

**RELACIÓN DE LOS CICLOS DE MANEJO DE LOS BUSES DE TRANSPORTE  
PÚBLICO CON LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO**

**SANTIAGO JOSE PLATA MUÑOZ**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES  
FACULTAD DE INGENIERÍA  
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL  
BOGOTÁ D.C.**

**2009**

**RELACIÓN DE LOS CICLOS DE MANEJO DE LOS BUSES DE TRANSPORTE  
PÚBLICO CON LAS EMISIONES DE MATERIAL PARTICULADO**

**SANTIAGO JOSE PLATA MUÑOZ**

**Proyecto de grado presentado a la Universidad de los Andes como requisito  
para obtener el título de ingeniero ambiental**

**Asesor:**

**Sergio Fernando Barrera Tapias. Msc, Ingeniería Ambiental.**

**Ingeniero Civil**

**UNIVERSIDAD DE LOS ANDES**

**FACULTAD DE INGENIERÍA**

**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**BOGOTÁ D.C.**

**2009**

CONTENIDO

**RESUMEN.....1**

**METODOLOGIA .....2**

**1. RELACION ENTRE LAS VARIABLES DINAMICAS Y LA EMISION  
VEHICULAR.....7**

**1.1 FASE DE ACELERACIONES NEGATIVAS.....8**

**1.2 FASE ESTATICA.....12**

**1.3 FASE CINEMATICA.....18**

**1.4 FASE DINAMICA.....28**

**2. EMISION VEHICULAR DEL SERVICIO PÚBLICO EN UN CICLO DE MANEJO  
TÍPICO (CONCLUSION) .....46**

**COMENTARIOS ADICIONALES.....52**

**BIBLIOGRAFIA .....54**

## RESUMEN

El objetivo de este estudio es determinar el impacto emisor en términos de PM 2.5 de los buses de servicio público colectivo en cada una de las fases de un ciclo de manejo típico de Bogotá. Con el impacto emisor de cada una de las fases y su probabilidad de ocurrencia en el ciclo de manejo típico se puede determinar la importancia de cada una de estas fases en el ciclo de manejo típico y la emisión esperada para cada una de las categorías vehiculares en el ciclo de manejo típico.

El ciclo de manejo se dividirá en 4 fases, asociadas al comportamiento del motor. Cada una de estas fases se caracteriza por un requerimiento de potencia e inyección de combustible que se asocian a las emisiones que salen por el exhaust del vehículo. En la fase de aceleraciones negativas el vehículo no requiere potencia, en la fase estática el vehículo solo necesita combustible para mantenerse encendido, en la fase cinemática la potencia requerida es para mantener la velocidad constante y en la fase dinámica hay un requerimiento de potencia para aumentar la velocidad del vehículo.

Los resultados demuestran que las fases más problemáticas son la fase de aceleraciones negativas y la fase dinámica. Los resultados también demuestran, que el ciclo de manejo típico definido por la forma de manejar de los choferes de bus bogotanos presenta muy frecuentemente la fase de aceleraciones negativas y la fase de dinámica. Por lo tanto, lo esperado es que los vehículos de servicio público colectivo en una gran franja de tiempo del ciclo de manejo típico, emitan la mayor cantidad de material particulado posible.

## METODOLOGIA

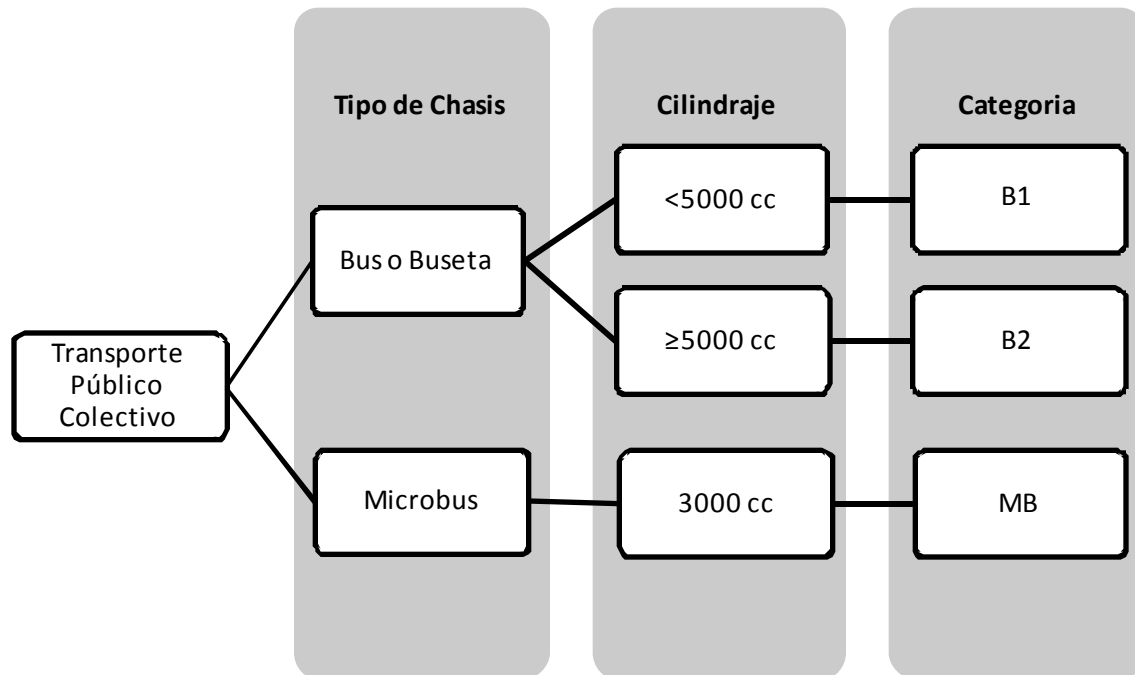
El objetivo de este estudio es determinar el impacto emisor de los buses de servicio público colectivo en cada una de las fases de un ciclo de manejo típico de Bogotá. Con el impacto emisor de cada una de las fases y su probabilidad de ocurrencia en el ciclo de manejo típico se puede determinar la importancia de cada una de estas fases en el ciclo de manejo típico y la emisión esperada para cada una de las categorías vehiculares en el ciclo de manejo típico. El ciclo de manejo se dividirá en 4 fases, asociadas al comportamiento del motor. Cada una de estas fases se caracteriza por un requerimiento de potencia e inyección de combustible que se asocian a las emisiones que salen por el exhaust del vehículo. En la fase de aceleraciones negativas el vehículo no requiere potencia, en la fase estática el vehículo solo necesita combustible para mantenerse encendido, en la fase cinemática la potencia requerida es para mantener la velocidad constante y en la fase dinámica hay un requerimiento de potencia para aumentar la velocidad del vehículo. En cada una de estas fases se determinará el impacto emisor promedio para cada categoría vehicular del servicio público colectivo. Al comparar los impactos emisivos promedio de cada una de las fases, se puede determinar las fases más problemáticas en un ciclo de manejo típico. Con la frecuencia de ocurrencia de cada una de las fases en el ciclo de manejo típico, se puede determinar que tan seguido se presentan cada una de las fases, o en otras palabras, que tan importantes son en el ciclo de manejo típico.

El ciclo de manejo típico de los buses de servicio público colectivo es caliente y abarca vías rápidas, avenidas intermedias y vías pequeñas. Por lo tanto se pueden tomar las mediciones de emisiones y velocidad instantáneas de vehículos de servicio público colectivo realizadas por Rodríguez en el 2007 en un ciclo de manejo caliente idealizado para realizar el estudio. Este ciclo de manejo partía desde la localidad de Puente Aranda y tenía vías rápidas (Avenida el Dorado),

avenidas intermedias (Cra 68, Avenida Las Américas y Calle 13) y vías pequeñas en el interior de la zona industrial de Puente Aranda. Con las emisiones y velocidades instantáneas medidas se determina la frecuencia de las fases en el ciclo de manejo típico y la emisión esperada en cada una de las fases.

Se estudiarán tres vehículos de servicio público colectivo que corresponden a las categorías vehiculares que se definen en términos del tamaño del motor y del tipo de chasis.

**Figura 1. Categorización de los buses de servicio público colectivo**



La categoría B1 consta de los buses y busetas con un cilindraje mayor a 5000 cc, la categoría B2 consta de los buses y busetas con un cilindraje menor a 5000 cc y la categoría MB consta de los microbuses que tienen en promedio un cilindraje de 3000 cc. A cada uno de estos vehículos, correspondientes a cada una de las categorías, se les determina la frecuencia de las fases en el ciclo de manejo típico y la emisión esperada en cada una de las fases con los resultados de las mediciones de emisiones y velocidad instantáneas de vehículos de servicio

público colectivo realizadas por Rodríguez en el 2007 en un ciclo de manejo caliente idealizado.

El contaminante a estudiar es el PM 2.5. Este contaminante es producido, en el caso de las fuentes móviles, mayoritariamente por los vehículos que utilizan ACPM como combustible. Por lo tanto, no es descabellado estudiar las emisiones del PM 2.5 en un ciclo de manejo típico de los buses de servicio público que utilizan como combustible el ACPM.

El material particulado emitido por los vehículos de servicio público colectivo define su impacto en términos de su distribución de tamaños y de sus propiedades fisicoquímicas.

**Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas del PM 2.5**

<b>Proporción Masica de Fracciones Particulares</b>	
PM 2.5	78.41%
<b>Proporción Masica de Carbon PM 2.5</b>	
Organico	80%
Elemental (Hollin)	20%
<b>Metales (Peso Metal/Peso PM2.5)</b>	
Fe	2.07%
Cd	$1.31 \times 10^{-4}\%$
Mn	$4.22 \times 10^{-3}\%$
Pb	0.12%
Cr	$2.55 \times 10^{-4}\%$
Cu	$6.28 \times 10^{-4}\%$

Fuente: Elaboración Propia con los datos de Espinosa<sup>1</sup> y Ruiz<sup>2</sup>

La fracción de PM 2.5 representa casi el 80% del material particulado total emitido por los vehículos de servicio público colectivo. Se puede decir que su proporción másica es mucho mayor que la del material particulado grueso y mucho mayor

<sup>1</sup> ESPINOSA, Mónica. Caracterización del Material Particulado en Vías de Transporte Público Colectivo y Masivo en Bogotá. Bogotá: Universidad de los Andes, 2005.

