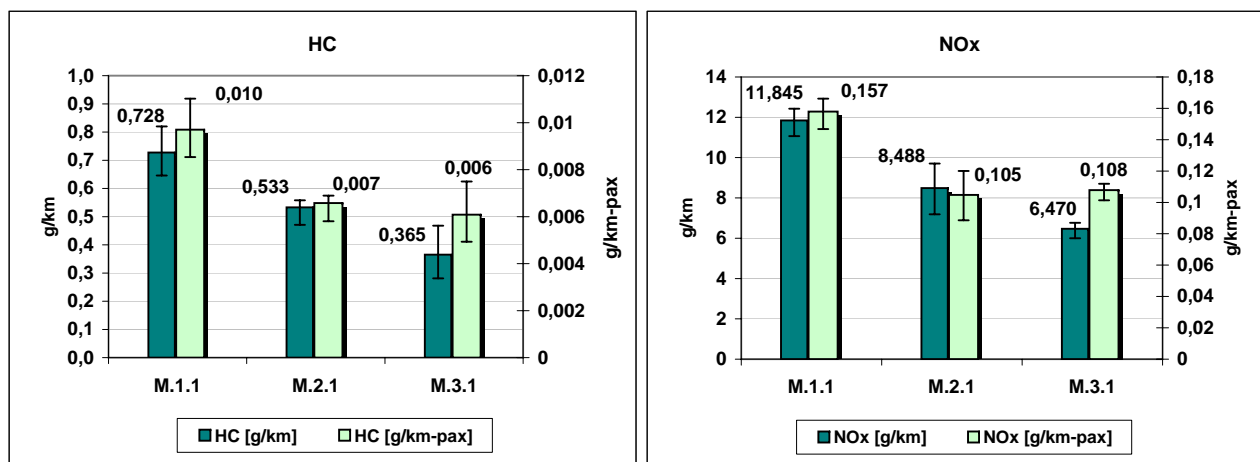


Figura 4.8: Emisiones hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx), ciclo CTSA

ocurre con el consumo de combustible. Sin embargo, debido a que las diferencias en términos de pérdidas energéticas no eran muy importantes, además de la facilidad en su obtención, se utilizaron los valores teóricos de los factores de carga F_0 , F_1 y F_2 para realizar las experiencias en el laboratorio.

En la sección 4.7 del presente informe, se analiza el efecto real de utilizar diferentes valores de carga (Teórico y Experimental).

4.2. Factores de Emisión

Los factores de emisión fueron calculados utilizando los ciclo Santiago. A cada gráfico obtenido se le asoció su nivel de error, además de las emisiones contaminantes normalizadas por la capacidad de pasajeros que posee cada bus.

4.2.1. Buses que cumplen las exigencias antes del Transantiago

Los buses con esta clase de tecnología corresponden a vehículos que no cumplen las exigencias del nuevo sistema de transporte público. Para los tres buses estudiados se utilizó el ciclo CTSA.

Los tres buses analizados corresponden a tres normas de emisión distintas, Euro I, Euro II y Euro III, por lo que se presentan buses menos contaminantes de acuerdo a la norma que poseen. Para el caso de los hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (ver figura 4.8) esta disminu-

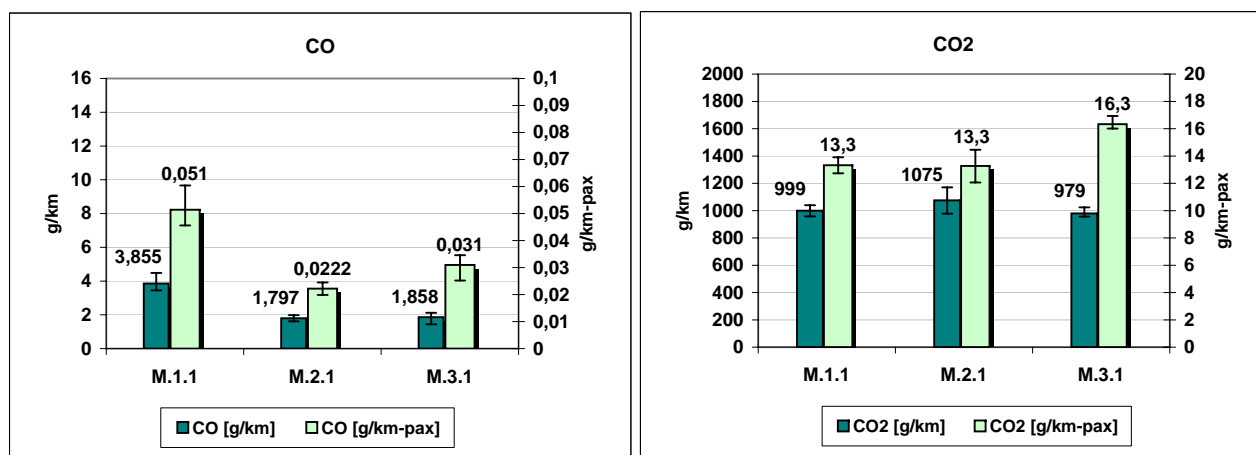


Figura 4.9: Emisiones monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂), ciclo CTSA

ucción en las emisiones corresponde a pasar de 0,73 g/km a 0,37 g/km para los hidrocarburos y de 11,8 g/km a 6,5 g/km para los óxidos de nitrógeno, a medida que las normas de emisión aumentan su nivel de exigencia.

Al normalizar los resultados utilizando la capacidad de pasajeros que posee cada bus, las emisiones tienden a equipararse para los buses M.2.1 y M.3.1, debido a que el bus M.3.1 tiene un menor índice de pasajeros transportados, 60 pasajeros, con respecto al bus M.2.1 que puede transportar 81 pasajeros.

Para el caso del monóxido de carbono (figura 4.9), la tendencia decreciente en las emisiones que ocurre con los contaminantes HC y NO_x no es tan clara, que se aprecia una mayor equidad entre las emisiones de cada bus, variando estas últimas entre 3,9 g/km y 1,8 g/km, correspondiendo el menor valor para el bus M.2.1. Para el caso del dióxido de carbono, las emisiones de los tres buses son similares variando entre 1075 g/km y 979 g/km. Sin embargo al normalizar los valores, el bus M.3.1 aumenta las emisiones, superando al resto debido a la menor capacidad de pasajeros transportados por este bus.

Las emisiones de CO₂ (figura 4.9) están directamente relacionadas con el consumo de combustible, lo que indica que el bus M.3.1 está consumiendo más diesel que lo normal.

Para el caso del material particulado respirable (figura 4.10), el mayor valor fue para el bus M.3.1 y correspondió a 0,94 g/km, mientras que el menor fue para el bus M.2.1 y correspondió a 0,184. Esta diferencia se puede explicar por el buen estado de mantención que presentó el bus M.2.1 durante las experiencias. Al incorporar la capacidad de pasajeros en el

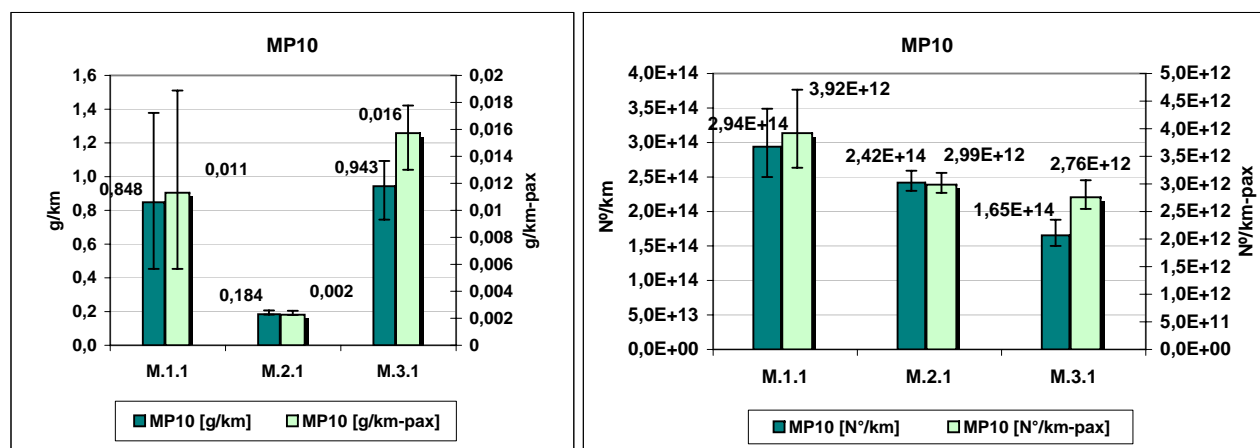


Figura 4.10: Emisiones material particulado respirable (MP10) y número de partículas, ciclo CTSA

índice de emisión de material particulado ($\text{gr}/\text{km-pax}$) se repite la misma tendencia anterior. Sin embargo, para el número de partículas (ver figura 4.10) se observa una disminución gradual de las emisiones a medida que se pasa de Euro I a Euro III.

4.2.2. Buses que cumplen las exigencias estándar del Transantiago o Euro III

Las emisiones de hidrocarburos (ver figura 4.11) son de $0,07 \text{ gr}/\text{km}$ para el bus rígido B2.3.1 y $0,24 \text{ g}/\text{km}$ para el bus articulado C2.3.1. Sin embargo, la diferencia se estrecha al incluir el número de pasajeros debido a la mayor capacidad del bus articulado.

En cuanto a los óxidos de nitrógeno (ver figura 4.11), las emisiones son casi similares, siendo de $11,8 \text{ g}/\text{km}$ para el bus B2.3.1 y de $12,1 \text{ g}/\text{km}$ para el bus C2.3.1. Al incluir el número de pasajeros el bus articulado disminuye su índice debido a su mayor capacidad.

Para el caso de monóxido de carbono (ver figura 4.12) el mayor valor lo presenta el bus C2.3.1 correspondiendo a $14,9 \text{ g}/\text{km}$, mientras que el bus B2.3.1 presenta índices de $4,7 \text{ g}/\text{km}$. Esta diferencia se estrecha al considerar los pasajeros transportados.

En cuanto al dióxido de carbono se produce una leve diferencia entre ambos buses, siendo mayores las emisiones para el bus C2.3.1 con respecto al bus B2.3.1 correspondiendo a $1759 \text{ g}/\text{km}$ y $1664 \text{ g}/\text{km}$ respectivamente. Sin embargo al considerar el número de pasajeros transportados esta tendencia se invierte, como se advierte en a figura 4.12.

Las emisiones de material particulado respirable (ver figura 4.13) son mayores para el bus B2.3.1 ($0,82 \text{ [g}/\text{km}]$) que para el bus C2.3.1 ($0,52 \text{ [g}/\text{km}]$). Esta diferencia refleja el mayor tamaño del motor del bus articulado, ya que ambos vehículos muestran casi el mismo índice

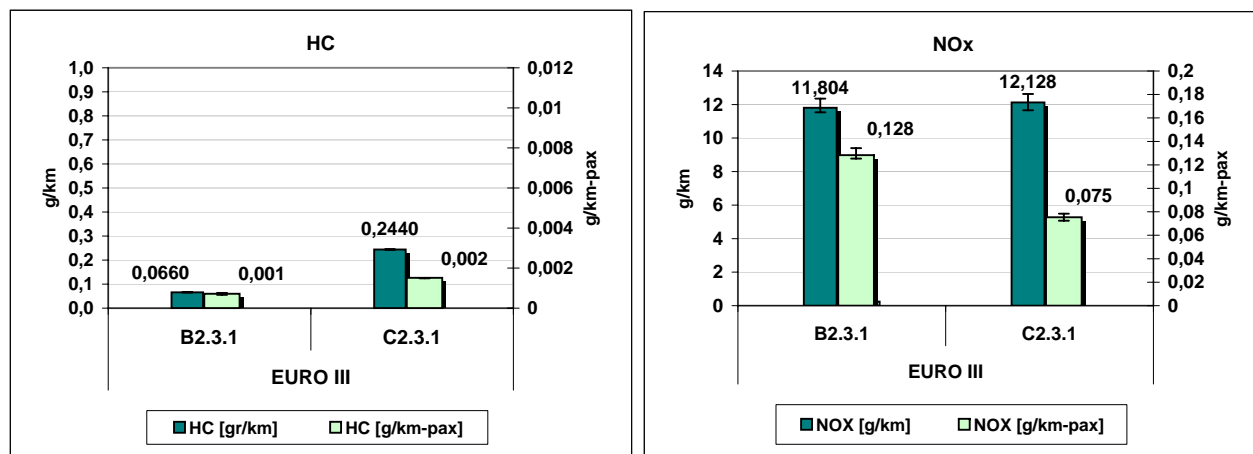


Figura 4.11: Emisiones hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx), ciclos CTSM-2, CTSM-1

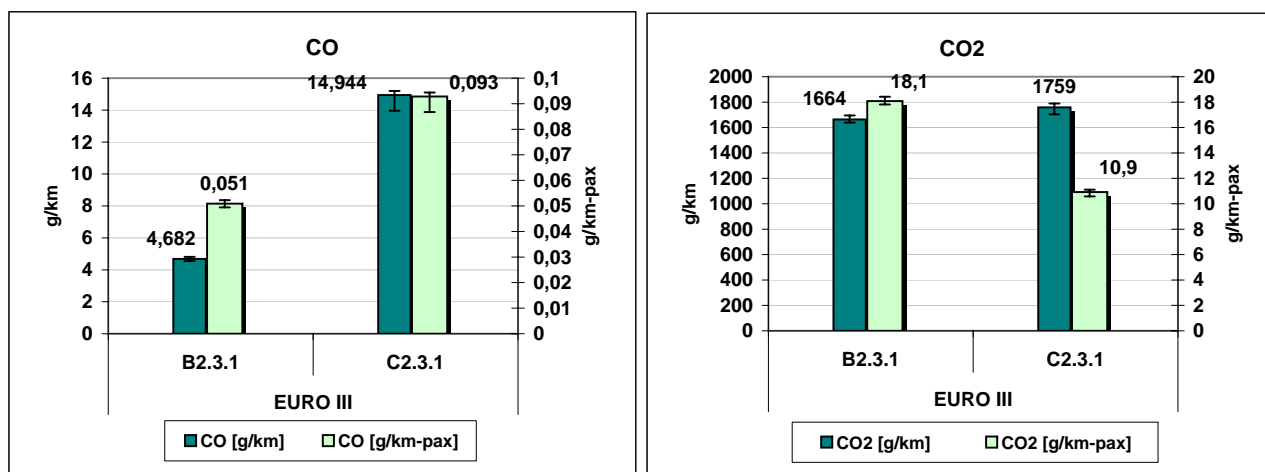


Figura 4.12: Emisiones monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO2), ciclos CTSM-2, CTSM-1

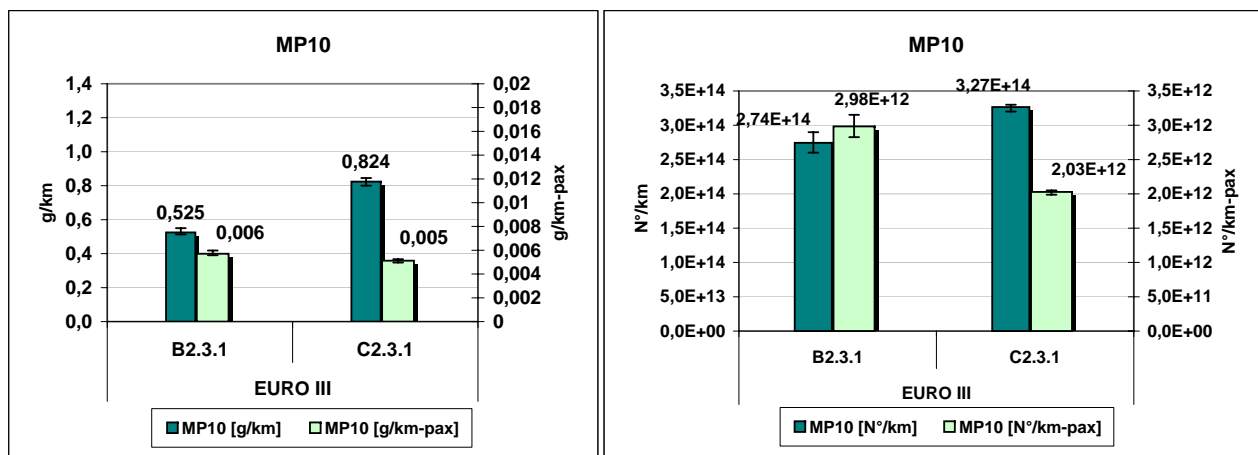


Figura 4.13: Emisiones material particulado respirable (MP10) y número de partículas, ciclos CTSM-2,CTSM-1

al dividir por la capacidad de pasajeros respectiva.