<sup>2</sup> RUIZ, Cristhian. Caracterización del Material Particulado en las Principales Vías de Transporte Público Colectivo y Masivo del Centro de Bogotá. Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.

que la del material particulado respirable de tamaño mayor a 2.5  $\mu\text{m}$ . Por lo tanto, se puede concluir que las emisiones de material particulado de un vehículo de transporte público colectivo son en su mayoría PM 2.5. Si las emisiones de material particulado de un vehículo de transporte público colectivo son en su mayoría PM 2.5, la descripción del impacto emisor de los vehículos de servicio público en un ciclo de manejo típico en términos de este contaminante cubre aproximadamente el impacto emisor del material particulado total emitido por el exhaust de los vehículos de servicio público colectivo en un ciclo de manejo típico.

La mayoría del carbón que compone al PM 2.5 es orgánico. Este 80% de carbón orgánico proviene del carbón estructural del ACPM y aceite lubricante inquemados. El otro 20% corresponde a cenizas de carbón elemental que estaba en el ACPM. La alta proporción másica de carbón orgánico presente en la estructura de PM 2.5 demuestra que este contaminante se emite cuando los motores de los vehículos de servicio de transporte público colectivo trabajan con mezclas ricas de aire-combustible. Entre más rica es la mezcla aire-combustible, más combustible se tiene en la cámara de combustión. Entre más combustible hay en la cámara de combustión más difícil es quemarlo todo en un ciclo de Otto. El combustible que no se alcanza a quemar sale por el exhaust del vehículo en forma de PM 2.5. Por lo tanto las emisiones de PM 2.5 de los vehículos de servicio público colectivo en un ciclo de manejo típico corresponden en su mayoría a combustible y aceite lubricante inquemados.

Finalmente, estas partículas finas (PM 2.5) pueden atravesar todos los mecanismos de remoción de los pulmones hasta llegar a la fase alveolar. En esta fase los metales provenientes de las impurezas minerales del ACPM y del desgaste de la fase cilindro-pistón presentes en el PM 2.5 entran en contacto directo con los tejidos. Cuando la exposición de una persona a estas partículas finas es muy alta, el contacto entre los metales y los tejidos es extremo. Cuando se presenta este contacto extremo los metales logran irritar y alterar los tejidos. Esta irritación y alteración de los tejidos se ve reflejada en enfermedades respiratoria, asma agravado, bronquitis, bronquitis crónica y enfisema.



Este contaminante en el caso bogotano se acumula en la atmosfera con facilidad hasta llegar a concentraciones que exceden los límites exigidos por la normatividad. “Los valores más altos de contaminación en los días más problemáticos se presentan en las localidades de Kennedy, Puente Aranda y Fontibón. Valores más bajos, pero igualmente problemáticos se registran en las localidades de Tunjuelito, Rafael Uribe, Antonio Nariño y Suba”<sup>3</sup>. En estas localidades se exceden los límites exigidos por la normatividad por la magnitud de las emisiones de material particulado de las industrias y los vehículos de motor DIESEL y por las propiedades meteorológicas de Bogotá. Por lo tanto describir el impacto emisor en términos de material particulado de los vehículos de servicio público colectivo en cada una de las fases y la frecuencia de ocurrencia de estas fases en un ciclo de manejo típico puede definir las fases más problemáticas del ciclo de manejo típico de estos vehículos y en las que toca buscar soluciones para disminuir el impacto emisor en la ciudad de los buses de servicio público colectivo.

---

<sup>3</sup> COLOMBIA. SECRETARIA DISTRITAL DE AMBIENTE. Informe anual de calidad del aire de Bogotá. Bogotá: Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá. 2007.

## 1. RELACION ENTRE LAS VARIABLES DINAMICAS Y LA EMISION VEHICULAR

Las variables dinámicas son la velocidad y la aceleración. Este par de variables definen la potencia que debe producir el motor DIESEL en un instante dado. Entre mayor sea la potencia requerida mayor será la inyección de combustible requerida. Si la inyección de combustible es muy rica, la mezcla de aire combustible es rica y se aumenta la emisión de hidrocarburos inquemados (Material Particulado). Los hidrocarburos inquemados son carbón seco, sulfatos orgánicos, aceite lubricante y combustible que no se alcanzan a quemar en el ciclo Otto. En el caso en que la inyección de combustible es muy pobre hay exceso de oxígeno que reacciona con los compuestos presentes en la cámara de combustión y se aumenta la emisión de los gases CO, NO<sub>x</sub> y SO<sub>x</sub>. Por lo tanto, la calidad de la emisión que sale por el exhaust de un vehículo potenciado con un motor DIESEL depende de la velocidad y de la aceleración instantánea del vehículo.

En este estudio se propone analizar la relación entre las variables dinámicas y la emisión vehicular en 4 fases en las que puede estar el motor DIESEL de un vehículo de Transporte Público Colectivo. En la primera fase, **ACELERACIONES NEGATIVAS**, el vehículo está frenando y el motor no está transmitiendo potencia alguna al cigüeñal. Sin embargo la transmisión hace que el motor siga el movimiento rotacional que tengan los ejes. En la segunda fase, **ESTATICA**, la velocidad y aceleración son 0 y el movimiento del motor es el mínimo para mantener el vehículo encendido. En la tercera fase, **CINEMATICA**, la aceleración es 0 y la velocidad angular del motor se define en términos de la velocidad de crucero del vehículo. Finalmente, en la cuarta fase, **DINAMICA**, el vehículo se está acelerando y el funcionamiento del motor está definido en términos de la potencia requerida por la velocidad de crucero y la aceleración. En cada una de las 4 fases

la emisión vehicular estará definida por el comportamiento del motor que depende de la relación entre las variables dinámicas.

## **1.1 FASE DE ACELERACIONES NEGATIVAS**

En esta fase se espera que la emisión instantánea del vehículo sea proporcional a la emisión instantánea del instante anterior. Esto se debe principalmente a que el vehículo está frenando y el motor sigue el movimiento rotacional que tienen los ejes. El movimiento rotacional de los ejes define la velocidad angular del motor que determina la cantidad de combustible a inyectar. Si en el instante anterior se había inyectado mucho combustible, los ejes tenían una alta velocidad y se había emitido altas cantidades de material particulado, se espera que los ejes tengan una alta velocidad actual y la emisión actual sea alta. Si por el contrario, en el instante anterior se había inyectado poco combustible, los ejes tenían una baja velocidad y se había emitido bajas cantidad de material particulado, se espera que los ejes tengan una baja velocidad actual y la emisión actual sea baja. Por lo tanto, se espera que las emisiones actuales sean muy parecidas a las del instante anterior.