En cuanto al número de partículas (ver figura 4.13), se observa la misma tendencia anterior, con valores de $2,74E+14$ [N°/km] para el bus B2.3.1 y $3,27E+14$ [N°/km] para el bus C2.3.1.

4.2.3. Buses que permiten superar la exigencia estándar del Transantiago

Las emisiones de hidrocarburos (ver figura 4.14) en algunos casos son tan bajas que quedan incluso por debajo del nivel de detección de los analizadores. El valor más alto se obtuvo para el bus M.2.2 correspondiendo a $0,04$ g/km, donde la oxidación catalítica del sistema de filtros explica estos valores de emisión tan bajos, en comparación a los mismos buses sin sistema de control de emisiones.

Las emisiones de NOx (ver figura 4.14) no cambian mayormente al comparar los buses con y sin sistema de filtros o CRT. Estos dispositivos no producen reducción catalítica de óxidos de nitrógeno, por lo que no se espera una reducción de estos compuestos, pero podría producirse un cambio en la relación entre NO y NO₂ debido al proceso de regeneración.

Para el monóxido de carbono (ver figura 4.15), todos los buses equipados con sistema de filtros mostraron niveles muy bajos de emisión, fluctuando entre $0,32$ g/km y $0,60$ g/km. Esto indica que el sistema de oxidación catalítica estuvo operando adecuadamente en ambas campañas de medición.

Las emisiones de dióxido de carbono (ver figura 4.15) muestran una tendencia creciente

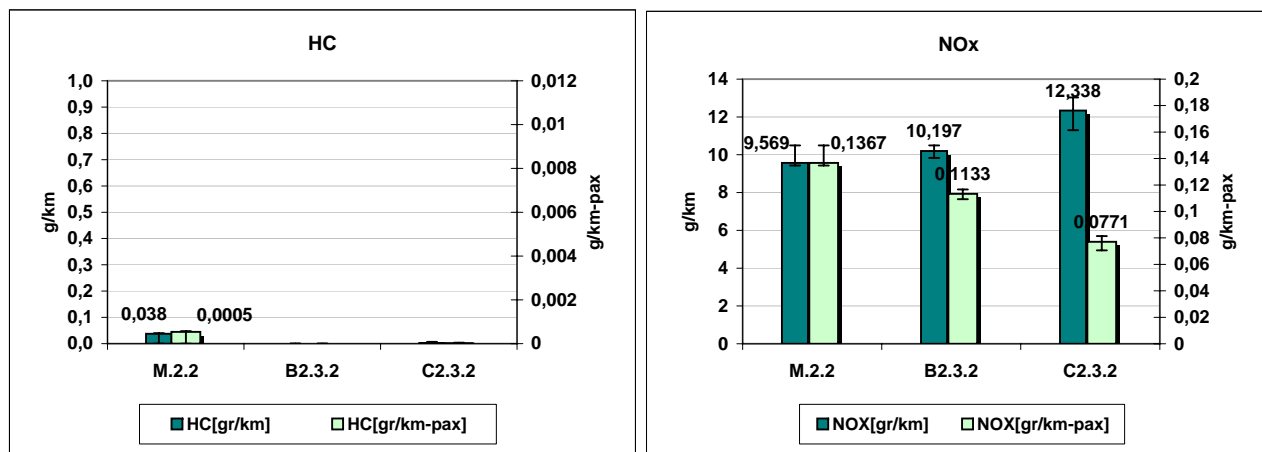


Figura 4.14: Emisiones hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx), ciclo Santiago

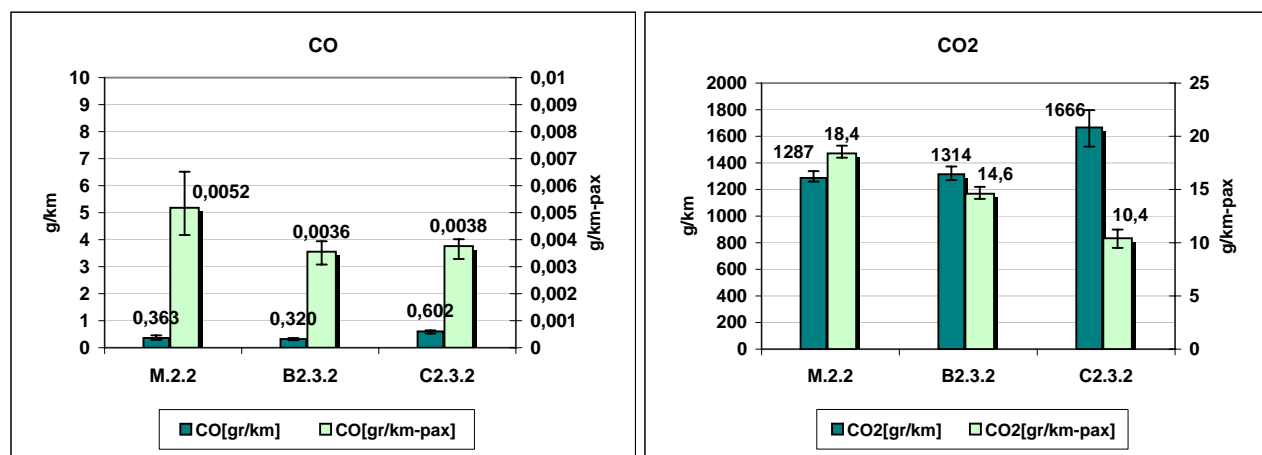


Figura 4.15: Emisiones monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO2), ciclo Santiago

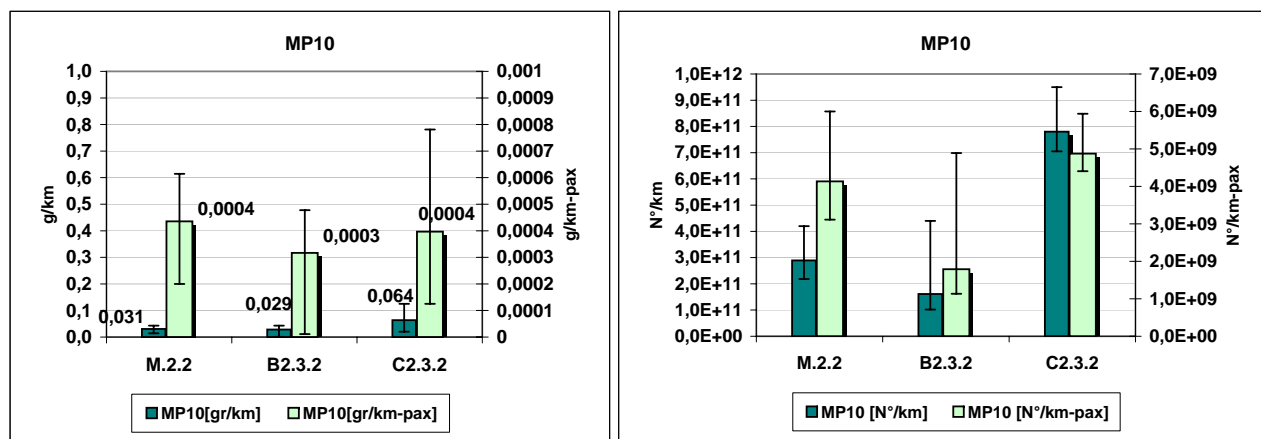


Figura 4.16: Emisiones material particulado respirable (MP10) y número de partículas, ciclo Santiago

Tabla 4.5: Resumen de emisiones para los buses en estudio

Contaminante		M.1.1	M.2.1	M.3.1	B2.3.1	C2.3.1	M.2.2	B2.3.2	C2.3.2
CO2	g/km	1000	1075	980	1664	1759	1287	1314	1666
CO	g/km	3,855	1,797	1,859	4,682	14,944	0,363	0,320	0,602
NOX	g/km	11,845	8,488	6,470	11,804	12,128	9,569	10,197	12,338
HC	g/km	0,728	0,533	0,365	0,066	0,244	0,038	0,000	0,002
MP10	g/km	0,848	0,184	0,944	0,525	0,824	0,031	0,029	0,064
Nº Partículas	Nº/km	2,9E+14	2,4E+14	1,7E+14	2,7E+14	3,3E+14	3,0E+11	1,6E+11	7,8E+11

según el tamaño del motor, pasando de 1287 g/km para el bus M.2.2 a 1666 g/km para el bus C2.3.1. Esta tendencia se invierte al incorporar el número de pasajeros transportados.

Los valores de las emisiones de material particulado respirable (ver figura 4.16) son notoriamente menores a las observadas en los otros grupos tecnológicos debido a la acción del filtro de partículas, siendo mayor para el bus articulado con 0,064 g/km. Al normalizar por el número de pasajeros transportados, las tres tecnologías muestran prácticamente el mismo valor.

En cuanto al número de partículas (ver figura 4.16) se presenta a misma tendencia anterior, obteniéndose un mayor valor para el bus articulado.

En las figuras 4.17 a 4.19 y en la tabla 4.5 se presenta un resumen de las emisiones asociadas a las tres tecnologías de buses estudiadas, para cada contaminante.

Realizando una comparación de factores de emisión para buses que cumplen las normas

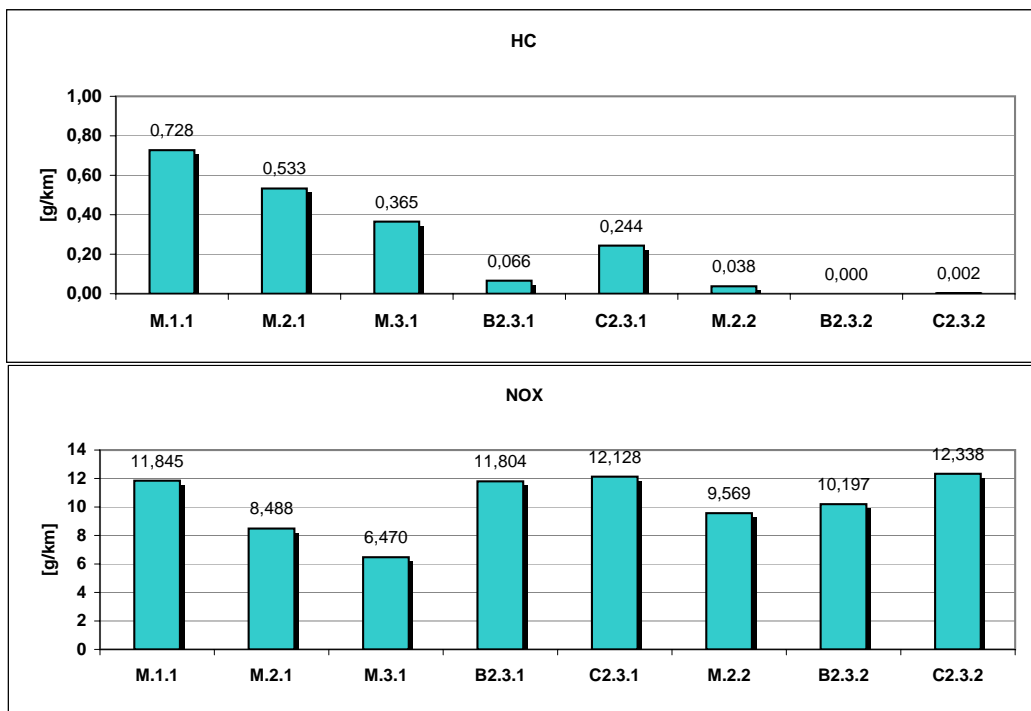


Figura 4.17: Resumen emisiones monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO₂)

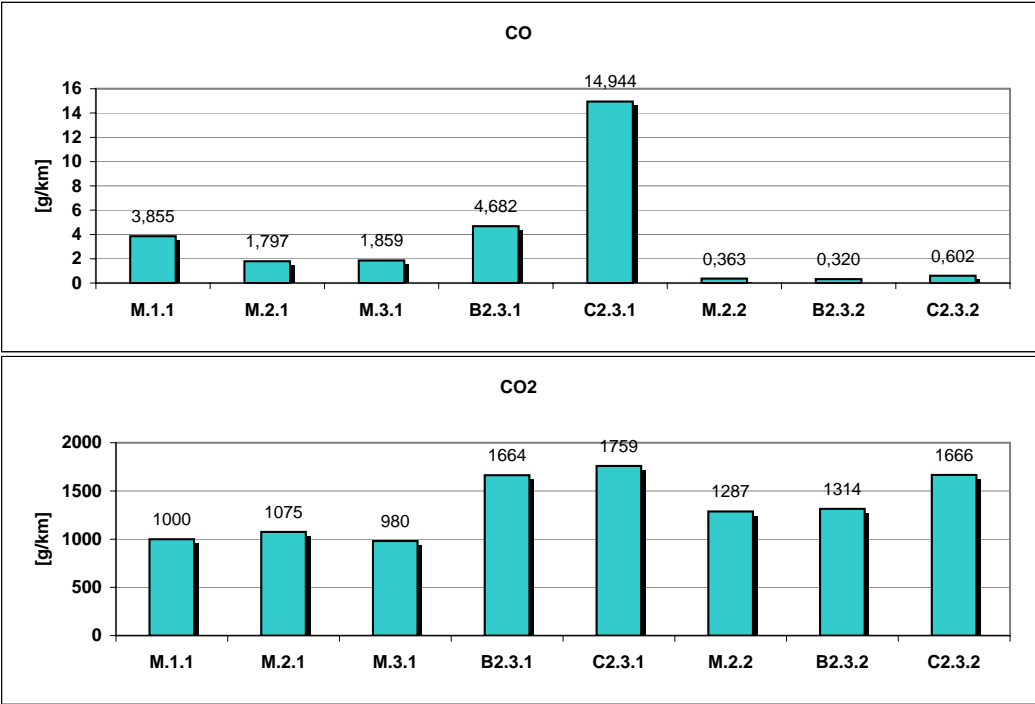


Figura 4.18: Resumen emisiones monóxido de carbono (CO)y dióxido de carbono (CO2)

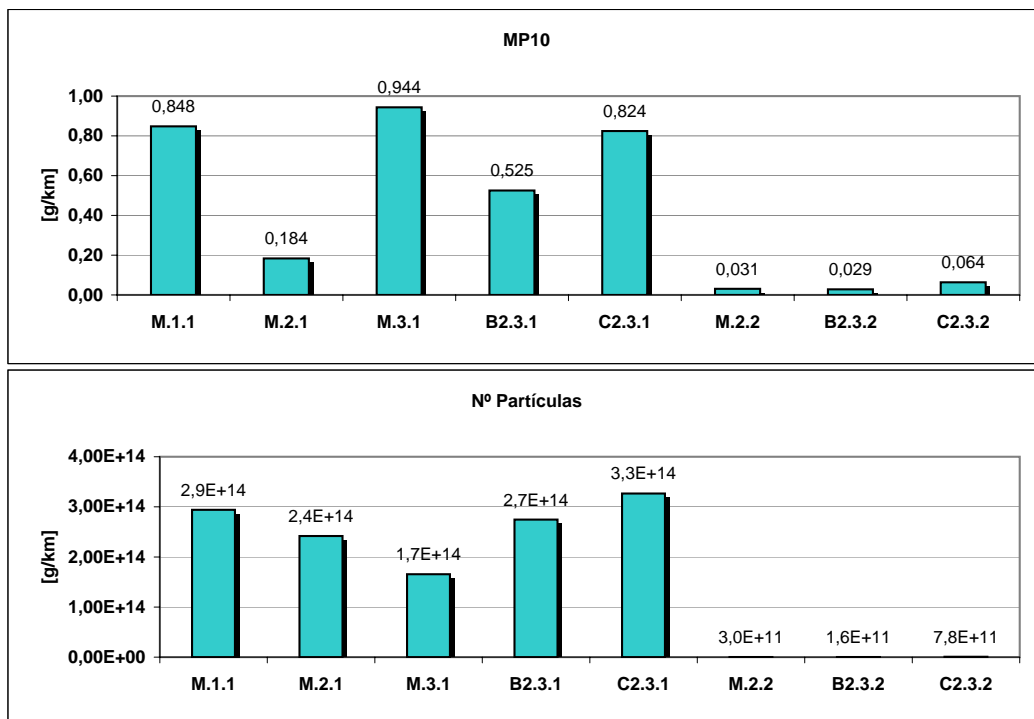


Figura 4.19: Resumen emisiones material particulado respirable (MP10) y número de partículas

antes del Transantiago, se puede notar que en la mayoría de los contaminantes se produce una reducción en las emisiones a medida que las normas de emisión aumentan su nivel de exigencia. A pesar de esta tendencia, la incorporación de tecnología no asegura por sí sola la obtención en una reducción de las emisiones, sino que también es necesaria una adecuada mantención que asegure el correcto funcionamiento de los sistemas de control de emisiones. Esta dependencia en la mantención se ve reflejada en el bus M.2.1, el cual, a pesar de tener una norma de emisión EURO II, sus emisiones en CO y MP10 son menores que el bus M.3.1 el cual tiene una norma EURO III.

En cuanto a los buses que cumplen las normas estándar del Transantiago, para la mayoría de los contaminantes el bus VOLVO V7 presentaba menores índices de emisión con respecto al bus VOLVO V9. Sin embargo, en ambos casos se utilizan distintos ciclos de conducción además de que poseen distinta tecnología de operación y de pasajeros transportados.

En el caso de los buses que tienen implementado un filtro que permite superar las normas de emisiones del Transantiago, es posible apreciar que para la gran mayoría de los contaminantes la disminución de emisiones era evidente, reduciendo de manera considerable lo emitido a la atmósfera. Este aporte en la disminución de emisiones, es mucho más claro que un cambio tecnológico, ya que la tecnología de filtros permite una mayor reducción de emisiones que el cambio de norma.

4.3. Comparación de Emisiones de cada Fase de los Ciclos de Conducción

Los ciclos de conducción utilizados están formados por dos fases. Primero una fase de velocidad baja, seguido por una fase caracterizada por una de velocidad alta. Resulta interesante determinar el peso que poseen estas fases en las emisiones contaminantes.

Los datos obtenidos son los siguientes:

Para el caso de los hidrocarburos (ver figura 4.20), las emisiones son siempre mayores durante la primera fase del ciclo tanto para el ciclo ETC, como el ciclo Santiago y para todos los buses estudiados. Las diferencias corresponden a una disminución del 44% durante la segunda fase en el ciclo Santiago y de un 39% durante la segunda fase para el ciclo ETC.

El caso de los óxidos de nitrógeno (ver figura 4.20) es similar al anterior, donde las primeras fases de ambos ciclos tienen un mayor peso en las emisiones totales, correspondiendo a una diferencia del 39% durante la segunda fase del ciclo Santiago y de 36% para la segunda

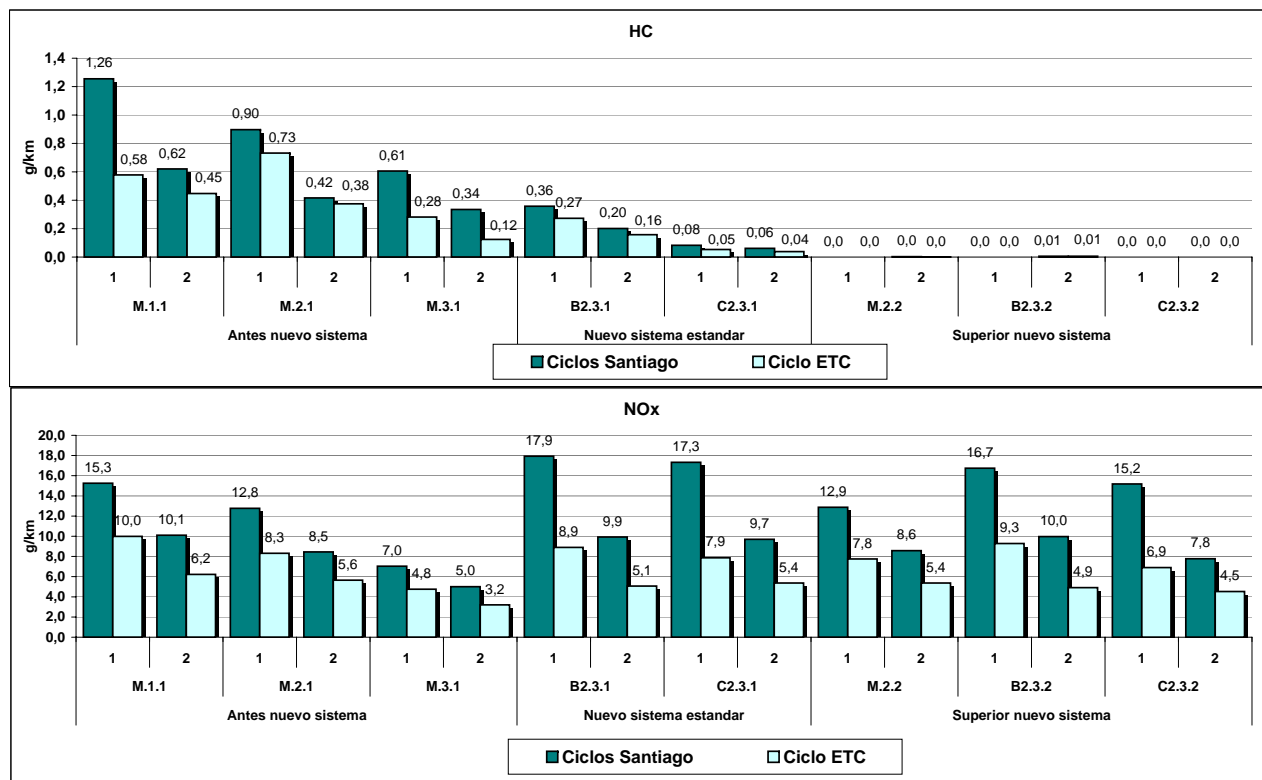


Figura 4.20: Resumen emisiones hidrocarburos (HC)

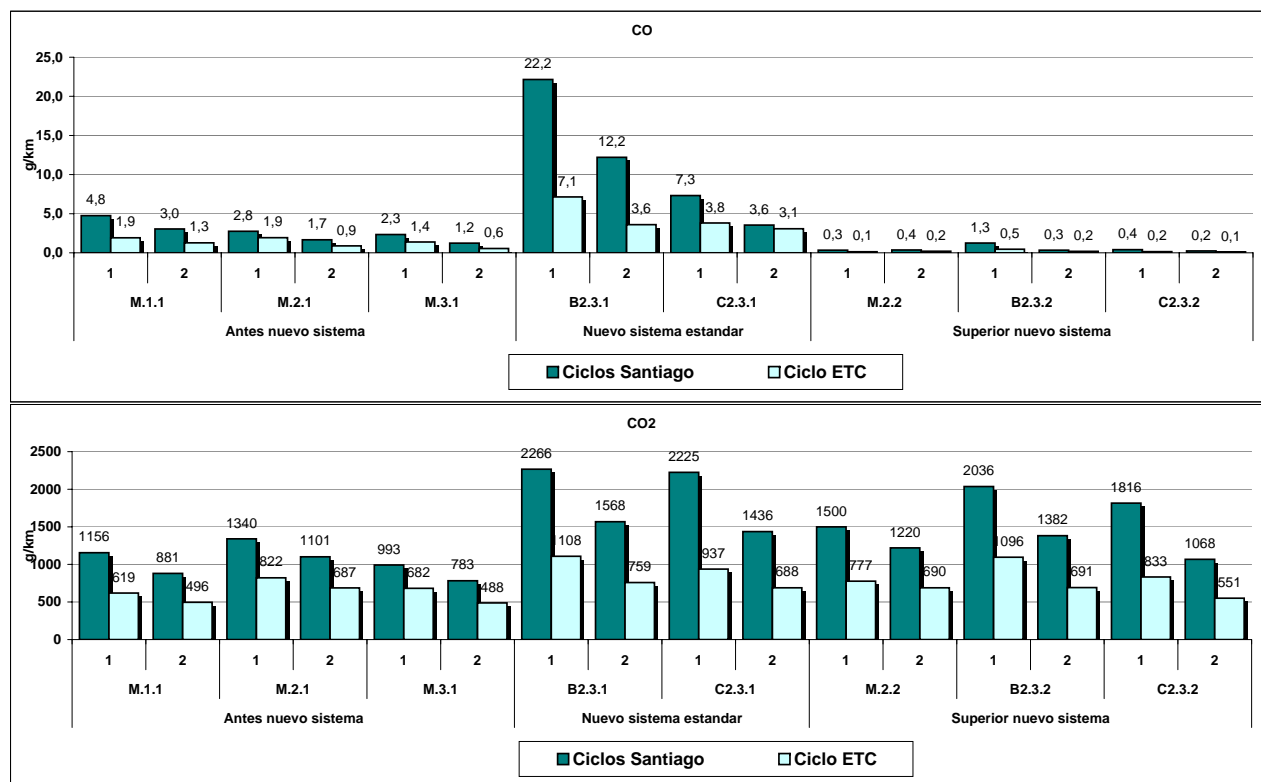


Figura 4.21: Resumen emisiones monóxido de carbono (CO)

fase del ciclo ETC.

El monóxido de carbono y el dióxido de carbono (ver figura 4.21) se comportan de la misma manera que los contaminantes anteriores. Para el CO se produce una diferencia en las emisiones de un 41 % durante la segunda fase del ciclo Santiago, y de un 31 % durante la segunda fase del ciclo ETC. En el caso del CO₂, las diferencias corresponden a un 28 % durante la segunda fase del ciclo Santiago, y de un 26 % durante la segunda fase del ciclo ETC

Al igual que en los casos anteriores, existe una marcada diferencia durante la segunda fase de cada ciclo. Para el caso del material particulado respirable y número de partículas (ver figura 4.22), se produce una diferencia de 35 % para el ciclo Santiago y de 17 % para el ciclo ETC. Mientras que para el número de partículas, durante la segunda fase del ciclo Santiago se produce una diferencia de 24 %, y de 19 % durante la segunda fase del ciclo ETC.

En la tabla 4.6 se presenta un resumen de los datos obtenidos.