Figura 1.1. Emisión (t) Vs Emisión (t-1) B1. Fase Frenado

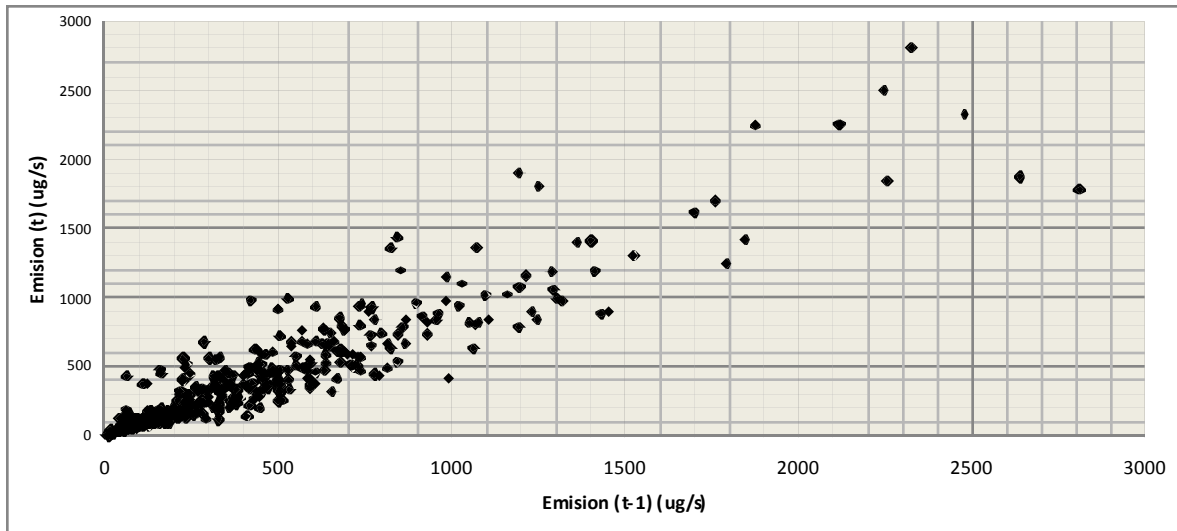


Figura 1.2. Emisión (t) Vs Emisión (t-1) B2. Fase Frenado

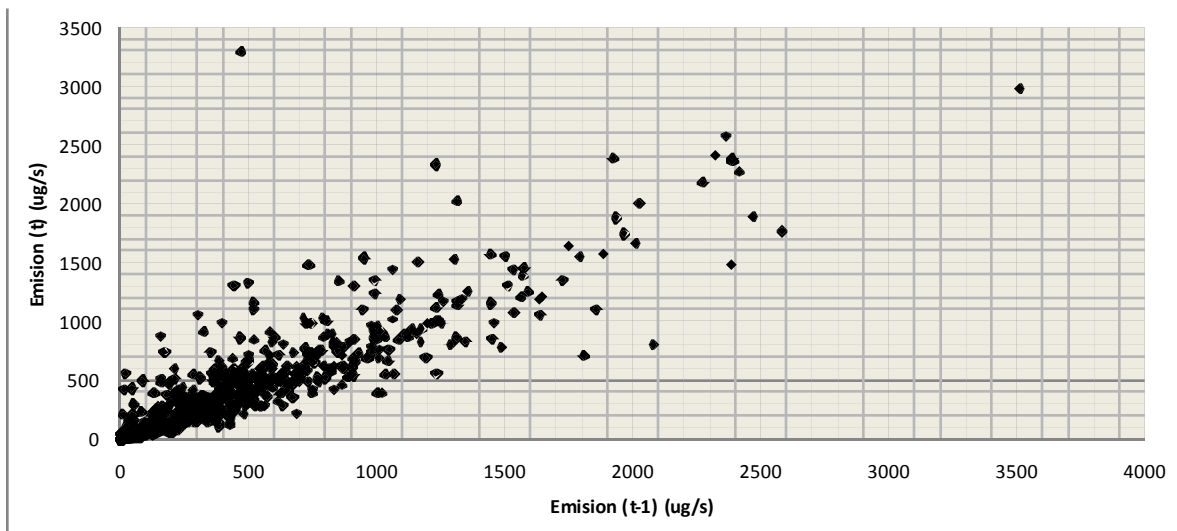
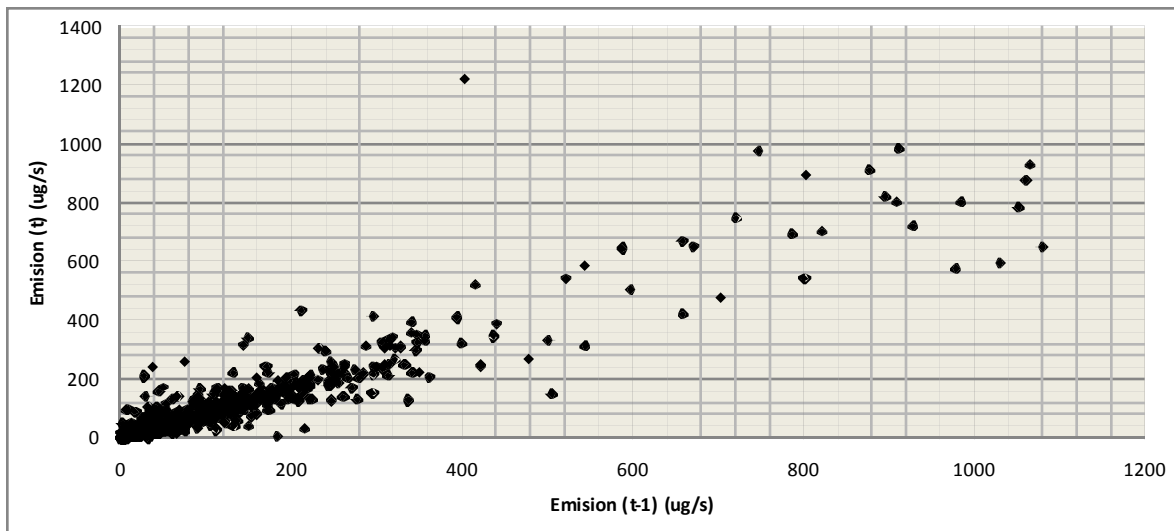


Figura 1.3. Emisión (t) Vs Emisión (t-1) MB. Fase Frenado



Las emisiones instantáneas son menores en promedio a las emisiones del instante anterior. Las funciones de correlación entre las emisiones instantáneas y del instante anterior obtenidas al hacer una regresión lineal lo demuestran.

La función para la categoría B1 es:

$$E(t) = 0.8934E(t-1) + 25.399$$

$$R^2 = 0.8684$$

La función para la categoría B2 es:

$$E(t) = 0.8345E(t-1) + 51.184$$

$$R^2 = 0.7686$$

La función para la categoría MB es:

$$E(t) = 0.8357E(t-1) + 7.7991$$

$$R^2 = 0.8545$$

Donde las variables correspondientes son:

E (t): Emisión instantánea en el segundo t en  $\mu\text{g/s}$ .

E (t-1): Emisión instantánea en el segundo t en  $\mu\text{g/s}$ .

En todos los casos la emisión instantánea es en promedio del 80 al 90% de la emisión del instante anterior. Esto se debe principalmente a que el motor no está transmitiendo potencia y se alimenta con mezclas pobres para mantenerse encendido.

Parece ser que hay una emisión base por parte de los vehículos del Transporte Público Colectivo. Esta emisión base es de 25.399  $\mu\text{g/s}$  para buses y busetas con un cilindraje menor de 5000 cc, 51.184  $\mu\text{g/s}$  para buses y busetas con un cilindraje mayor a 5000 cc, 7.7991  $\mu\text{g/s}$  para microbuses con un cilindraje promedio de 3000 cc. Lo que indica que la emisión base está relacionado con el tamaño del motor. Entre más grande sea el motor, mayor será la cantidad de combustible necesaria para mantenerse encendido y por ende mayor será la emisión de hidrocarburos inquemados emitidos.

Finalmente, se puede decir que entre más grande sea la emisión del instante anterior, mayor será la emisión instantánea. En el caso más crítico para la categoría B1 se emite 2800  $\mu\text{g/s}$ , para la categoría B2 se emite 3300  $\mu\text{g/s}$  y para la categoría MB se emite 1200  $\mu\text{g/s}$ . El incremento en la emisión base es proporcional al tamaño del motor y depende de la cantidad de combustible que se haya consumido en el instante anterior. Esto indica que las mayores emisiones instantáneas en una fase de frenado en un ciclo de manejo típico se presentan después de un evento de alta potencia.

Sin embargo, en un ciclo de manejo típico la mayoría de los datos de emisión en la fase de frenado se encuentran muy por debajo del caso más crítico. El paquete de puntos que se presenta en cada una de las graficas muestra que la probabilidad de ocurrencia de eventos con emisiones menores al caso más crítico es muy alta.

Como resultado se obtiene que el valor esperado de emisiones para B1 sea 390.5  $\mu\text{g/s}$ , para B2 sea 450.2  $\mu\text{g/s}$  y para MB sea 106.3  $\mu\text{g/s}$ . Estas emisiones esperadas son mucho más bajas que las emisiones en los casos más críticos. En la categoría B1 la emisión esperada es 7 veces menor que el caso más crítico, en la categoría B2 la emisión esperada es 7 veces menor que el caso más crítico y en la categoría MB la emisión esperada es 11 veces menor que el caso más crítico. Esto lleva a concluir que las emisiones promedio o esperadas en la fase de frenado en un ciclo de manejo típico son proporcionales al tamaño del motor y presentan una varianza muy alta en el caso más crítico.

## **1.2 FASE ESTÁTICA**

En esta fase tanto la velocidad como la aceleración son 0 y el motor no está agarrado a la transmisión. El motor utiliza el combustible que sobra en los inyectores de las fases pasadas y succiona aire del filtro de aire a una tasa proporcional a su velocidad angular de rotación. Por lo tanto el consumo de combustible es mínimo y pretende mantener el motor encendido.

Se espera que en esta fase la emisión instantánea del vehículo sea constante y única en un ciclo de manejo típico para cada una de las categorías. La emisión estática de cada una de las categorías debe ser proporcional al consumo mínimo constante de gasolina. Entre más grande sea el motor, mayor será el consumo de gasolina para mantener encendido el vehículo. Por lo tanto, se espera que las emisiones estáticas de la categoría B2 que se caracteriza por tener un motor de tamaño mayor a 5000 cc sean mayores que las emisiones estáticas de las categorías B1 y MB que se caracterizan por tener un motor de tamaño menor a 5000 cc y un motor de tamaño promedio de 3000 cc, respectivamente. Entonces una gráfica de las emisiones instantáneas promedio de cada categoría en los

tiempos en los que los vehículos están estacionados en el ciclo de manejo típico puede definir el comportamiento de las emisiones en la fase estática para cada una de las categorías vehiculares.

**Figura 1.4. Emisión (t) Vs Tiempo de recorrido B1. Fase Estática**

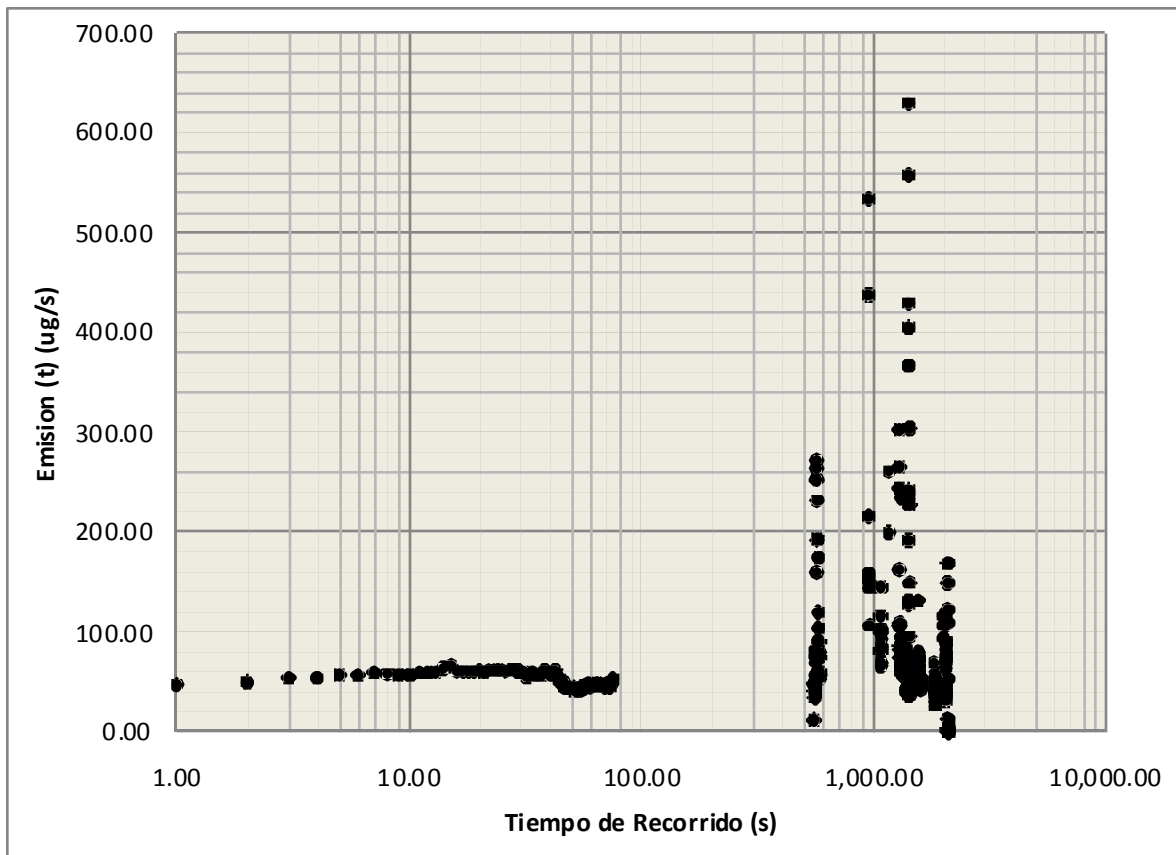




Figura 1.5. Emisión (t) Vs Tiempo de recorrido B2. Fase Estática

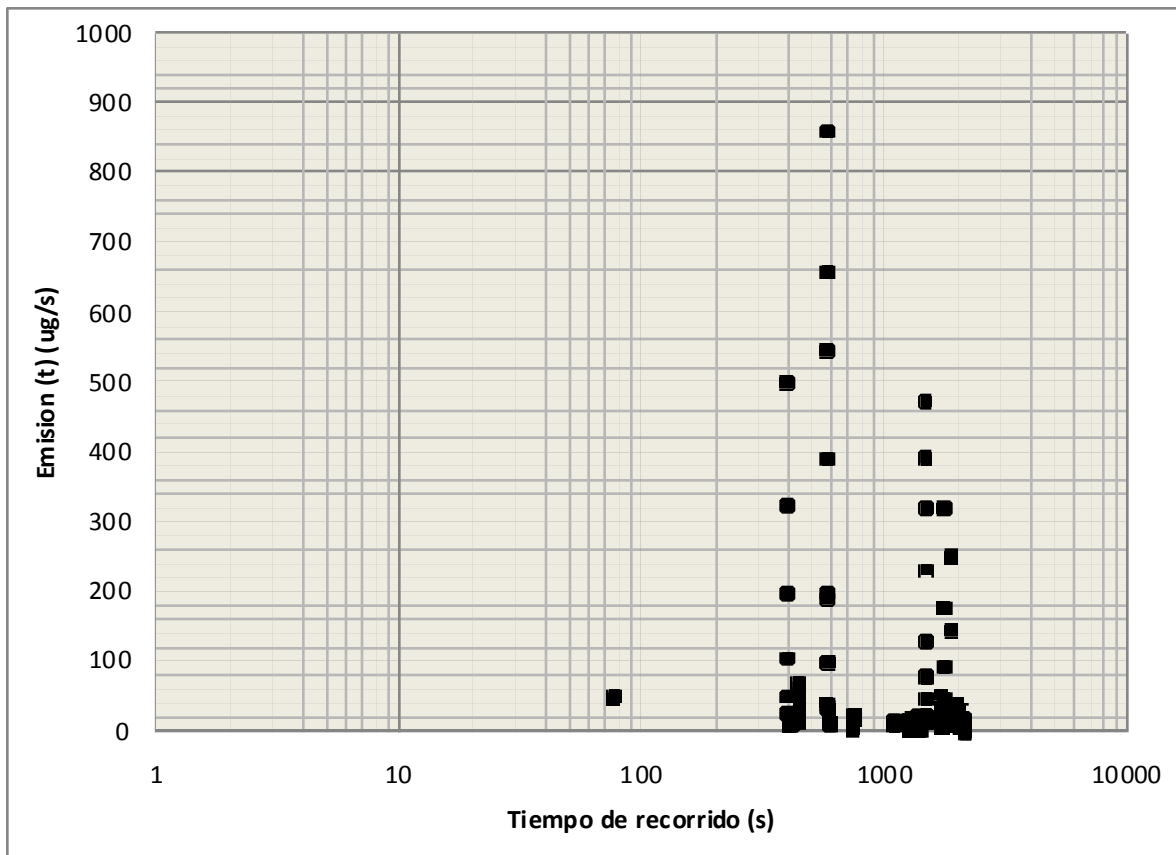
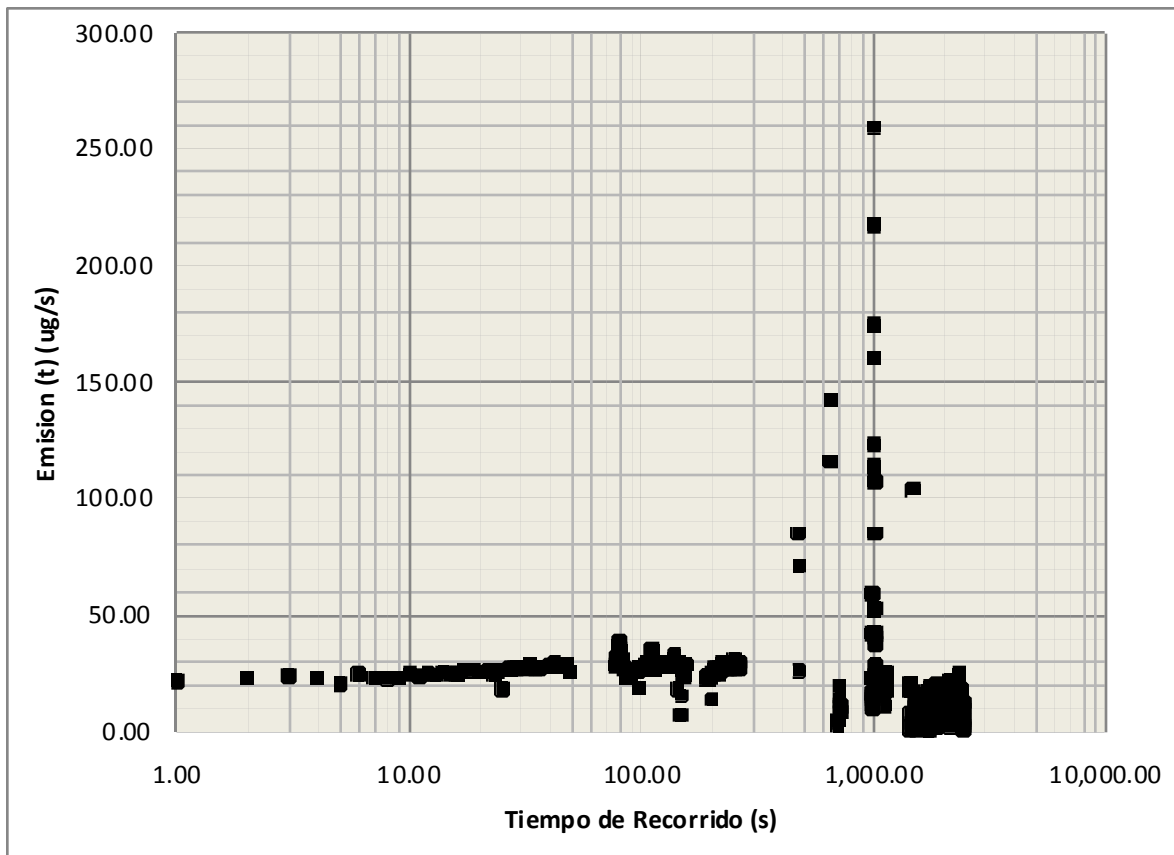


Figura 1.6. Emisión (t) Vs Tiempo de recorrido MB. Fase Estática



En la primera franja temporal del ciclo de manejo típico se observa una emisión promedio constante en cada una de las categorías vehiculares del Servicio Público Colectivo. Los instantes temporales en los que un vehículo de la categoría B1 se encuentre en estado estático y ocurren antes de 100 segundos de recorrido presentan una emisión promedio de 54.16  $\mu\text{g/s}$ , los instantes temporales en los que un vehículo de la categoría B2 se encuentre en estado estático y ocurren antes de 100 segundos de recorrido presentan una emisión promedio de 48.32  $\mu\text{g/s}$  y los instantes temporales en los que un vehículo de la categoría MB se encuentre en estado estático y ocurren antes de 800 segundos de recorrido presentan una emisión promedio de 27.39  $\mu\text{g/s}$ . Por lo tanto en esta franja temporal los vehículos emiten de forma proporcional al combustible mínimo consumido para mantener el vehículo encendido.

Las emisiones promedio presentadas en la primera franja temporal del ciclo de manejo típico por cada una de las categorías vehiculares del Servicio Público Colectivo no solo dependen del tamaño del motor. La falta de mantenimiento del motor de los vehículos lleva a que pase aceite refrigerante a la cámara de combustión, lleva a que el aire y el combustible entren sucios a la cámara de combustión y finalmente lleva a que partículas producidas en el desgaste de la fase pistón-cilindro entren a la cámara de combustión. Por lo tanto, la falta de mantenimiento en la categoría B1 permite que su vehículo emita en promedio mayor cantidad de material particulado en la primera franja del ciclo temporal que el vehículo de la categoría B2, que debería emitir más por el consumo de gasolina asociado al tamaño de su motor.

En la segunda franja temporal del ciclo de manejo típico se observa un comportamiento variable en las emisiones estáticas instantáneas de cada una de las categorías vehiculares del Servicio Público Colectivo. Este comportamiento variable en la emisión se asocia a la cantidad de combustible que hay en la cámara de combustión en cada instante. Entre mayor sea la cantidad de combustible en la cámara, mayor será la emisión. La cantidad de combustible instantánea en la cámara de combustión varía en función de los residuos de combustible que quedan del ciclo de Otto del instante anterior. En la categoría B1 la segunda franja temporal del ciclo de manejo típico empieza en el segundo 100 de recorrido y termina en el segundo 2099, tiene una duración de 1999 segundos y presenta una emisión promedio de 85.11  $\mu\text{g/s}$ , en la categoría B2 la segunda franja temporal del ciclo de manejo típico empieza en el segundo 100 de recorrido y termina en el segundo 2162, tiene una duración de 2062 segundos y presenta una emisión promedio de 33.56  $\mu\text{g/s}$  y en la categoría MB la segunda franja temporal del ciclo de manejo típico empieza en el segundo 800 de recorrido y termina en el segundo 2447, tiene una duración de 1647 segundos y presenta una emisión promedio de 17.82  $\mu\text{g/s}$ . Al igual que en la primera franja temporal del ciclo de manejo típico el vehículo de la categoría B1 emite mayor cantidad de

material particulado que la categoría B2 y MB, en contradicción del tamaño de su motor, por su falta de mantenimiento.