De la tabla se deduce que la variable aceleración, la cual se presenta de mayor medida en

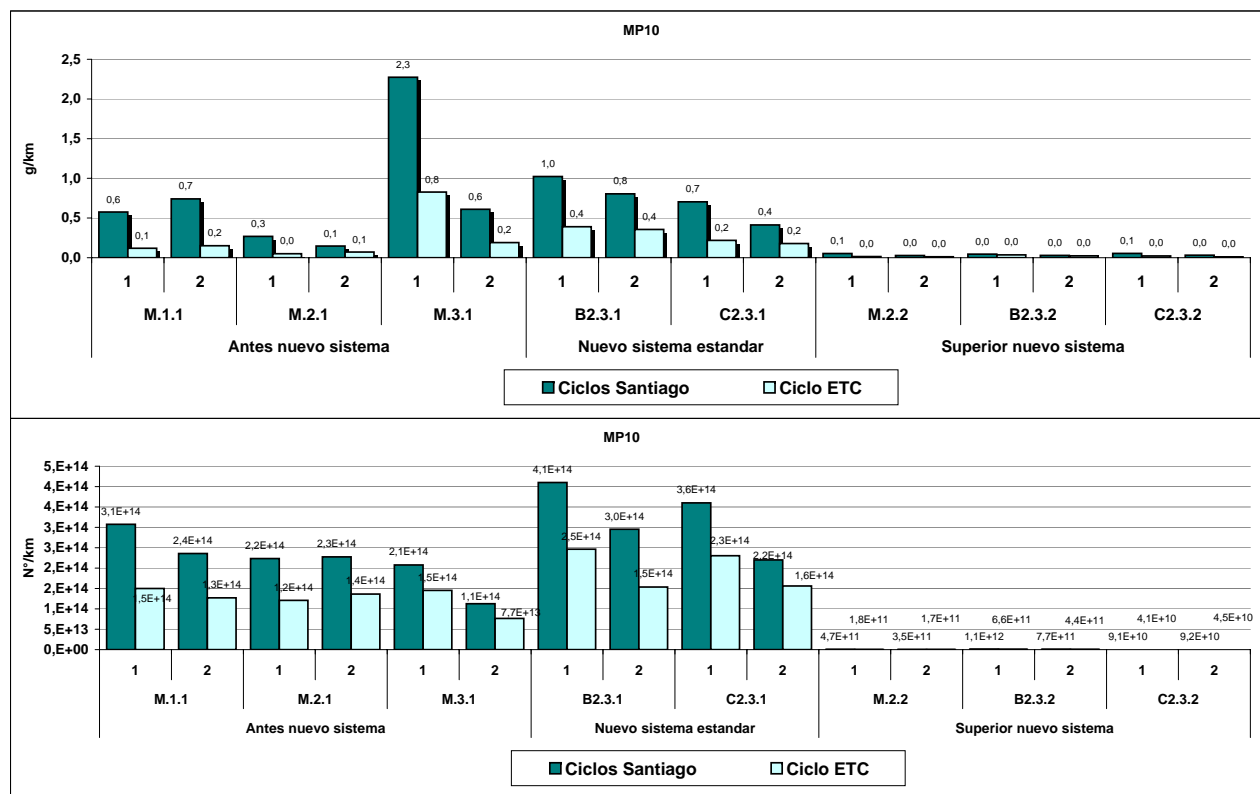


Figura 4.22: Resumen emisiones material particulado respirable (MP10)

Tabla 4.6: Resumen emisiones para los buses en estudio

Ciclo		M.1.1		M.2.1		M.3.1		B2.3.1		C2.3.1		M.2.2		B2.3.2		C2.3.2	
Fases		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
HC	g/km	1,26	0,62	0,90	0,42	0,61	0,34	0,36	0,20	0,08	0,06	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
NOX	g/km	15,26	10,11	12,77	8,45	7,04	5,01	17,93	9,93	17,33	9,69	12,87	8,57	16,74	9,96	15,19	7,78
CO	g/km	4,76	3,05	2,76	1,67	2,34	1,23	22,16	12,21	7,32	3,55	0,33	0,36	1,25	0,33	0,40	0,24
CO2	g/km	1156	881	1340	1101	993	783	2266	1568	2225	1436	1500	1220	2036	1382	1816	1068
MP10	g/km	0,6	0,7	0,3	0,1	2,3	0,6	1,0	0,8	0,7	0,4	0,1	0,0	0,0	0,0	0,1	0,0
MP10	N°/km	3,1E+14	2,4E+14	2,2E+14	2,3E+14	2,1E+14	1,1E+14	4,1E+14	3,0E+14	3,6E+14	2,2E+14	4,7E+11	3,5E+11	1,1E+12	7,7E+11	9,1E+10	9,2E+10
Ciclo ETC		M.1.1		M.2.1		M.3.1		B2.3.1		C2.3.1		M.2.2		B2.3.2		C2.3.2	
Fases		1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2	1	2
HC	g/km	0,58	0,45	0,73	0,38	0,28	0,12	0,27	0,16	0,05	0,04	0,00	0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
NOX	g/km	9,99	6,22	8,31	5,65	4,75	3,21	8,90	5,07	7,87	5,37	7,76	5,37	9,28	4,91	6,89	4,52
CO	g/km	1,92	1,28	1,94	0,89	1,38	0,56	7,14	3,60	3,81	3,08	0,14	0,20	0,46	0,19	0,15	0,13
CO2	g/km	619	496	822	687	682	488	1108	759	937	688	777	690	1096	691	833	551
MP10	g/km	0,1	0,2	0,0	0,1	0,8	0,2	0,4	0,4	0,2	0,2	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
MP10	N°/km	1,5E+14	1,3E+14	1,2E+14	1,4E+14	1,5E+14	7,7E+13	2,5E+14	1,5E+14	2,3E+14	1,6E+14	1,8E+11	1,7E+11	6,6E+11	4,4E+11	4,1E+10	4,5E+10

las primeras fases de cada ciclo, tiene mayor relevancia que la velocidad media. Este nivel de aceleración va a acompañado directamente con el porcentaje de detención, por lo que mantener una velocidad constante, evitando acelerar brusca y seguidamente disminuiría en parte la contaminación emitida a la atmósfera.

4.4. Comparación Emisiones Ciclo ETC y Santiago

Resulta interesante comparar las emisiones contaminantes utilizando 2 ciclos de conducción distintos. En este caso se utilizó el ciclo de referencia ETC (fases 1 y 2) y el ciclo Santiago.

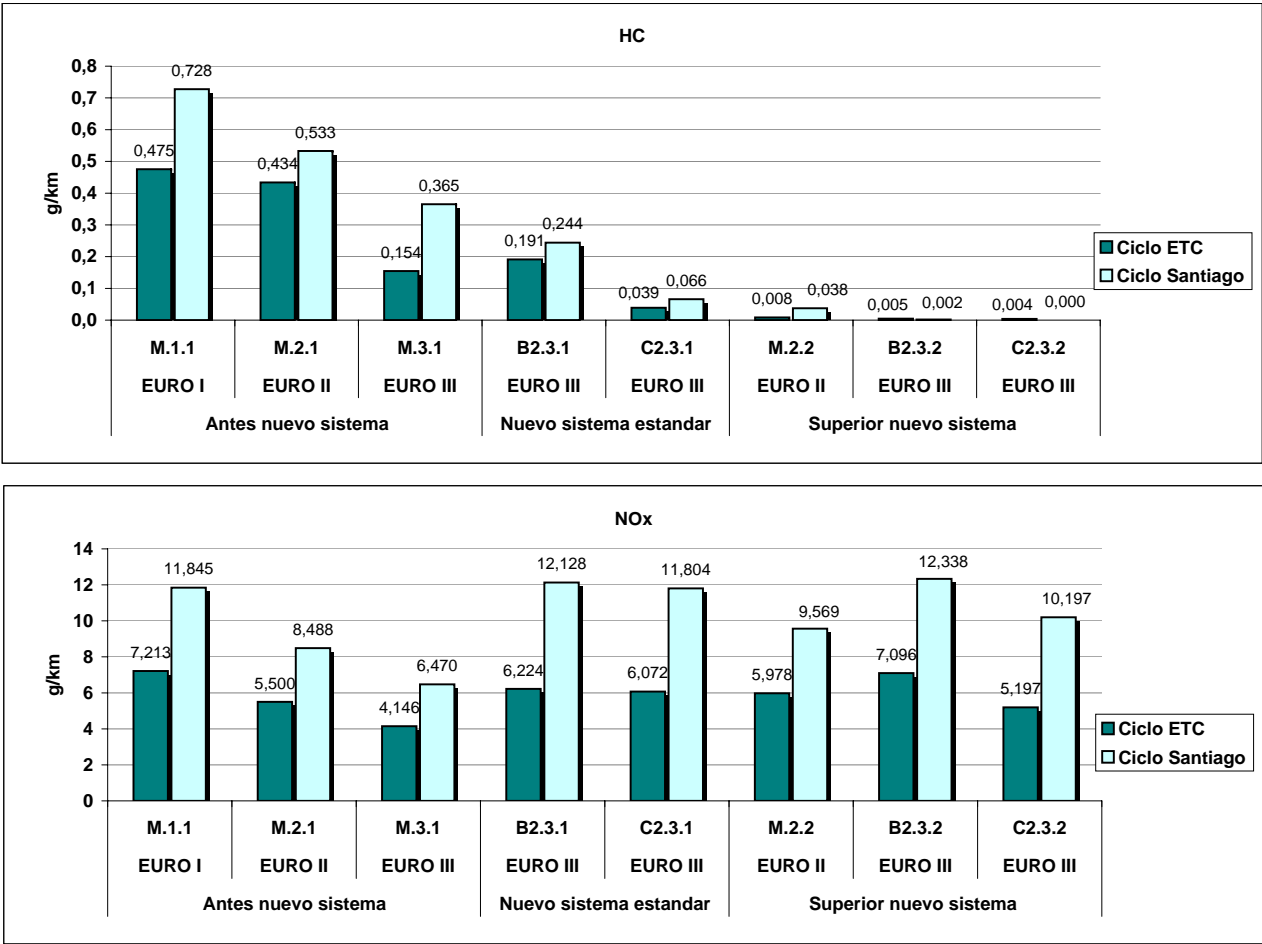


Figura 4.23: Resumen emisiones hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx)

Las emisiones, tanto para HC como para NOx (ver figura 4.23), presentan una disminu-

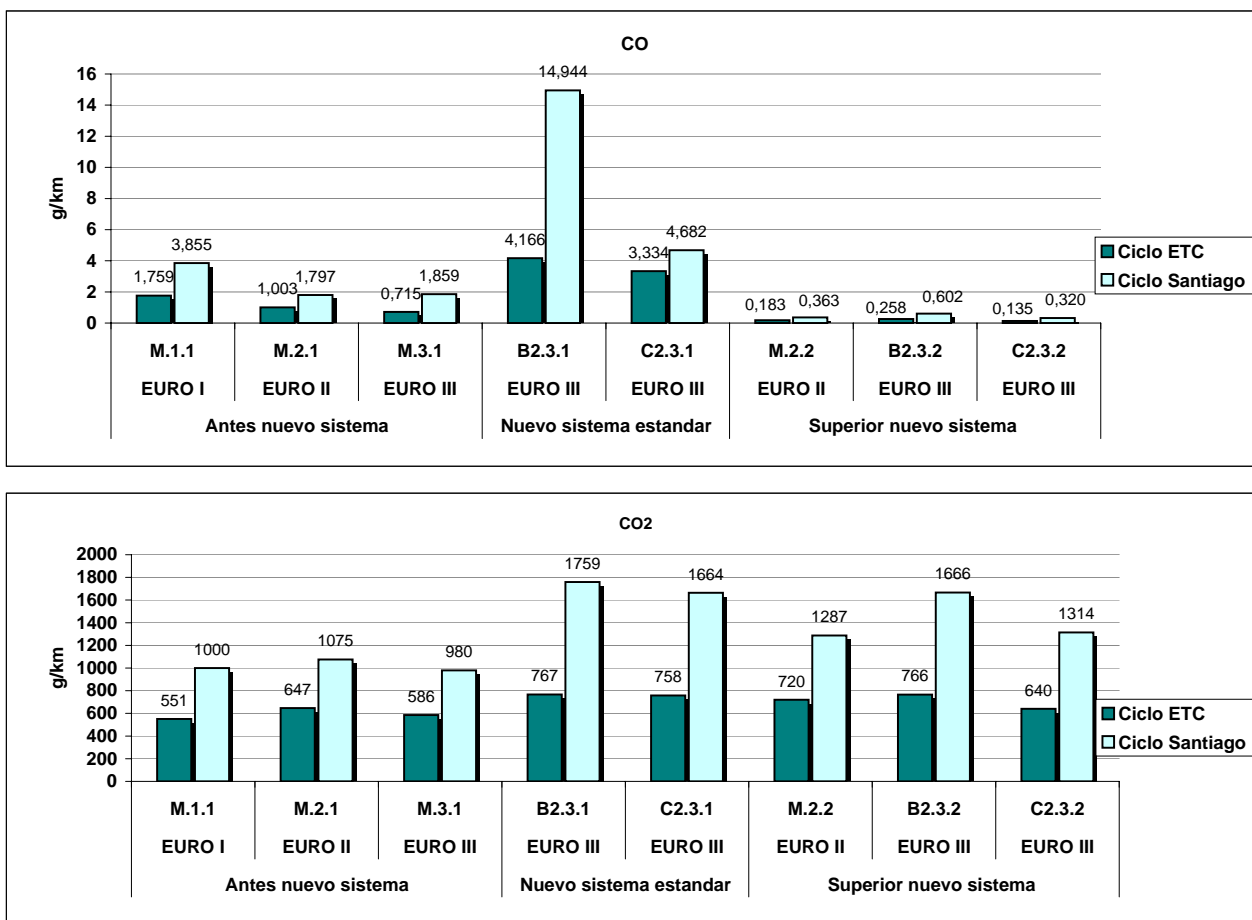


Figura 4.24: Resumen emisiones monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO2)

ucción al utilizar el ciclo ETC comparado con el ciclo Santiago. Estas disminuciones corresponden a un 37 % para el HC, y de un 43 % para NOx.

Al igual que en el caso anterior, las emisiones de monóxido de carbono y dióxido de carbono (ver figura 4.24) son menores al utilizar el ciclo ETC. Las reducciones corresponden a un 53 % para CO, y de un 48 % para CO2.

Las emisiones de material particulado respirable y número de partículas (figura 4.25) muestran la mayor diferencia entre ambos ciclos, alcanzando un 67 % en promedio de reducción de material particulado para todas las tecnologías en el caso del ciclo ETC, mientras que para el número de partículas esta diferencia corresponde a un 53 %.

En la tabla 4.7 se presenta un resumen de los datos obtenidos.

Al observar los ciclos de conducción utilizados, se puede notar que el ciclo Santiago

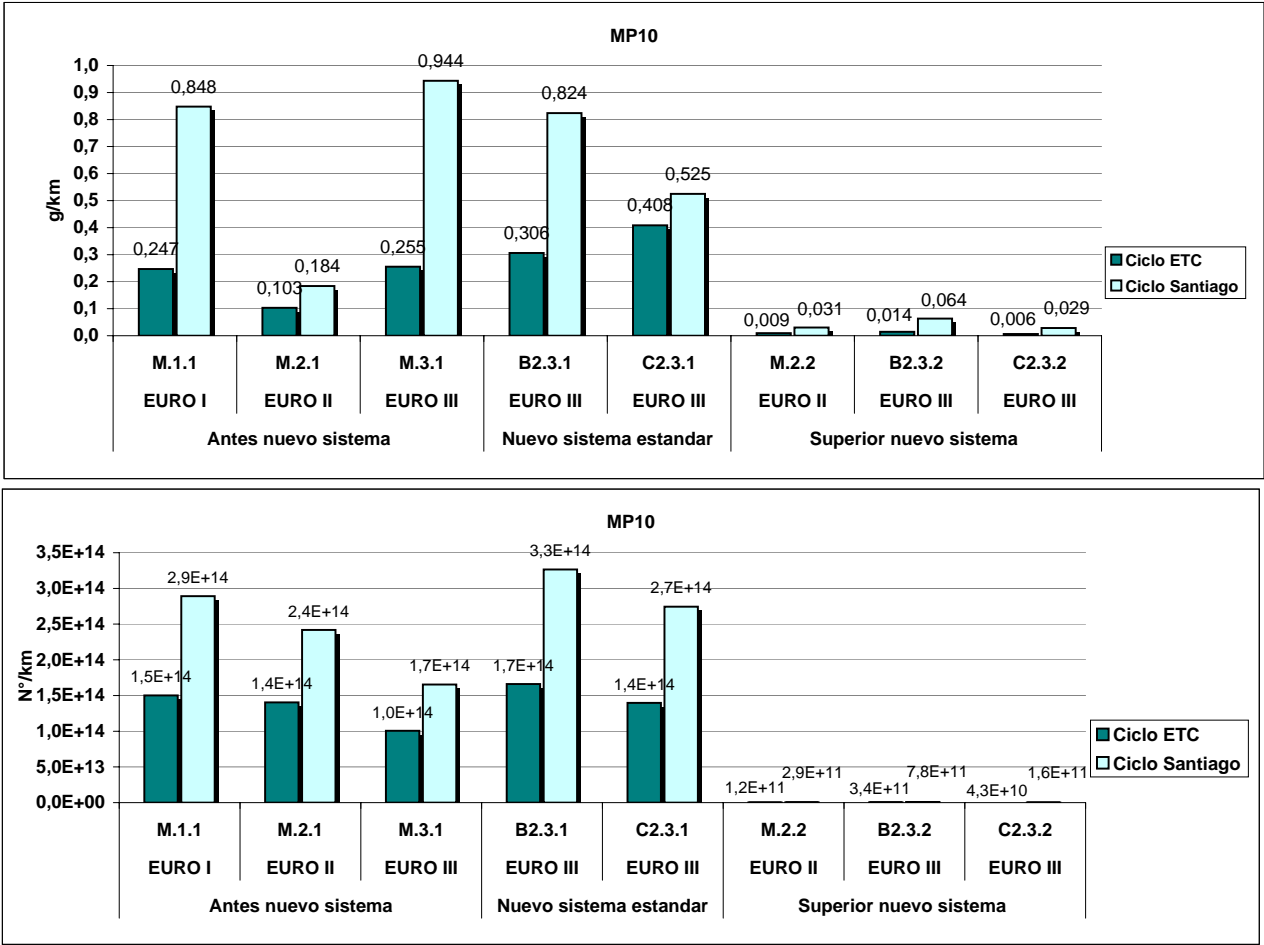


Figura 4.25: Resumen emisiones material particulado respirable (MP10) y número de partículas

Tabla 4.7: Resumen promedio emisiones campañas 2 y 3, ciclo Santiago y ETC

PROMEDIO CAMPAÑAS 2 Y 3 CICLO ETC									
Contaminante		M.1.1	M.2.1	M.3.1	B2.3.1	C2.3.1	M.2.2	B2.3.2	C2.3.2
HC	g/km	0,475	0,434	0,154	0,039	0,191	0,008	0,004	0,005
NOX	g/km	7,213	5,500	4,146	6,072	6,224	5,978	5,197	7,096
CO	g/km	1,759	1,003	0,715	3,334	4,166	0,183	0,135	0,258
CO2	g/km	551,0	647,1	585,8	757,7	767,3	720,2	640,2	765,9
MP10	g/km	0,247	0,103	0,255	0,408	0,306	0,009	0,006	0,014
Nº Partículas	Nº/km	1,50E+14	1,40E+14	1,01E+14	1,40E+14	1,66E+14	1,22E+11	4,33E+10	3,40E+11
PROMEDIO CAMPAÑAS 2 Y 3 CICLO SANTIAGO									
Contaminante		M.1.1	M.2.1	M.3.1	B2.3.1	C2.3.1	M.2.2	B2.3.2	C2.3.2
HC	g/km	0,7275	0,5330	0,3650	0,0660	0,2440	0,0375	0,0000	0,0020
NOX	g/km	11,8450	8,4880	6,4700	11,8040	12,1280	9,5690	10,1965	12,3375
CO	g/km	3,8550	1,7970	1,8585	4,6815	14,9440	0,3625	0,3200	0,6020
CO2	g/km	999,6	1075,3	979,9	1663,7	1759,0	1287,1	1314,5	1666,4
MP10	g/km	0,8480	0,1838	0,9435	0,5250	0,8240	0,0305	0,0285	0,0635
Nº Partículas	Nº/km	2,89E+14	2,42E+14	1,65E+14	2,74E+14	3,27E+14	2,89E+11	1,61E+11	7,80E+11

(CTSA, CTSM-1 y CTSM-2) es un ciclo de conducción mucho más agresivo que el ciclo ETC. Esto influye directamente en que las emisiones son mayores para todos los contaminantes. El ciclo ETC presenta menores detenciones (6 % de operación en ralentí), lo cual reduce los modos de aceleración al compararlo con el ciclo Santiago.

Una posible explicación de las diferencias encontradas en las emisiones, es que el ciclo europeo ETC está estrechamente relacionado con los puntos de operación del ciclo de certificación de la norma EURO3 III, por lo cual es muy probable que los sistemas de control de los motores estén optimizados para operar en estas condiciones, cosa que no ocurre necesariamente en los ciclos locales y esto se traduce en la diferencia observada al comparar ambos ciclos.

4.5. Comparación de Emisiones Utilizando Combustible Referencia y Combustible Comercial

Para el siguiente caso en estudio, los combustibles utilizados varían fundamentalmente en el nivel de azufre que poseen. Se utilizó el ciclo ETC, fases 1 y 2 para realizar la experiencia. El detalle del nivel de azufre utilizado en este ensayo, se encuentra en la descripción de la flota en la sección Anexos del presente informe.

Los resultados obtenidos son los siguientes:

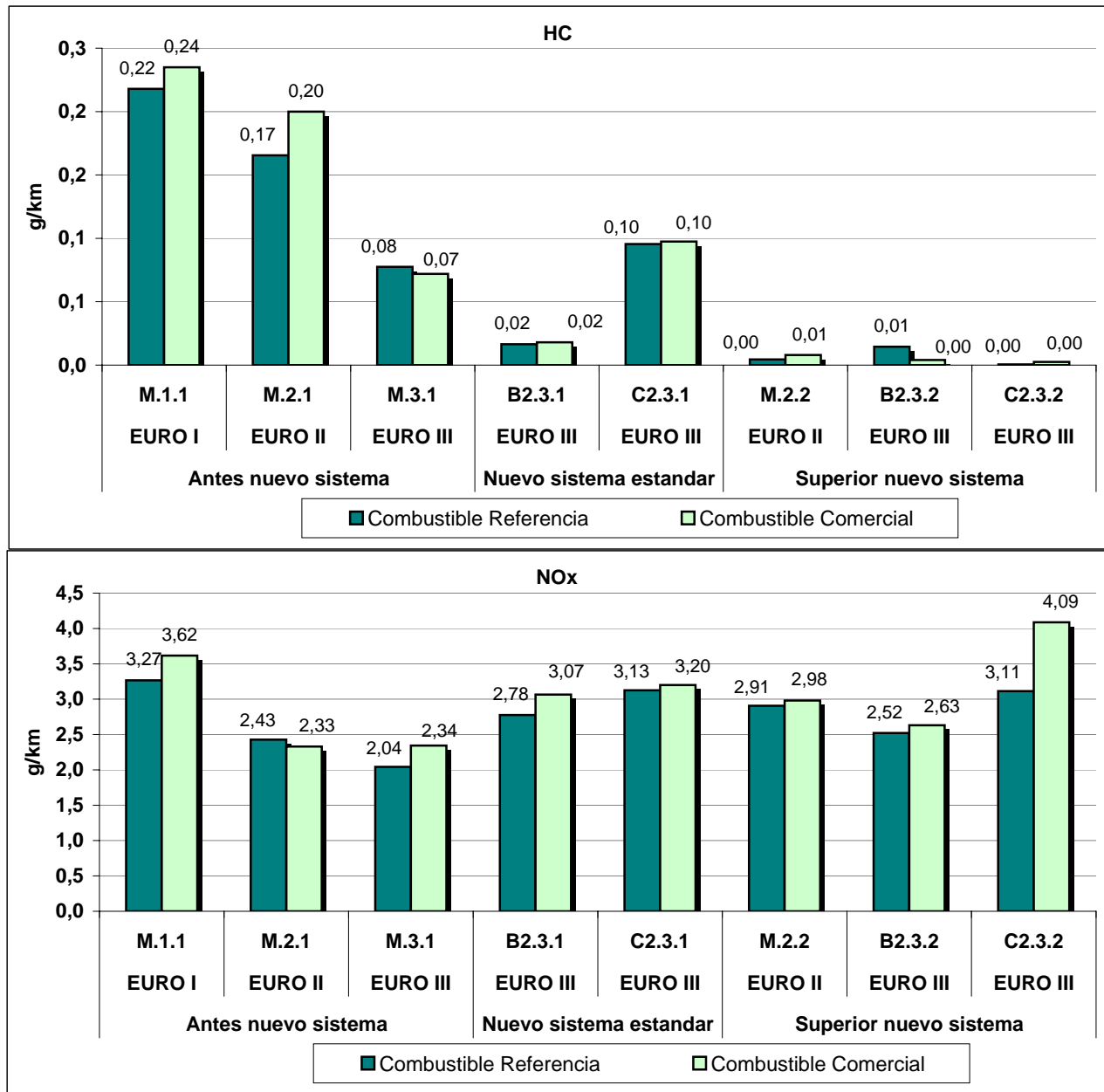


Figura 4.26: Resumen emisiones hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx)

Para el caso de las emisiones de hidrocarburos y óxidos de nitrógeno (figura 4.26), se observa una tendencia al alza en las emisiones al pasar de un combustible con menor nivel de azufre (combustible de referencia), a uno de mayor (combustible comercial). Las emisiones ascienden cerca de un 20 % para el HC y en un 9 % para el NOx.

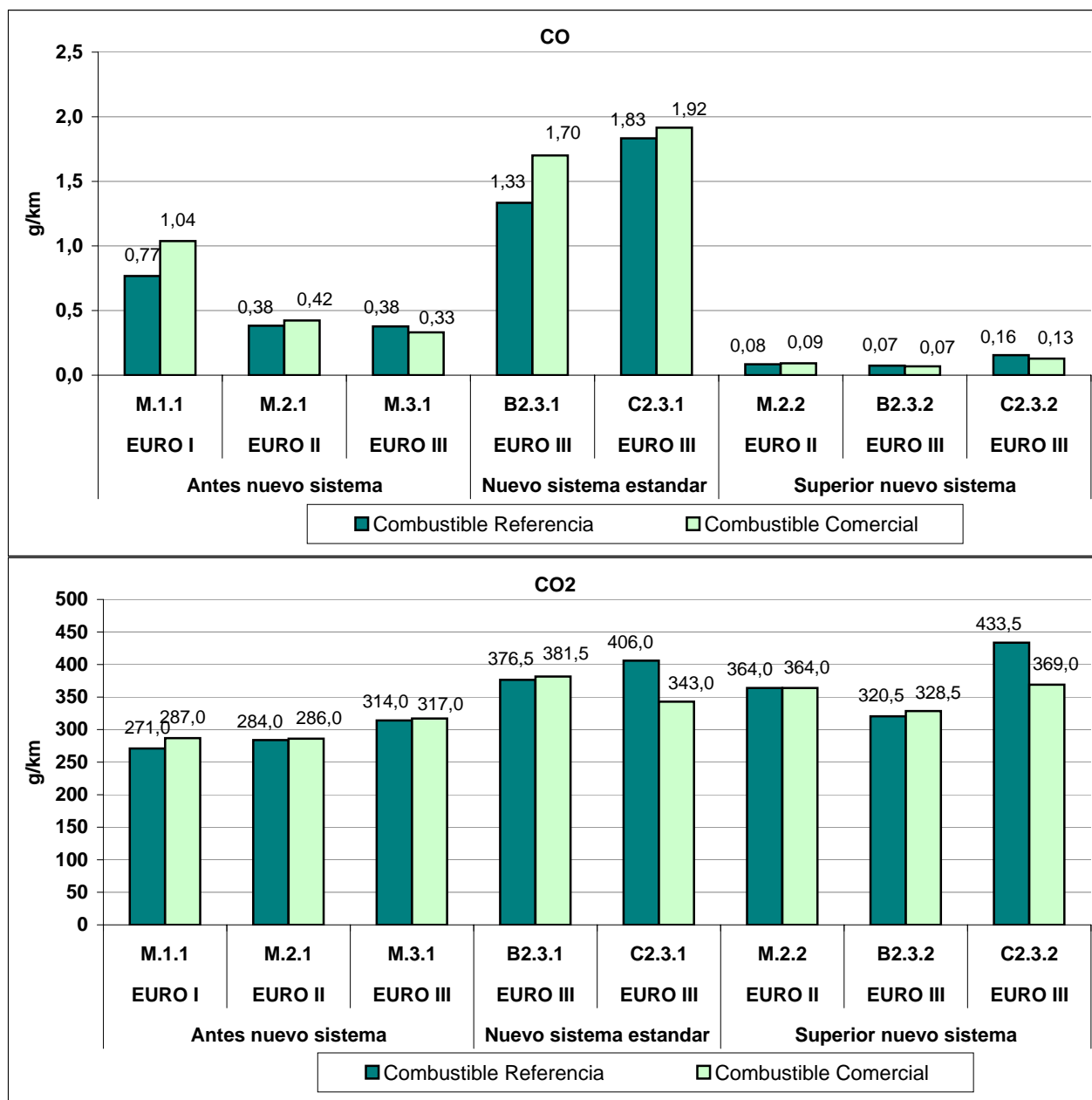


Figura 4.27: Resumen emisiones monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO2)

Las emisiones de monóxido de carbono y dióxido de carbono (ver figura 4.27) no presentan el mismo comportamiento del caso anterior. Si bien el CO aumenta en casi un 7%, el CO2 no presenta esta misma tendencia, si no que por el contrario las emisiones disminuyen casi en un 3%