La emisión esperada de un vehículo de Transporte Público Colectivo en la fase estacionaria en un ciclo de manejo típico depende de la distribución de las franjas temporales. La duración de cada una de las franjas temporales define el peso que tiene la emisión promedio en cada una de las franjas temporales sobre la emisión estática esperada en un ciclo de manejo típico. En la categoría B1 la primera franja temporal dura 100 segundos y presenta una emisión promedio de 54.16  $\mu\text{g/s}$ ; la segunda franja temporal dura 1999 segundos y presenta una emisión promedio de 85.11  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto se espera que la emisión promedio en la fase estática de un ciclo de manejo típico para la categoría B1 sea de 83.6  $\mu\text{g/s}$ . En la categoría B2 la primera franja temporal dura 100 segundos y presenta una emisión promedio de 48.32  $\mu\text{g/s}$ ; la segunda franja temporal dura 2062 segundos y presenta una emisión promedio de 33.56  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto se espera que la emisión promedio en la fase estática de un ciclo de manejo típico para la categoría B2 sea de 34.2  $\mu\text{g/s}$ . Finalmente en la categoría MB la primera franja temporal dura 800 segundos y presenta una emisión promedio de 27.39  $\mu\text{g/s}$ ; la segunda franja temporal dura 1647 segundos y presenta una emisión promedio de 17.82  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto se espera que la emisión promedio en la fase estática de un ciclo de manejo típico para la categoría MB sea de 20.9  $\mu\text{g/s}$ . Lo esperado es que en la fase estática el vehículo de la categoría B1 emita en promedio aproximadamente 2 veces más que el vehículo de la categoría B2 y 3 veces más que el vehículo de la categoría MB por su falta de mantenimiento.

Si se comparan las emisiones esperadas de la fase de aceleraciones negativas y las emisiones esperadas de la fase estática, se puede determinar en cual fase se espera que se emita más en un ciclo de manejo típico. En la categoría B1 se espera que en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico la

emisión promedio sea de 390.5  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase estática en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 83.6  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría B1 se espera que el impacto emisor sea 5 veces mayor en la fase de aceleraciones negativas que en la fase estática en un ciclo de manejo típico. En la categoría B2 se espera que en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 450.2  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase estática en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 34.2  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría B2 se espera que el impacto emisor sea 13 veces mayor en la fase de aceleraciones negativas que en la fase estática en un ciclo de manejo típico. Finalmente, en la categoría MB se espera que en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 106.3  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase estática en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 20.9  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría MB se espera que el impacto emisor sea 5 veces mayor en la fase de aceleraciones negativas que en la fase estática en un ciclo de manejo típico. Esto quiere decir, que en un ciclo de manejo típico de los buses de servicio público colectivo se espera que la fase de aceleraciones negativas tenga un impacto mayor que en la fase estática.

### **1.3 FASE CINEMATICA**

En esta fase las emisiones instantáneas se definen en términos de la potencia requerida por el vehículo y en términos de la cantidad de combustible que se esté inyectando a la cámara de combustión con el pedal del acelerador. La potencia instantánea demandada por la transmisión hacia el motor está definida por la velocidad espacial instantánea. Para suplir esta potencia el motor debe ejercer un torque que está definido por el grado de agarre de la transmisión y de que tan presionado este el pedal del acelerador. Si la potencia requerida por la transmisión y el torque son muy grandes, el motor se tiene que esforzar más y debe consumir

más combustible. Es claro que entre mayor sea el consumo de combustible, mayor será la emisión.

El comportamiento de las emisiones de los vehículos de Servicio Público Colectivo en la fase cinemática de un ciclo de manejo típico se puede estudiar por medio de unas graficas de emisión instantánea Vs velocidad instantánea. Dado que la velocidad instantánea puede tomar cualquier valor, se utilizan intervalos discretos de velocidad, con un tamaño de 5 Km/h para facilitar el análisis. En estos intervalos se saca el promedio de la emisión instantánea vehicular con las emisiones instantáneas correspondientes a las velocidades comprendidas en el intervalo. Los intervalos de velocidad con la mayor emisión promedio requieren una mayor potencia y una mayor cantidad de combustible inyectado a la cámara de combustión con el pedal del acelerador.