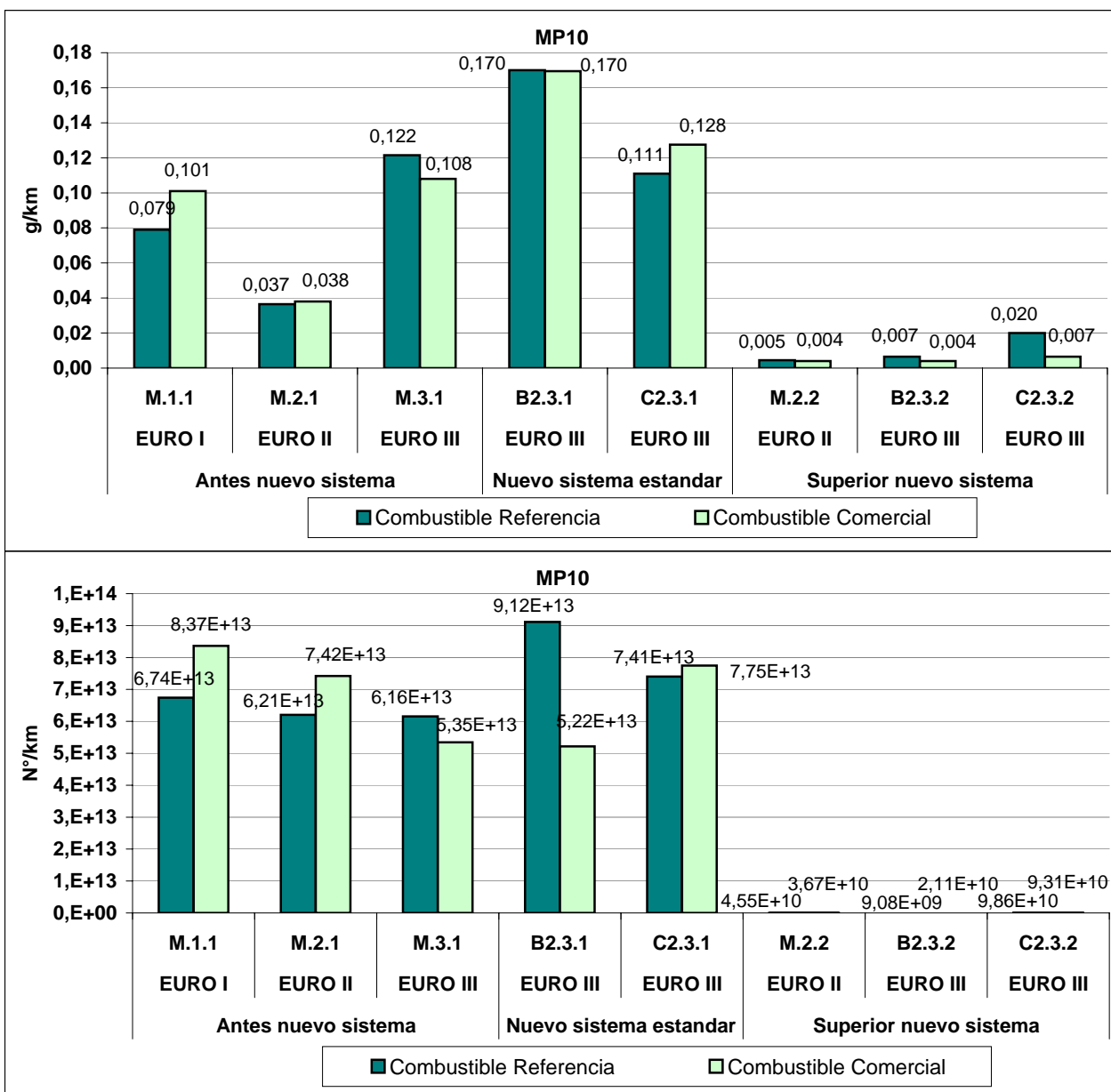


Figura 4.28: Resumen emisiones material particulado respirable (MP10) y número de partículas

El material particulado respirable es uno de los contaminantes que mas se ve afectado por el nivel de azufre del combustible, sin embargo en este caso (ver figura 4.28) se observa un leve aumento de las emisiones contaminantes al subir el nivel de azufre en el combustible. Este aumento corresponde a un 4 % para el MP10 y de un 2 % para el número de partículas.

En la tabla de la figura 4.8 se presenta un resumen de los datos obtenidos.

Tabla 4.8: Resumen promedio emisiones campañas 2 y 3, ciclo ETC combustible referencia y comercial

Promedio Campañas 2 y 3 Ciclo ETC Combustible referencia									
Contaminante		M.1.1	M.2.1	M.3.1	B2.3.1	C2.3.1	M.2.2	B2.3.2	C2.3.2
HC	g/km	0,22	0,17	0,08	0,02	0,10	0,00	0,01	0,00
NOX	g/km	3,27	2,43	2,04	2,78	3,13	2,91	2,52	3,11
CO	g/km	0,77	0,38	0,38	1,33	1,83	0,08	0,07	0,16
CO2	g/km	271,0	284,0	314,0	376,5	406,0	364,0	320,5	433,5
MP10	g/km	0,08	0,04	0,12	0,17	0,11	0,00	0,01	0,02
Nº Partículas	Nº/km	6,74E+13	6,21E+13	6,16E+13	9,12E+13	7,41E+13	4,55E+10	9,08E+09	9,86E+10
Promedio Campañas 2 y 3 Ciclo ETC Combustible comercial									
Contaminante		M.1.1	M.2.1	M.3.1	B2.3.1	C2.3.1	M.2.2	B2.3.2	C2.3.2
HC	g/km	0,24	0,20	0,07	0,02	0,10	0,01	0,00	0,00
NOX	g/km	3,62	2,33	2,34	3,07	3,20	2,98	2,63	4,09
CO	g/km	1,04	0,42	0,33	1,70	1,92	0,09	0,07	0,13
CO2	g/km	287,0	286,0	317,0	381,5	343,0	364,0	328,5	369,0
MP10	g/km	0,10	0,04	0,11	0,17	0,13	0,00	0,00	0,01
Nº Partículas	Nº/km	8,37E+13	7,42E+13	5,35E+13	5,22E+13	7,75E+13	3,67E+10	2,11E+10	9,31E+10

Actualmente la ciudad de Santiago se encuentra con niveles de azufre con estándares internacionales. Al presentar niveles de azufre tan bajos, no se observa una marcada tendencia en las emisiones al bajar el nivel de azufre del combustible de menos de 50 ppm a menos de 3 ppm. Si bien existe una disminución global en promedio de alrededor de un 4 %, resulta necesario analizar el real efecto de los pro y los contra de disminuir el nivel de azufre, ya que la disminución en las emisiones no es muy grande.

4.6. Comparación Emisiones Tecnologías con y sin Filtros

Para comprobar el real funcionamiento de la implementación de filtros de partículas en los buses del transporte público, se midieron 8 buses diferentes en su mayoría, a la flota estudiada anteriormente. De esta manera se permitió ensayar cada bus sin filtro en una primera ocasión y luego con el filtro implementado en una segunda oportunidad. Mediante este procedimiento se puede calcular la eficiencia del filtro y así obtener su beneficio.

A continuación se presentan los resultados obtenidos, donde se mantuvo el mismo código para representar cada bus estudiado.

En términos de reducción de HC y NOx (ver figura 4.29), los resultados muestran que la reducción en términos de masa es alrededor de un 74 % para los hidrocarburos, mientras que los óxidos de nitrógeno no presentan variación. Para el caso del HC, sólo se pudieron medir 2 buses debido a una pequeña falla en el resto de la flota.

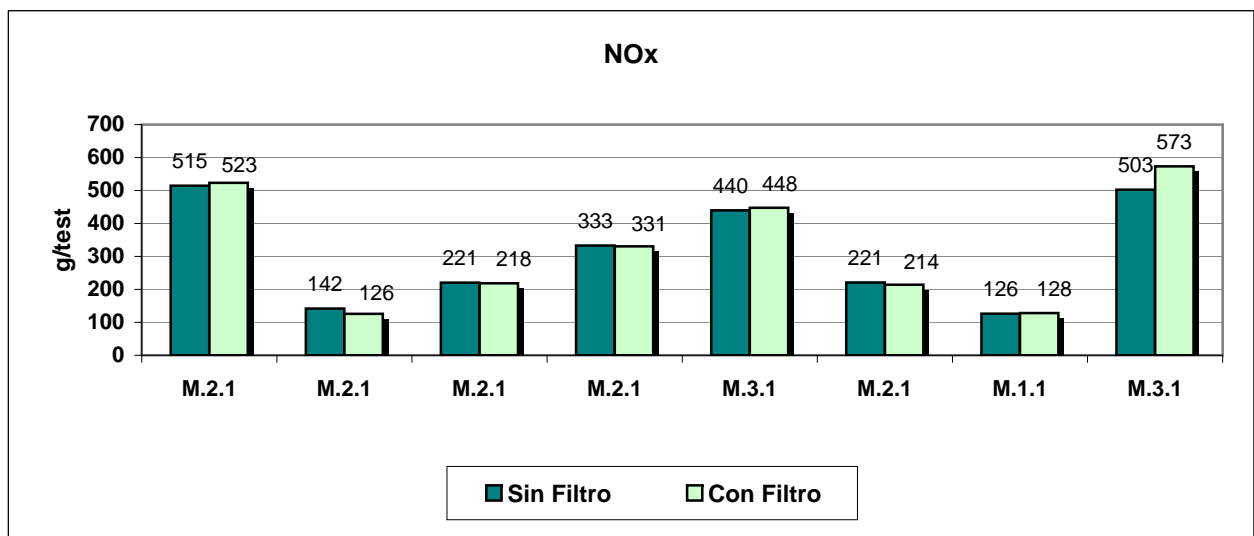
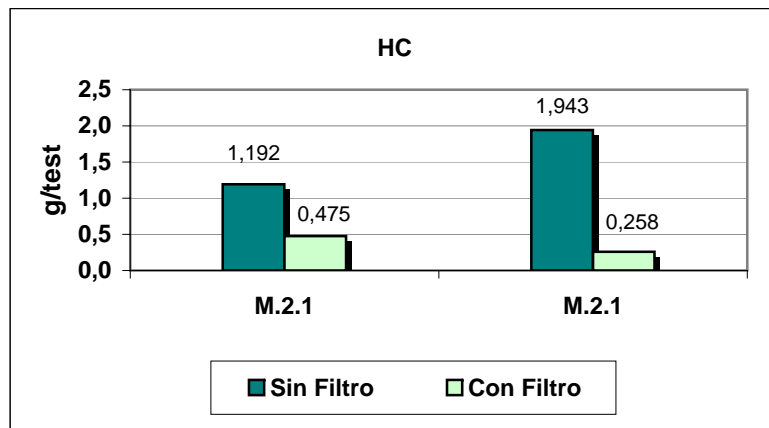


Figura 4.29: Resumen emisiones hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx)

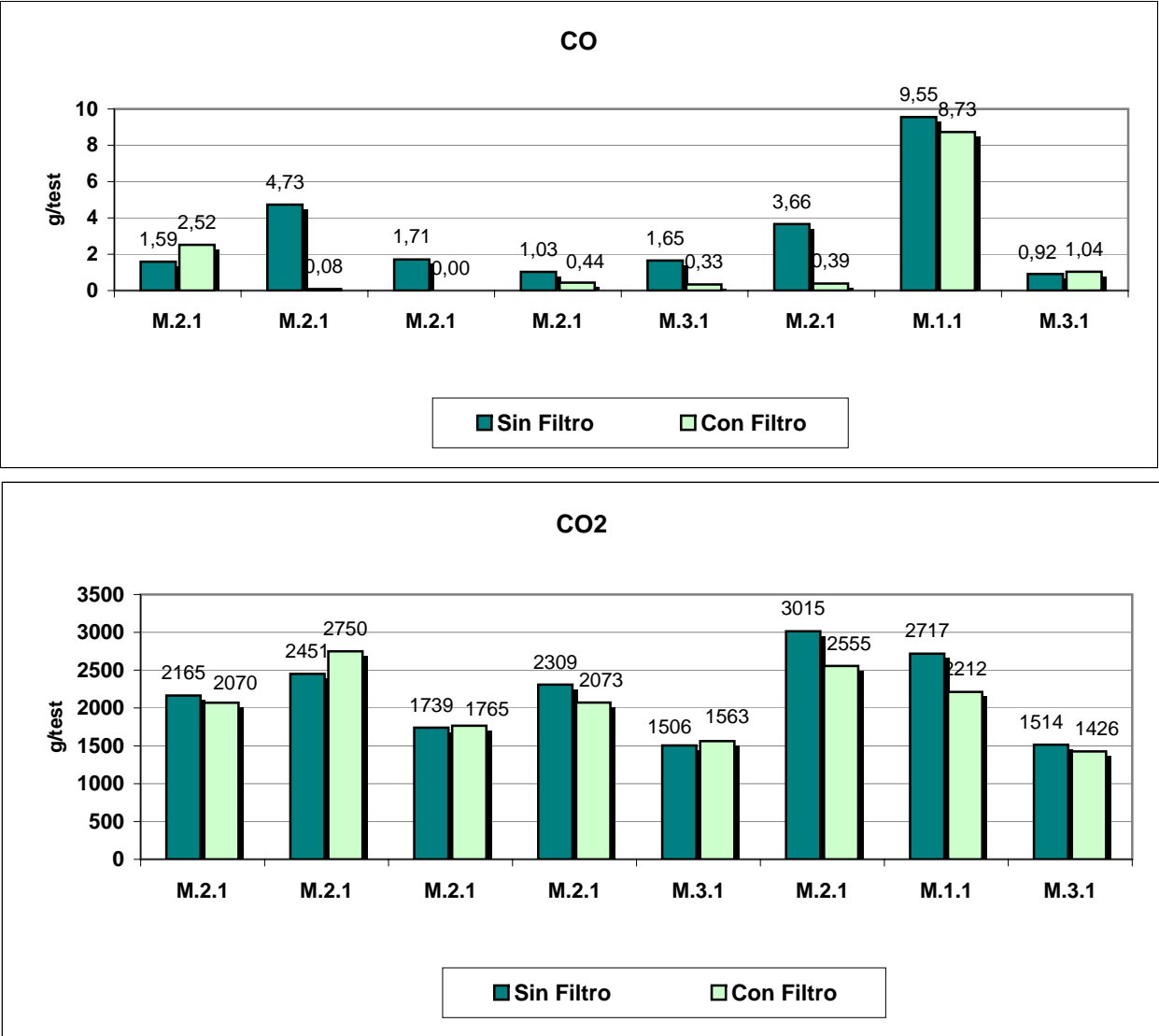


Figura 4.30: Resumen emisiones monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO2)

Para el caso del monóxido de carbono y dióxido de carbono (ver figura 4.30), las diferencias son similares al caso anterior. El CO2 es reducido en un 50%, mientras que el CO, sólo presenta una disminución del 3%.

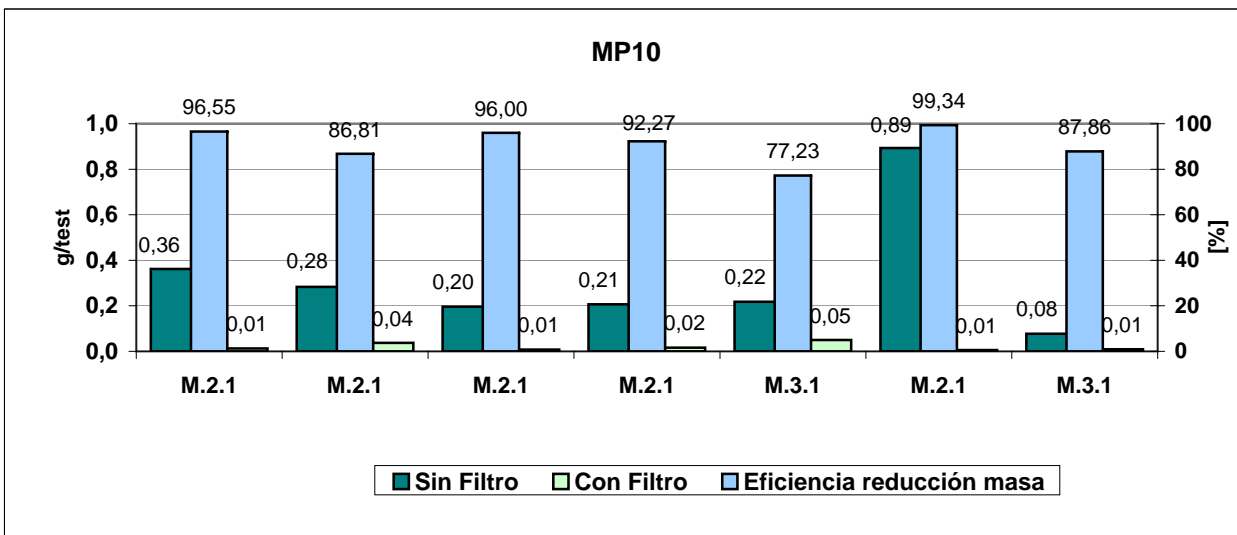


Figura 4.31: Resumen emisiones material particulado respirable (MP10) y eficiencia del másica del filtro

El mayor beneficio de la implementación del filtro, se ve claramente en el caso del material particulado respirable (ver figura 4.31). Para este caso la reducción de las emisiones varían entre un 70 % y 99 %, obteniendose en promedio una reducción cercana al 90 %.