Figura 1.7. Emisión Promedio Vs Velocidad B1. Fase Cinemática

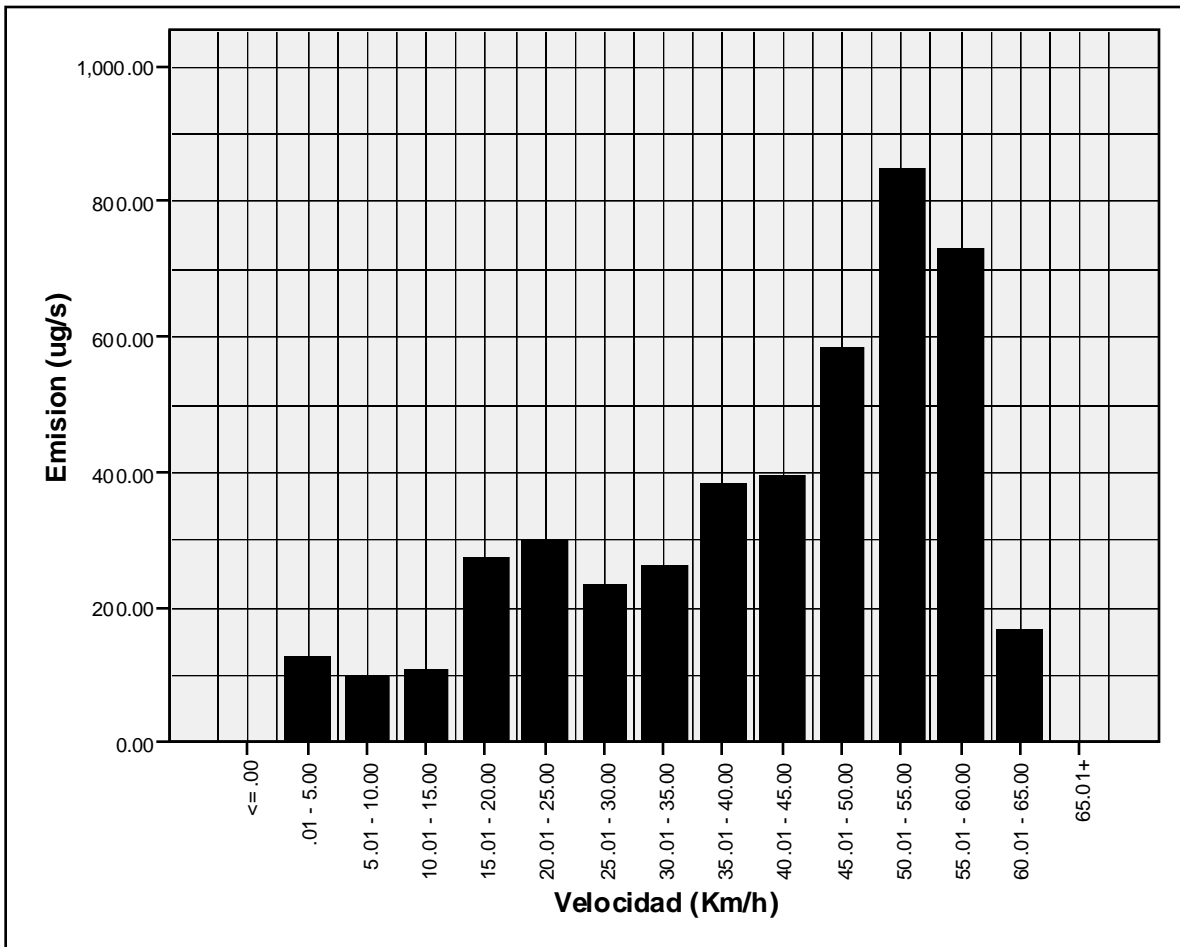


Figura 1.8. Emisión Promedio Vs Velocidad B2. Fase Cinemática

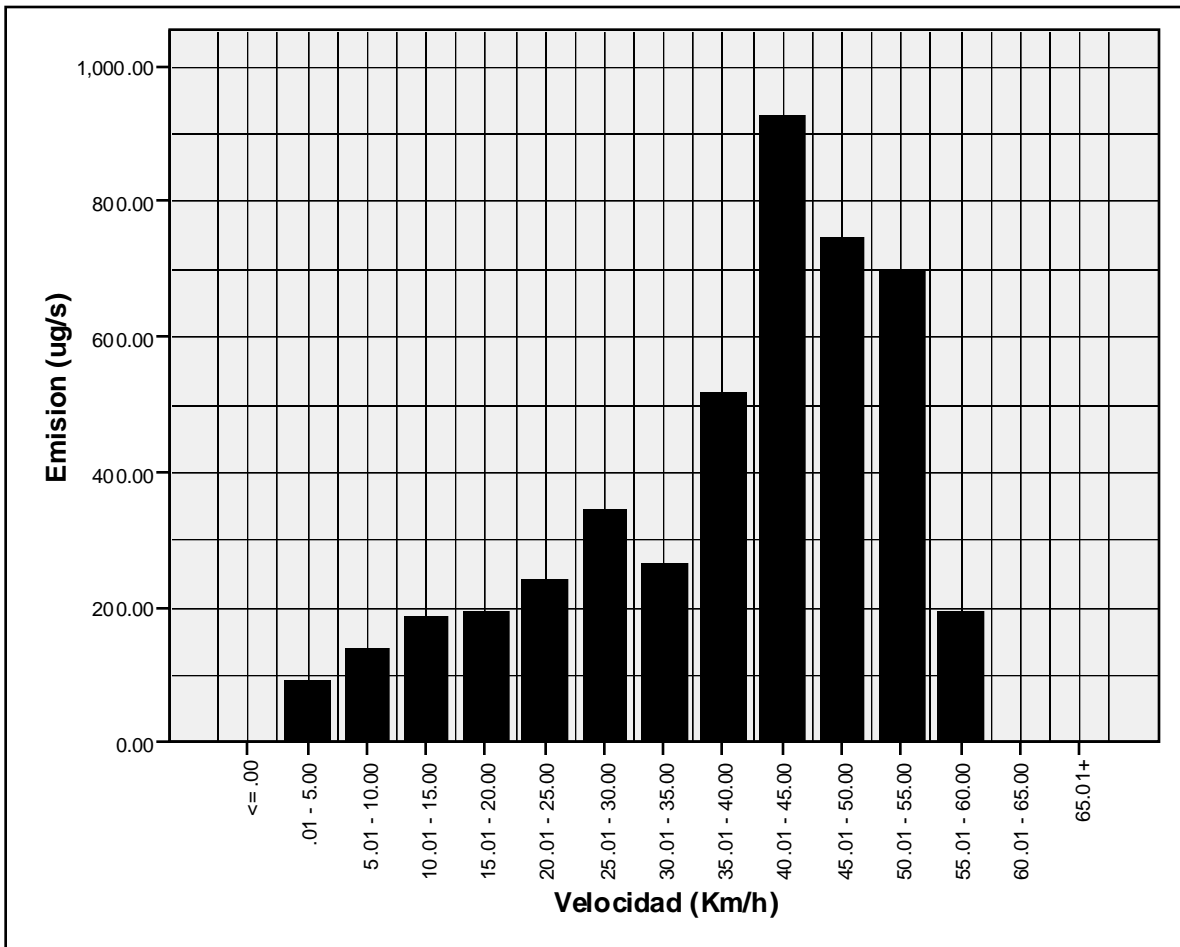
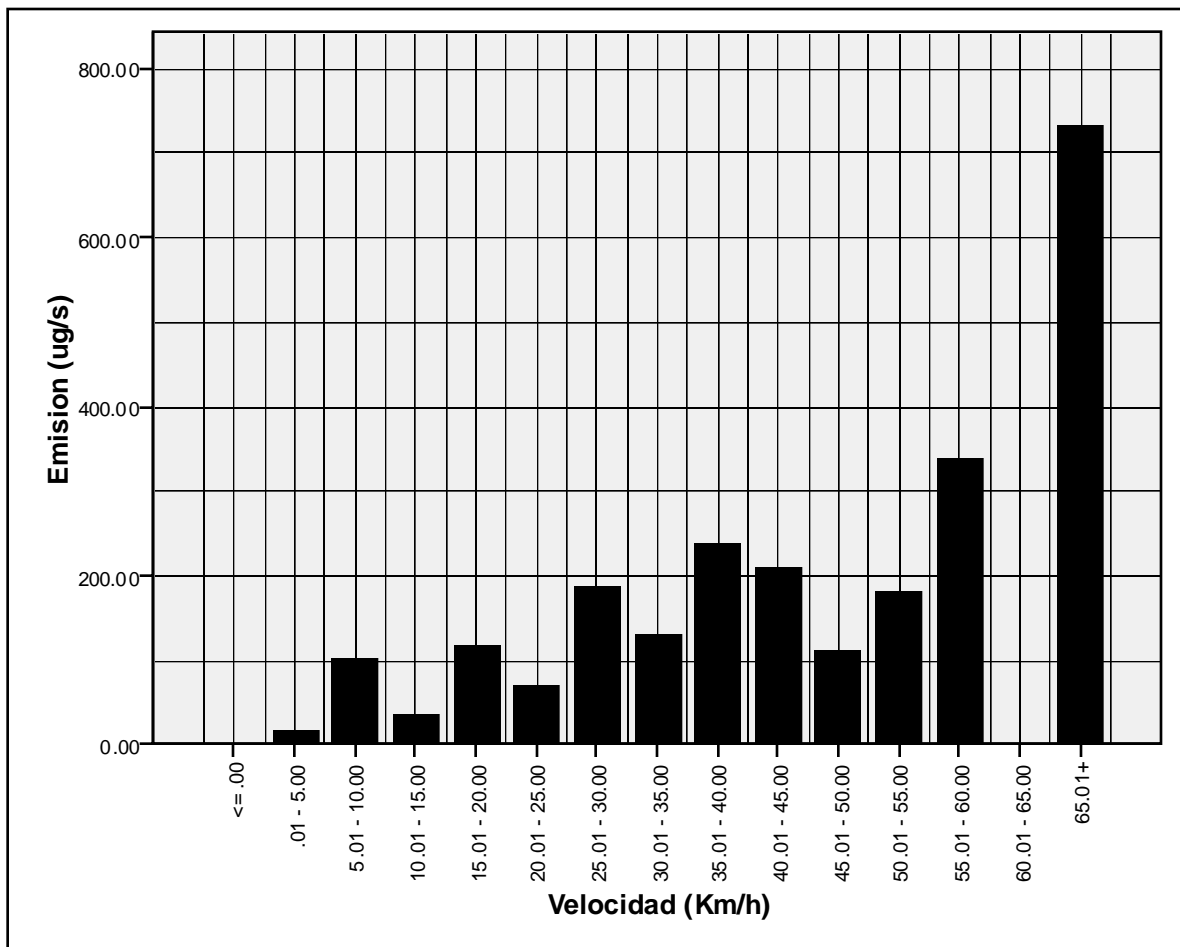




Figura 1.9. Emisión Promedio Vs Velocidad MB. Fase Cinemática



La emisión promedio aumenta a medida que aumenta la velocidad espacial en la primera franja de velocidades de un ciclo típico de manejo de los vehículos de servicio público en la fase cinemática. En la categoría B1 a una velocidad promedio de 2.5 Km/h se emite en promedio 100  $\mu\text{g/s}$  y a una velocidad promedio de 47.5 Km/h se emite en promedio 600  $\mu\text{g/s}$ . Esto indica que en un cambio de velocidad promedio de 45 Km/h en la categoría B1 genera un cambio en la emisión promedio de 500  $\mu\text{g/s}$  en la misma categoría. Se puede decir que en la primera franja de velocidades en la fase cinemática de un ciclo típico de manejo de un vehículo de la categoría B1 la tasa de cambio promedio de la emisión promedio con respecto a la velocidad promedio es de 11.1 ( $\mu\text{g/s}$ )/ Km/h. En la categoría B2 a una velocidad promedio de 2.5 Km/h se emite en promedio 100  $\mu\text{g/s}$  y a una velocidad promedio de 37.5 Km/h se emite en promedio 500  $\mu\text{g/s}$ .

Esto indica que en un cambio de velocidad promedio de 35 Km/h en la categoría B2 genera un cambio en la emisión promedio de 400  $\mu\text{g/s}$  en la misma categoría. Se puede decir que en la primera franja de velocidades en la fase cinemática de un ciclo típico de manejo de un vehículo de la categoría B2 la tasa de cambio promedio de la emisión promedio con respecto a la velocidad promedio es de 11.4 ( $\mu\text{g/s}$ )/ Km/h. Finalmente en la categoría MB a una velocidad promedio de 2.5 Km/h se emite en promedio 10  $\mu\text{g/s}$  y a una velocidad promedio de 57.5 Km/h se emite en promedio 350  $\mu\text{g/s}$ . Esto indica que en un cambio de velocidad promedio de 55 Km/h en la categoría MB genera un cambio en la emisión promedio de 340  $\mu\text{g/s}$  en la misma categoría. Se puede decir que en la primera franja de velocidades en la fase cinemática de un ciclo típico de manejo de un vehículo de la categoría MB la tasa de cambio promedio de la emisión promedio con respecto a la velocidad promedio es de 6.2 ( $\mu\text{g/s}$ )/ Km/h. El cambio de las emisiones instantáneas promedio en términos del cambio de velocidad es mayor para la categoría B2 que tiene vehículos con motores de cilindraje mayor a 5000 cc, seguido por la categoría B1 que tiene vehículos con motores de cilindraje menor a 5000 cc y finalmente por la categoría MB que tiene vehículos con motores de cilindraje promedio de 3000 cc. Esto se debe principalmente a que el consumo de gasolina de un vehículo no solo se define en términos de la potencia requerida definida por la velocidad espacial promedio, sino que también se define por el tamaño de su motor. Entre mayor sea el tamaño del motor, mayor será el consumo en cada uno de los intervalos de velocidad y por lo tanto será mayor la emisión promedio. Cabe resaltar que estas tasas de cambio casi constantes demuestran que en esta primera franja de velocidades la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador son proporcionales a la velocidad espacial promedio.

La emisión promedio es máxima en la segunda franja de velocidades de un ciclo típico de manejo de los vehículos de servicio público en la fase cinemática. En esta franja la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que

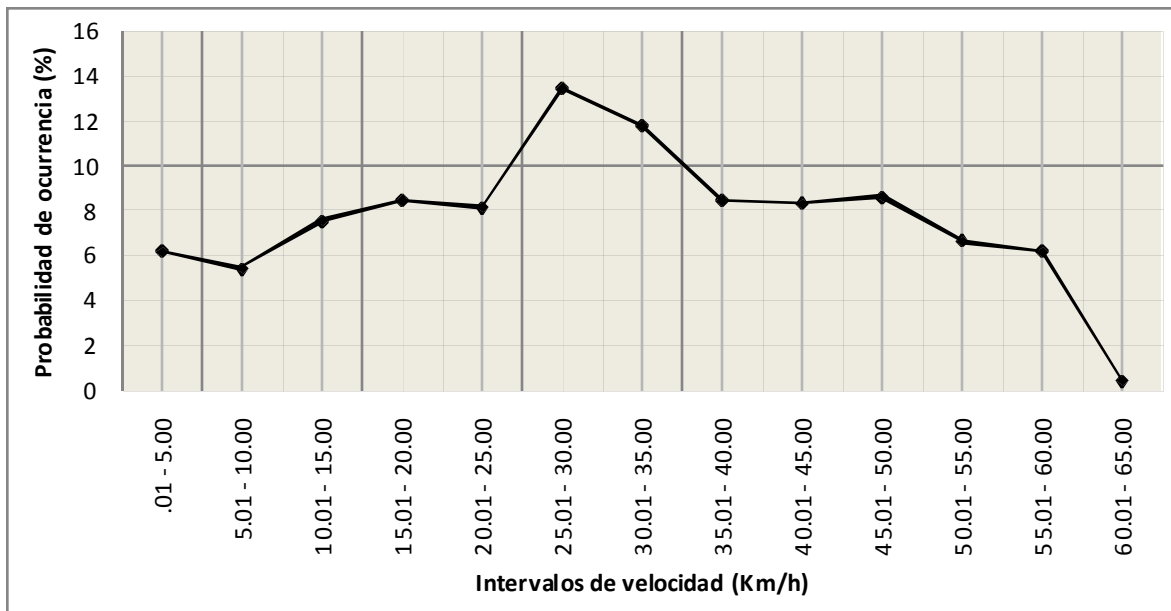
se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador son máximas. Dado esto el consumo de combustible y la emisión son máximos. En la categoría B1 se presenta la segunda franja en promedio desde los 45.0 Km/h hasta los 60.0 Km/h con una emisión promedio de 717  $\mu\text{g/s}$ . En la categoría B2 se presenta la segunda franja en promedio desde los 35.0 Km/h hasta los 55.0 Km/h con una emisión promedio de 800  $\mu\text{g/s}$ . Finalmente en la categoría MB se presenta la segunda franja en promedio desde los 60.0 Km/h con una emisión promedio de 700  $\mu\text{g/s}$ . En esta franja de máxima emisión en la fase cinemática el impacto emisivo promedio de la categoría B2 es mayor que los impactos emisivos promedio de las categorías B1 y MB porque su motor es de mayor tamaño. Así mismo, el tamaño de la franja de la categoría B2 es mucho mayor y empieza antes que las franjas de las categorías B1 y MB. Este mayor rango de velocidades que generan la máxima emisión cinemática en la categoría B2 se generan porque su caja de transmisión tiene un mayor agarre del motor que las otras dos categorías. Al tener un mayor agarre, la transmisión aumenta la cantidad de ciclos Otto que se presentan en un segundo en el motor y entre mayor sea la cantidad de ciclos Otto, mayor es el consumo de gasolina y por ende la emisión cinemática del motor del vehículo.

La emisión promedio disminuye en la tercera franja de velocidades de un ciclo típico de manejo de los vehículos de servicio público en la fase cinemática. Esto se debe principalmente a que el vehículo se está movilizand o a altas velocidades y no necesita mucha potencia ni combustible para mantener su velocidad de crucero constante. El vehículo de la categoría B1 bajo condiciones cinemáticas en el ciclo de manejo típico alcanza a llegar a la tercera franja de velocidades con una velocidad promedio de 62.5 Km/h y una emisión asociada de material particulado de 175  $\mu\text{g/s}$ . Por su lado, el vehículo de la categoría B2 bajo condiciones cinemáticas en el ciclo de manejo típico alcanza a llegar a la tercera franja de velocidades con una velocidad promedio de 57.5 Km/h y una emisión asociada de material particulado de 200  $\mu\text{g/s}$ . Finalmente, el vehículo de la categoría MB bajo

las mismas condiciones no alcanza a llegar a la tercera franja. Las emisiones promedio presentadas en esta franja son mucho menores que las presentadas en la velocidad límite superior de la primera franja y las presentadas en promedio en la segunda franja de velocidades. En el caso de la categoría B1 y B2 la emisión en la tercera franja de velocidades es aproximadamente la tercera parte de la emisión promedio presentada en la velocidad promedio máxima de la primera franja y la cuarta parte de la segunda franja. Esto lleva a concluir que bajo condiciones cinemáticas en un ciclo de manejo típico, la mejor opción para tener las menores emisiones promedio es que los vehículos de transporte público colectivo se movilicen a una velocidad mayor de 60 Km/h.

Para determinar la emisión esperada en la fase cinemática de un ciclo de manejo típico es necesario tener en cuenta la frecuencia de los intervalos de velocidades. Al tener la frecuencia de los intervalos de velocidades, se tiene la forma en que se distribuye la probabilidad de ocurrencia de cada una de las velocidades en la fase cinemática del ciclo de manejo típico. Con la probabilidad de ocurrencia de cada una de los intervalos de velocidades y sus emisiones promedio asociadas, se puede determinar el valor esperado de las emisiones en la fase cinemática.

Figura 1.10. Frecuencia de los Intervalos de velocidad. Fase Cinemática



En un ciclo de manejo típico de los vehículos de servicio público colectivo, la distribución de ocurrencias de los intervalos de velocidad en la fase cinemática es casi uniforme. El intervalo de velocidad que tiene la mayor probabilidad de ocurrir es el que está comprendido entre los 25 y 30 Km/h. Este intervalo se encuentra en la primera franja de velocidades en donde las emisiones promedio, la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador, son proporcionales a la velocidad espacial promedio. Por otro lado, la tercera franja de velocidades tiene una probabilidad media (6%) de ser alcanzada en la categoría B2, una baja probabilidad de ser alcanzada en la categoría B1 (0.1%) y una probabilidad nula de ser alcanzada en la categoría MB. Estas probabilidades indican que la mejor opción para tener las menores emisiones promedio en la fase cinemática ocurre medianamente, poco y hasta llega a no ocurrir en cada una de las categorías vehiculares del servicio público colectivo. La forma en que se distribuye la probabilidad en los intervalos de velocidad conduce a un valor esperado de velocidad cinemática de 31 Km/h en un ciclo de manejo típico. Esta velocidad

esperada se encuentra en la primera franja de velocidades en cada una de las categorías vehiculares y tiene asociada una emisión promedio de 250  $\mu\text{g/s}$  en la categoría B1, 260  $\mu\text{g/s}$  en la categoría B2 y 125  $\mu\text{g/s}$  en la categoría MB. Esto indica que el impacto emisor esperado en la fase cinemática está confinado en la primera franja de velocidades y es mayor a medida que se incrementa el tamaño del motor.

Si se comparan las emisiones esperadas de la fase de aceleraciones negativas con las emisiones esperadas de la fase cinemática, se puede determinar en cual fase se espera que se emita más en un ciclo de manejo típico. En la categoría B1 se espera que en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 390.5  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase cinemática en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 250  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría B1 se espera que el impacto emisor sea mayor en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico en una magnitud 2 veces mayor que en la fase cinemática. En la categoría B2 se espera que en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 450.2  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase cinemática en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 260  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría B2 se espera que el impacto emisor sea mayor en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico en una magnitud 2 veces mayor que en la fase cinemática. Finalmente, en la categoría MB se espera que en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 106.3  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase cinemática en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 125  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría MB se espera que el impacto emisor sea casi igual en la fase de aceleraciones negativas y en la fase cinemática en un ciclo de manejo típico. En conclusión, se espera que en un ciclo de manejo típico de los buses de servicio público colectivo, la fase de aceleraciones negativas tenga un impacto mayor que la fase cinemática para las categorías B1 y B2, pero

también se espera que el impacto emisor en la fase de aceleraciones negativas sea igual al impacto emisor en la fase cinemática para la categoría MB.

#### 1.4 FASE DINAMICA

Al igual que en la fase cinemática, en esta fase las emisiones instantáneas se definen en términos de la potencia requerida por el vehículo y en términos de la cantidad de combustible que se esté inyectando a la cámara de combustión con el pedal del acelerador. La diferencia entre la fase cinemática y la fase dinámica es que en la fase dinámica la aceleración es mayor que 0, mientras que en la fase cinemática la aceleración es igual a 0. En esta fase el motor se acelera para vencer la inercia del vehículo y aumentar la velocidad espacial. Por lo tanto, la potencia instantánea demandada por la transmisión hacia el motor está definida por la velocidad y aceleración espaciales. Para suplir esta potencia el motor debe ejercer un torque que está definido por el grado de agarre de la transmisión y de que tan presionado este el pedal del acelerador. Si la potencia requerida por la transmisión y el torque son muy grandes, el motor se tiene que esforzar más y debe consumir más combustible. Es claro que entre mayor sea el consumo de combustible, mayor será la emisión.

El comportamiento de las emisiones de los vehículos de Servicio Público Colectivo en la fase dinámica de un ciclo de manejo típico se puede estudiar por medio de unas graficas de emisión instantánea Vs velocidad y aceleración instantáneas. Dado que la velocidad y la aceleración instantáneas pueden tomar cualquier valor, se utilizan intervalos discretos de velocidad, con un tamaño de 5 Km/h, e intervalos discretos de aceleración con un tamaño de 1 Km/h/s para facilitar el análisis. Se toman pares de intervalos velocidad-aceleración y se saca el promedio de la emisión instantánea vehicular con las emisiones instantáneas

correspondientes a las velocidades y aceleraciones comprendidas en el par de intervalos. Los pares de intervalos de velocidad-aceleración con la mayor emisión promedio requieren una mayor potencia y una mayor cantidad de combustible inyectado a la cámara de combustión con el pedal del acelerador.