4.7. Comparación de emisiones según tipo de coast down

Para analizar el efecto real al utilizar diferentes factores de carga (Teórico y Experimental), se analizaron experimentalmente las emisiones contaminantes del bus VOLVO V9 utilizando el ciclo de conducción CTSM-1. Los resultados se muestran en la tabla 4.9 y en las figuras 4.32, 4.33 y 4.34.

Tabla 4.9: Resultados emisiones para los distintos valores de coast down estudiados

Contaminante		Coast-down		Error
		Teórico	Experimental	
HC	g/km	0,244	0,242	0,87%
NOx	g/km	12,128	12,759	-5,21%
CO	g/km	14,944	14,593	2,35%
CO2	g/km	1760	1758	0,08%
MP10	g/km	0,824	0,7727	6,21%
N° Partículas	N°/km	3,3E+14	3,0E+14	7,01%

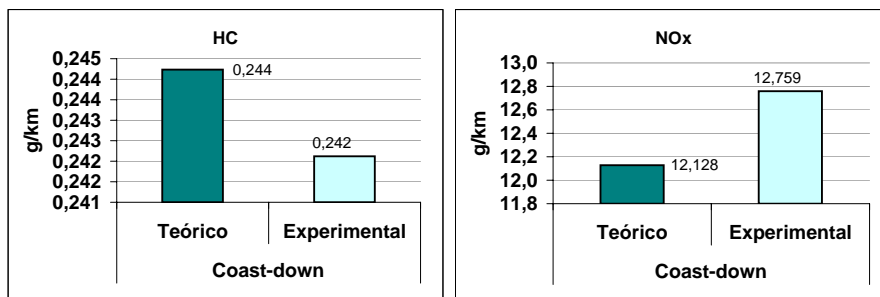


Figura 4.32: Emisiones hidrocarburos (HC) y óxidos de nitrógeno (NOx), ciclo CTSM-1

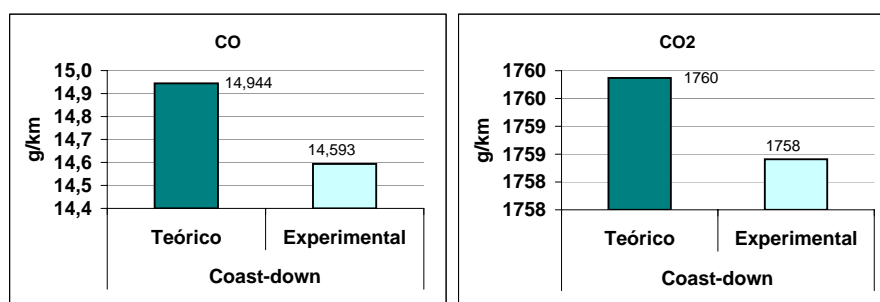


Figura 4.33: Emisiones monóxido de carbono (CO) y dióxido de carbono (CO2), ciclo CTSM-1

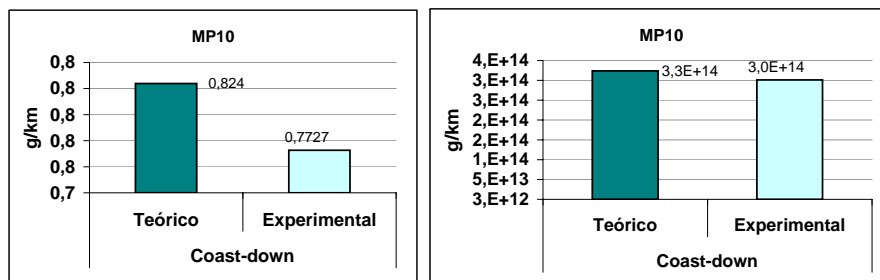


Figura 4.34: Emisiones material particulado respirable (MP10) y número de partículas, ciclo CTSM-1

Los gráficos anteriores muestran pequeñas diferencias entre las emisiones, según los factores teóricos y experimentales del bus estudiado. Los valores teóricos son apenas mayores un 7% para el caso del material particulado respirable, y menores diferencias en el resto de los contaminantes.

Si bien existen diferencias en los factores de carga obtenidos, éstas no se reflejan de gran manera en las emisiones contaminantes del bus estudiado.

Capítulo 5

Discusión y Conclusiones

5.1. Conclusiones Generales

Mediante el presente trabajo se logra establecer una base y metodología para la realización de mediciones experimentales de factores de emisión de vehículos pesados, particularmente para buses del transporte público de la Región Metropolitana. De este modo se logran establecer factores de emisión que representan las condiciones locales de las tecnologías y condiciones propias de conducción en la ciudad de Santiago.

Los procedimientos utilizados y la tecnología de medición, así como la flota de buses ensayados, permiten simular lo que ocurre en las calles de Santiago en un laboratorio.

Los factores de emisión y su posterior análisis, permiten dar el primer paso a una serie de toma de datos que son necesarios para alimentar un inventario de emisiones que resulta primordial para gestionar de mejor manera la calidad del aire en Santiago.

Este trabajo permite obtener factores de emisión para 8 tecnologías de buses existentes en Santiago. Las distintas tecnologías y sus respectivas emisiones se pueden observar en la tabla 5.1.

Tabla 5.1: Resumen de emisiones para los buses en estudio

Contaminante		M.1.1	M.2.1	M.3.1	B2.3.1	C2.3.1	M.2.2	B2.3.2	C2.3.2
CO ₂	g/km	1000	1075	980	1664	1759	1287	1314	1666
CO	g/km	3,855	1,797	1,859	4,682	14,944	0,363	0,320	0,602
NOX	g/km	11,845	8,488	6,470	11,804	12,128	9,569	10,197	12,338
HC	g/km	0,728	0,533	0,365	0,066	0,244	0,038	0,000	0,002
MP10	g/km	0,848	0,184	0,944	0,525	0,824	0,031	0,029	0,064
Nº Partículas	Nº/km	2,9E+14	2,4E+14	1,7E+14	2,7E+14	3,3E+14	3,0E+11	1,6E+11	7,8E+11

5.2. Discusión y Conclusiones de la Metodología

La variedad de equipos y tecnologías pertenecientes al laboratorio de vehículos pesados del 3CV, permiten medir una amplia variedad de buses pertenecientes a distintas tecnologías y características de diseño. Sin embargo, existe un sesgo debido a que no se pueden ensayar vehículos con mayores niveles de emisión (vehículos muy antiguos o con mantenciones muy deficientes). La flota utilizada en el estudio corresponde a una muestra de las tecnologías que se encuentran en la ciudad de Santiago. Sin embargo, no corresponde a una flota estadísticamente representativa del parque de buses de la capital, por lo que es necesario seguir alimentando los resultados obtenidos en esta memoria, mediante otras campañas de medición.

La ciudad de Santiago presenta condiciones propias en cuanto a su parque de buses del transporte público y en cuanto a las condiciones del tráfico vehicular. Es por esto que no resulta apropiado utilizar ciclos de conducción internacionales para representar los factores de emisión de las tecnologías de buses estudiados, ya que estos ciclos representan condiciones de tráfico y conducción, relativos de sus países de origen.

5.3. Discusión y Conclusiones de los Resultados

El resultado más importante en el presente trabajo corresponde a los factores de emisión para los buses de transporte público en la Región Metropolitana. Al concluir sobre estos factores, su obtención queda determinada por variables propias de cada vehículo como son su tecnología y capacidad de pasajeros, además de variables externas como son las condiciones de circulación y su nivel de mantención.

La incorporación de tecnología no asegura por si sola la obtención de una reducción de las emisiones, sino que también es necesaria una adecuada mantención que asegure el correcto funcionamiento de los sistemas de control de emisiones.

En el caso de los buses que tienen implementado un filtro que permite superar las normas de emisiones exigidas por el Transantiago, es posible apreciar que para la gran mayoría de los contaminantes la disminución de emisiones era evidente, reduciendo de manera considerable lo emitido a la atmósfera.

Realizando un análisis de los resultados de los factores de emisión, se puede concluir que la mayor reducción en términos de emisiones corresponde a la implementación del uso de filtros más que el cambio de tecnología, ya que el uso de filtros resulta ser mucho mas efectivo

para reducir las emisiones, lo que se demuestra claramente en los resultados obtenidos.

Los factores de emisión dependen de gran manera del nivel de aceleración que experimenta el vehículo, disminuyendo su valor si se mantiene una velocidad media alta.

La comparación de emisiones utilizando un ciclo internacional resulta trascendental para darse cuenta que las emisiones son mayores en todos los contaminantes al utilizar ciclos locales, principalmente debido a que el ciclo ETC en sus 2 primeras fases es menos exigente que los ciclos Santiago lo que resulta en mayores emisiones para este último. Por otro lado el ciclo ETC se encuentra relacionado con los puntos de operación del ciclo de certificación de la norma EURO III, lo que lo hace operar en forma optimizada para esas condiciones. Sin embargo, no se puede concluir en base a los factores de emisión, debido a que el ciclo ETC no se utiliza para estos fines, sino que corresponde a un ciclo de certificación, por lo que su utilización en el cálculo de factores de emisión no resulta adecuado. Sin embargo, su utilización en este informe, corresponde a una forma de comparar diversas tecnologías de buses en Santiago utilizando un mismo ciclo de conducción.

Actualmente la ciudad de Santiago se encuentra con niveles de azufre en sus combustibles Diesel menores o iguales a 50 ppm lo que equivale a estándares internacionales. La utilización de combustibles con niveles de azufres de apenas 3 ppm o menores, no resulta en una disminución notoria de las emisiones por lo que preliminarmente no es conveniente priorizar en su disminución ya que no se demuestran resultados claros acerca de su efectividad.

Capítulo 6

Bibliografía

- [1] Lauren S. Dunlap, Vince Pellegrini, Randall Ikeda, Ray Wilson, Sylvia Stanley, and Harvey Porter. “*Chassis Dynamometer Emissions Testing Result for Diesel and Alternative-Fueled Transit Buses.*”, Los Angeles Metropolitan Transportation Authority, EEUU.
- [2] *Assessment and Reliability of Transport Emission Models and Inventory System ARTEMIS/ Heavy duty vehicle emissions / Final Report*
- [3] Vergara, Ignacio. “*Determinación Experimental de Factores de Emisión para Vehículos Livianos en la Región Metropolitana.* Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Mecánica, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, 2004.
- [4] S. Katragadda, R. Bata, W. G. Wang, M. Gautam, N. Clark, D. Lyons, and G. M. Palmer, “*A Correlation Study Between Two Heavy-Duty Vehicle Chassis Dynamometer Emissions Testing Facilities*”, West Virginia University.
- [5] EPA, Environmental Protection Agency “*Emission Standards Reference Guide for Heavy-Duty and Nonroad Engines*”, EEUU, September 2006.
- [6] M. Osses, F. Dursbeck, R. Corvalán, “*Modelo de Emisión de Contaminantes Atmosféricos Producidos por Transporte Urbano: El Caso de Santiago*”, Universidad de Chile.
- [7] D. Rojas, “*Determinación Experimental de Ciclos de Conducción*”, Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Mecánico, Universidad de Chile, Departamento de Ingeniería Civil Mecánica, 2003.

- [8] *“Constant volume sampler system for exhaust emissions measurement, SAE J1094 JUN92”.*
- [9] The Engineering Society For Advancing Mobility Land Sea Air and Space. *“Surface Vehicle Recommended Practice, SAE J1263.”*

Capítulo 7

Anexos

Anexo A

Norma Emisión Vehículos de Pasajeros

Tabla 1. Norma emisión para vehículos de pasajeros en g/km

Tecnología	Fecha	CO	HC	HC+NOx	NOx	MP
Diesel						
Euro I†	Julio 1992	2.72 (3.16)	-	0.97 (1.13)	-	0.14 (0.18)
Euro II, IDI	Enero 1996	1.0	-	0.7	-	0.08
Euro II, DI	Enero 1996 ^a	1.0	-	0.9	-	0.10
Euro III	Enero 2000	0.64	-	0.56	0.50	0.05
Euro IV	Enero 2005	0.50	-	0.30	0.25	0.025
Euro V (propuesto)	Sept. 2009	0.50	-	0.23	0.18	0.005
Euro VI (propuesto)	Sept. 2014	0.50	-	0.17	0.08	0.005

Anexo B

Flota Utilizada en el estudio

B.1. Buses que cumplen las exigencias antes del Transantiago

Tecnología						
Euro I						
Marca-Modelo Chasis						
MERCEDES BENZ OF 1318						
Potencia [HP]						
180						
Capacidad						
75 pasajeros						
Id Bus	Código	Campaña	Ciclo	Combustible	Nivel Azufre	Observaciones
LY 1419	M.1.1	2	ETC	Referencia	< 3 ppm	
			ETC	Comercial	S/M	
			CTSA	Comercial	S/M	
		3	ETC	Comercial	< 50 ppm	
			CTSA	Comercial	< 50 ppm	



Figura B.1: Bus Euro I con tecnología anterior al Transantiago

Tecnología						
Euro II						
Marca-Modelo Chasis						
MERCEDES BENZ OH-1420						
Potencia [HP]						
211						
Capacidad						
81 pasajeros						
Id Bus	Código	Campaña	Ciclo	Combustible	Nivel Azufre	Observaciones
VK 6359	M.2.1	2	ETC	Referencia	< 3 ppm	
			ETC	Comercial	41 ppm	
			CTSA	Comercial	41 ppm	
		3	ETC	Comercial	< 50 ppm	
			CTSA	Comercial	< 50 ppm	
VG 8587	M.2.1	2	ETC	Comercial	S/M	



Figura B.2: Bus Euro II con tecnología anterior al Transantiago

Tecnología						
Euro III						
Marca-Modelo Chasis						
MERCEDES BENZ OH-1115						
Potencia [HP]						
150						
Capacidad						
60 pasajeros						
Id Bus	Código	Campaña	Ciclo	Combustible	Nivel Azufre	Observaciones
YE 9703	M.3.1	2	ETC	Referencia	< 3 ppm	
			ETC	Comercial	41 ppm	
			CTSA	Comercial	41 ppm	
		3	ETC	Comercial	< 50 ppm	
			CTSA	Comercial	< 50 ppm	



Figura B.3: Bus Euro III con tecnología anterior al Transantiago

B.2. Buses que cumplen las exigencias estándar del Transantiago o Euro III

Tecnología						
Euro III Transantiago						
Marca-Modelo Chasis						
VOLVO V7						
Potencia [HP]						
260						
Capacidad						
92 pasajeros						
Id Bus	Código	Campaña	Ciclo	Combustible	Nivel Azufre	Observaciones
ZN 3238	B2.3.1	2	ETC	Referencia	< 3 ppm	
			ETC	Comercial	33 ppm	
			CTSM-2	Comercial	33 ppm	
		3	ETC	Comercial	< 50 ppm	
			CTSM-2	Comercial	< 50 ppm	
ZN 3248	B2.3.1	2	ETC	Comercial	44 ppm	



Figura B.4: Bus Euro III con tecnología estándar Transantiago


Tecnología						
Euro III Transantiago						
Marca-Modelo Chasis						
VOLVO V9						
Potencia [HP]						
340						
Capacidad						
161 pasajeros						
Id Bus	Código	Campaña	Ciclo	Combustible	Nivel Azufre	Observaciones
ZN 5800	C2.3.1	2	ETC	Referencia	< 3 ppm	Sin medición
			ETC	Comercial	36 ppm	
		CTSM-1	Comercial	36 ppm		
		3	ETC	Comercial	< 50 ppm	
			CTSM-1	Comercial	< 50 ppm	
ZN 5590	C2.3.1	2	ETC	Comercial	36 ppm	
			CTSM-1	Comercial	36 ppm	

Figura B.5: Bus Euro III con tecnología estándar Transantiago

B.3. Buses que permiten superar las exigencia estándar del Transantiago


Tecnología						
Euro II Con Filtro (C/F)						
Marca-Modelo Chasis						
MERCEDES BENZ OH-1420						
Potencia [HP]						
211						
Capacidad						
81 pasajeros						
Id Bus	Código	Campaña	Ciclo	Combustible	Nivel Azufre	Observaciones
TE 3776	M.2.2	2	ETC	Referencia	< 3 ppm	
			ETC	Comercial	42 ppm	
			CTSA	Comercial	42 ppm	
		3	ETC	Comercial	< 50 ppm	
					CTSA	

Figura B.6: Bus Euro II con tecnología superior a Transantiago

Tecnología						
Euro III Transantiago Con Filtro (C/F)						
Marca-Modelo Chasis						
VOLVO V7						
Potencia [HP]						
260						
Capacidad						
92 pasajeros						
Id Bus	Código	Campaña	Ciclo	Combustible	Nivel Azufre	Observaciones
ZN 6267	B2.3.2	2	ETC	Referencia	< 3 ppm	
			ETC	Comercial	37 ppm	
			CTSM-2	Comercial	37 ppm	
		3	ETC	Comercial	< 50 ppm	
CTSM-2	Comercial		< 50 ppm			



Figura B.7: Bus Euro III con tecnología estándar Transantiago

Tecnología						
Euro III Transantiago Con Filtro (C/F)						
Marca-Modelo Chasis						
VOLVO V9						
Potencia [HP]						
340						
Capacidad						
161 pasajeros						
Id Bus	Código	Campaña	Ciclo	Combustible	Nivel Azufre	Observaciones
ZN 6340	C2.3.2	2	ETC	Referencia	< 3 ppm	Sin medición
			ETC	Comercial	42 ppm	Sin medición
			CTSM-1	Comercial	42 ppm	Sin medición
		3	ETC	Comercial	< 50 ppm	
			CTSM-1	Comercial	< 50 ppm	



Figura B.8: Bus Euro II con tecnología superior a Transantiago

Anexo C

Fichas Resultados Coast-Down

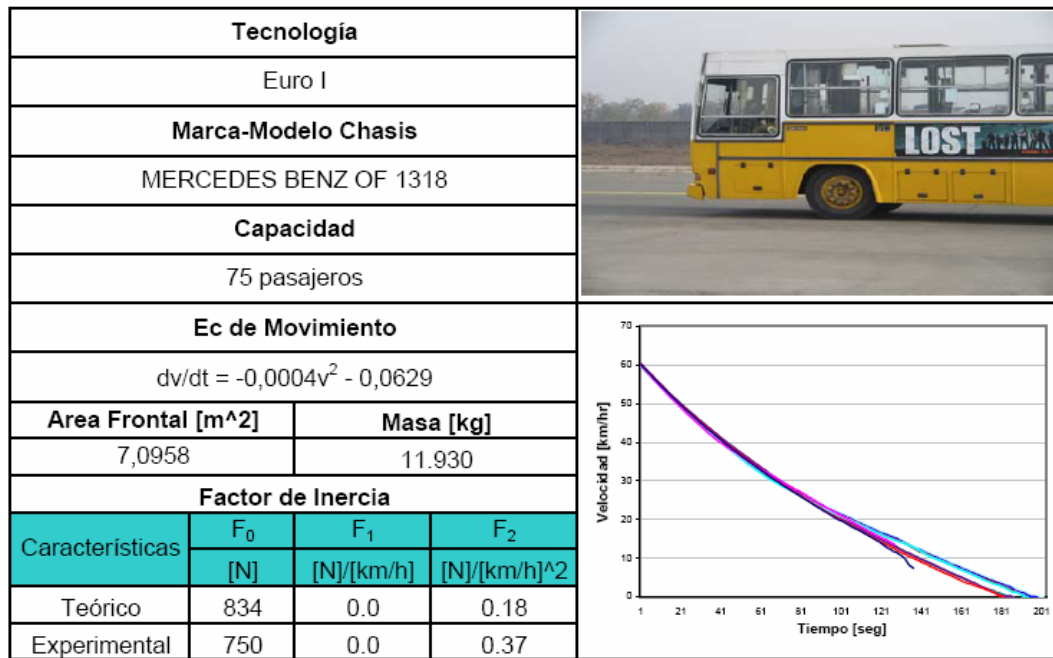


Figura C.1: Resultados teórico y experimental para el bus chasis Mercedes Benz OF 1318

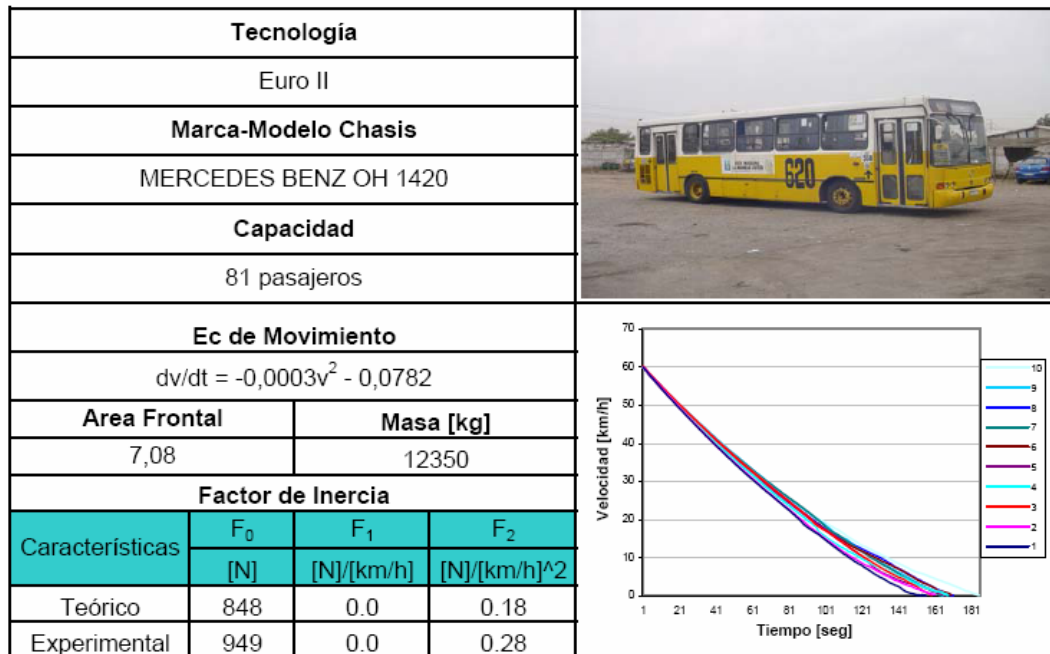


Figura C.2: Resultados teórico y experimental para el bus chasis Mercedes Benz OH 1420

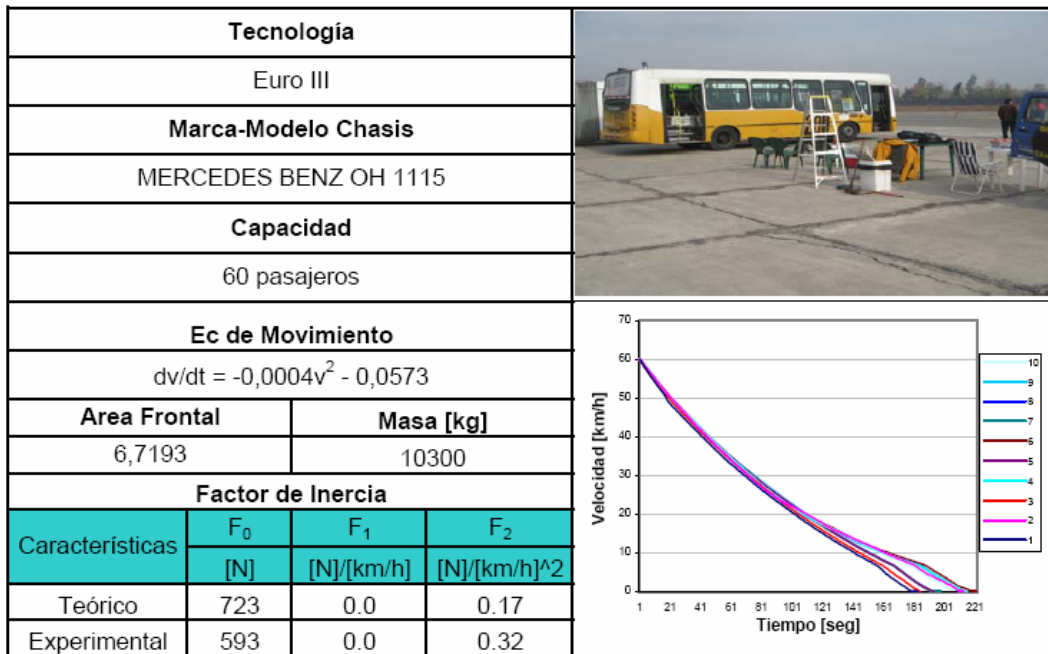


Figura C.3: Resultados teórico y experimental para el bus chasis Mercedes Benz OH 1115

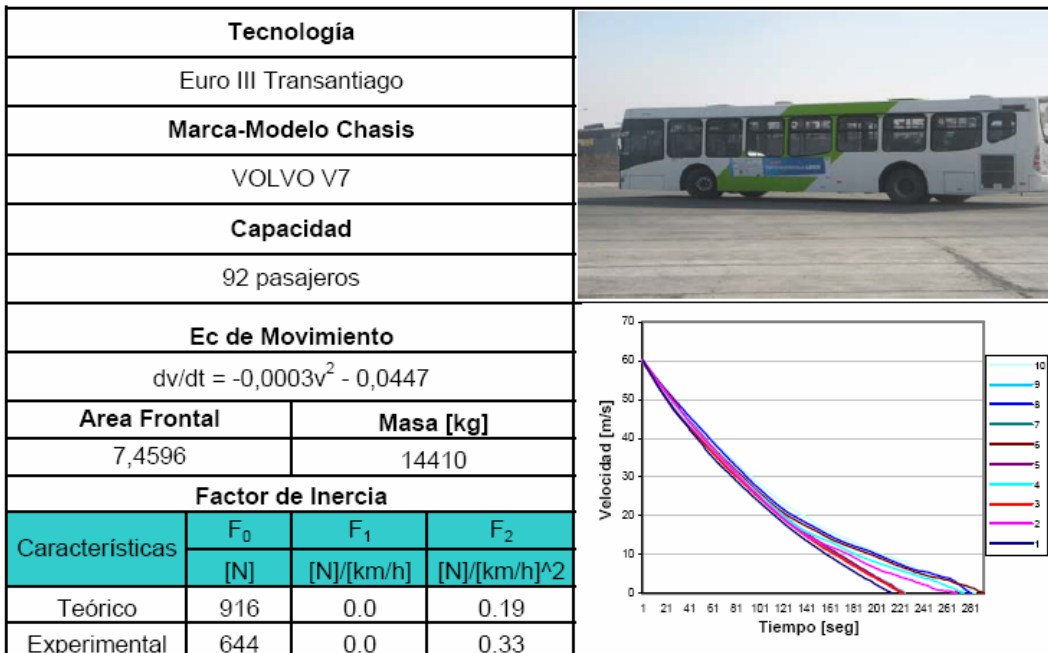


Figura C.4: Resultados teórico y experimental para el bus chasis VOLVO V7

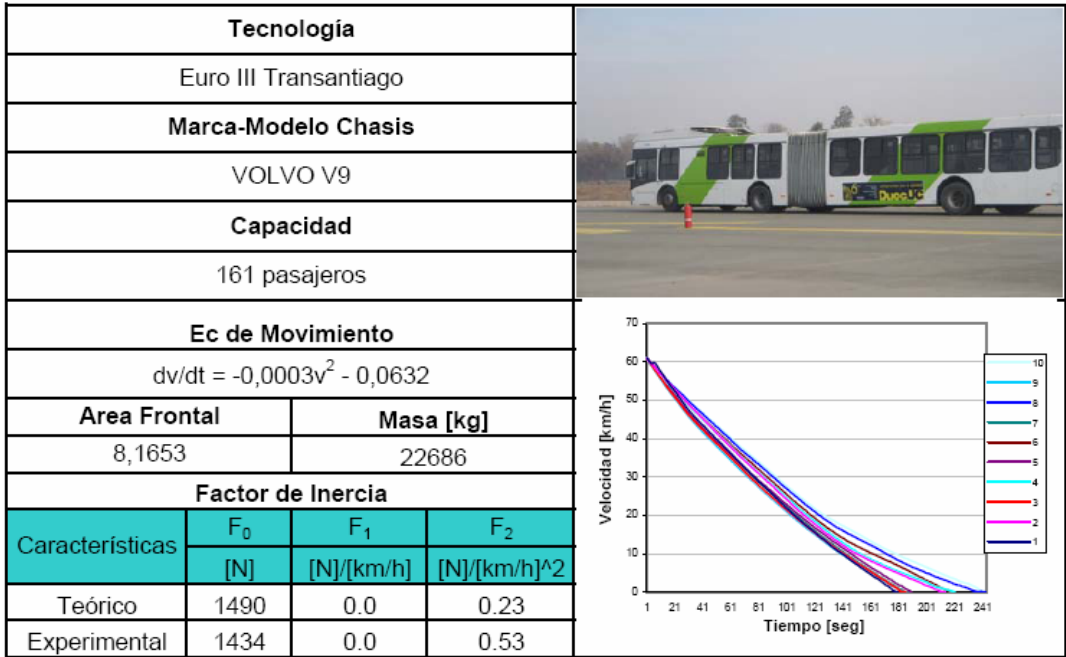


Figura C.5: Resultados teórico y experimental para el bus chasis VOLVO V9