Figura 1.11. Emisión Promedio Vs Velocidad y Aceleración B1 en 3D. Fase Dinámica

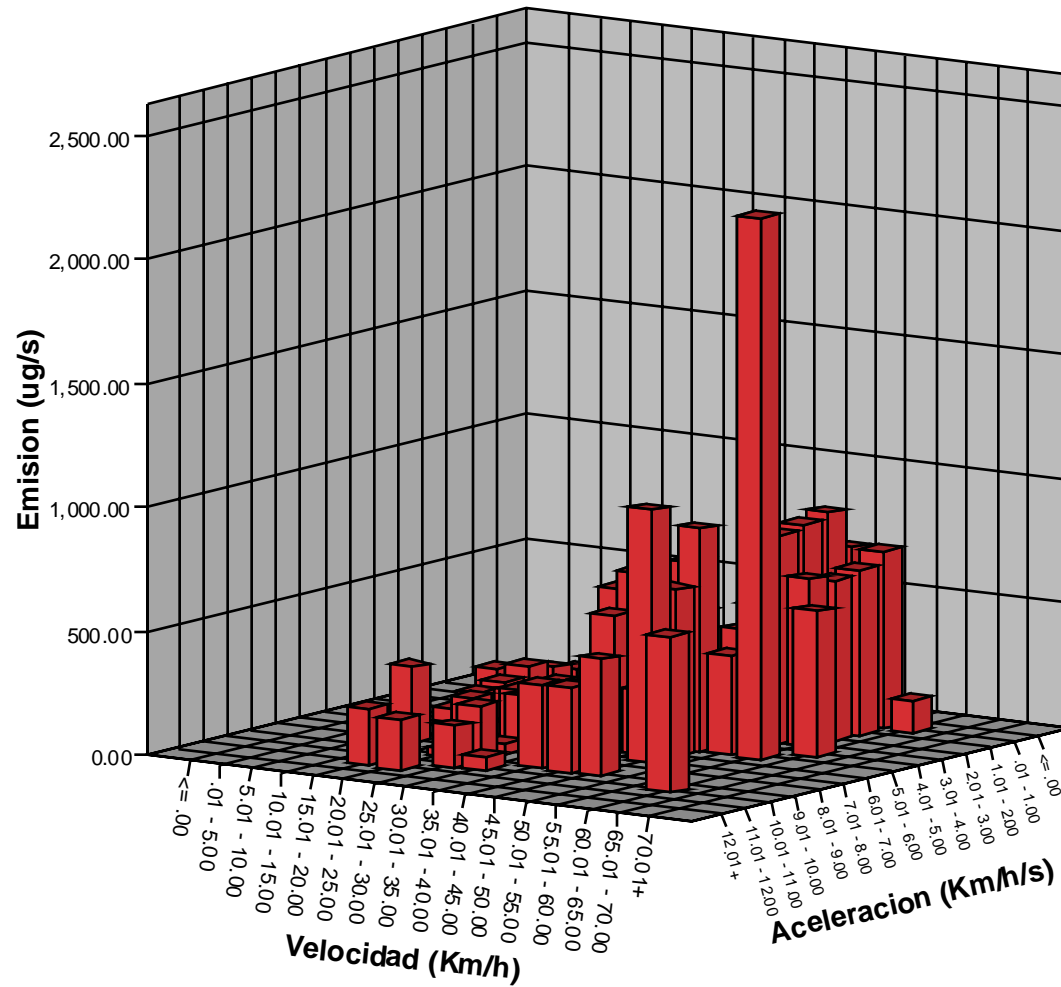


Figura 1.12. Emisión Promedio Vs Velocidad y Aceleración B1 en 2D. Fase Dinámica

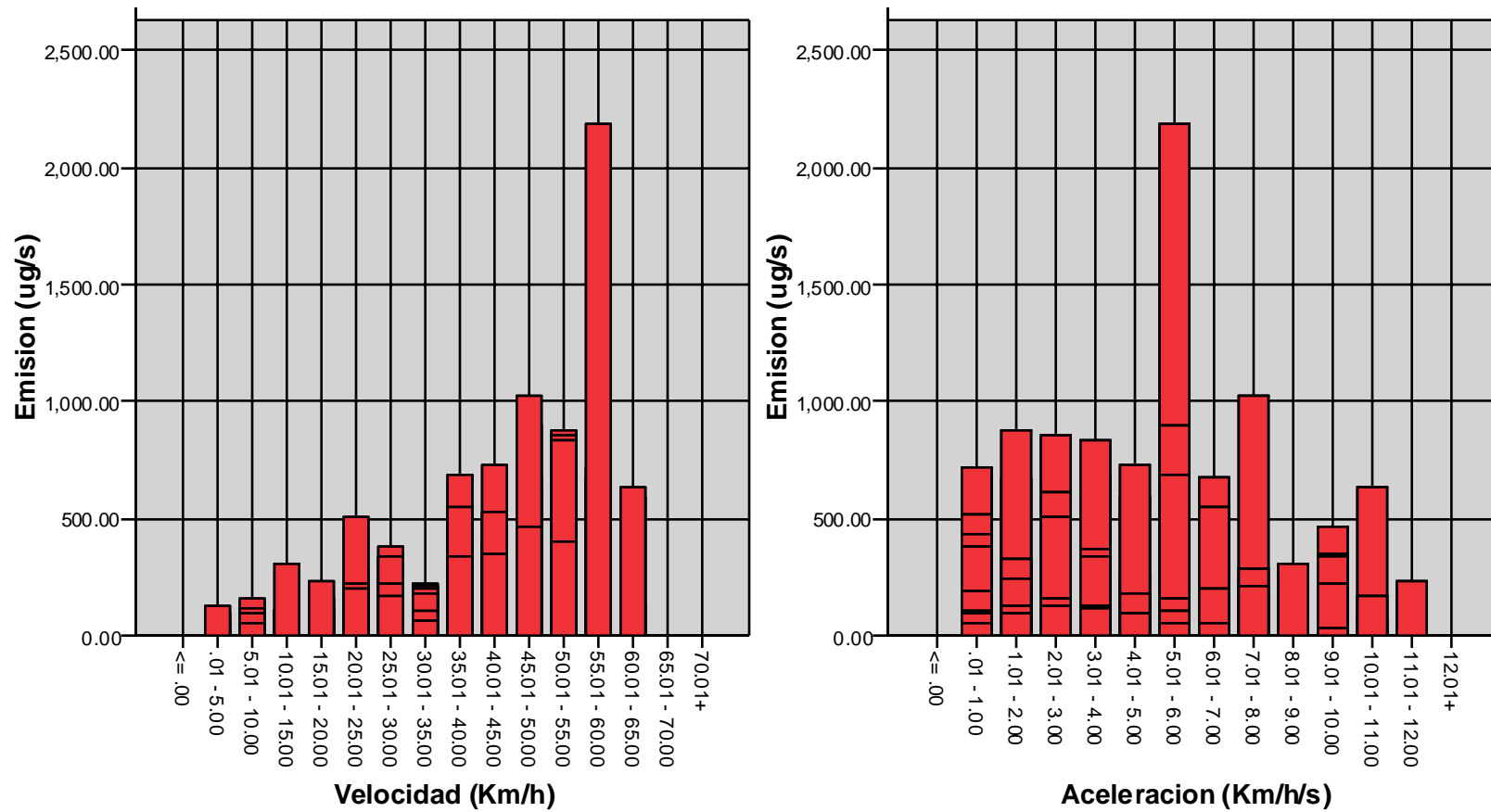


Figura 1.13. Emisión Promedio Vs Velocidad y Aceleración B2 en 3D. Fase Dinámica

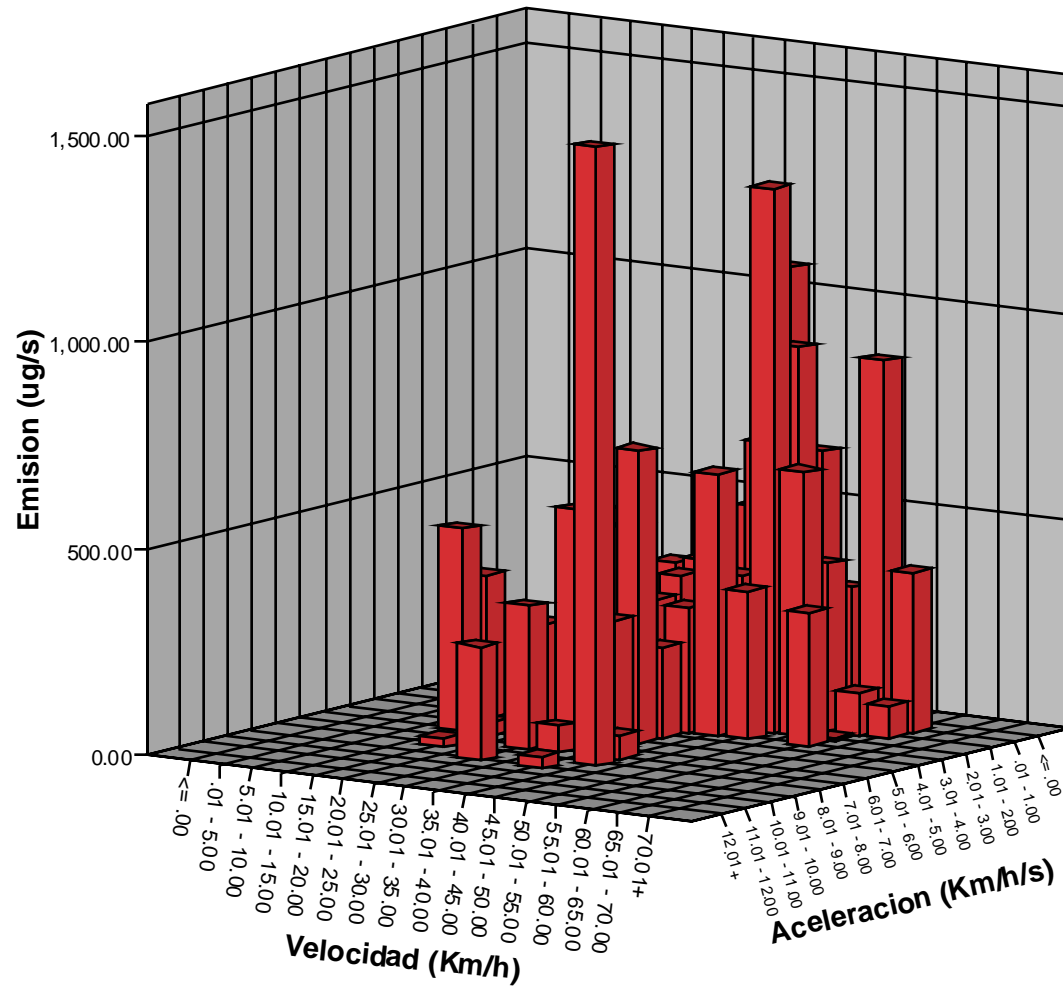


Figura 1.14. Emisión Promedio Vs Velocidad y Aceleración B2 en 2D. Fase Dinámica

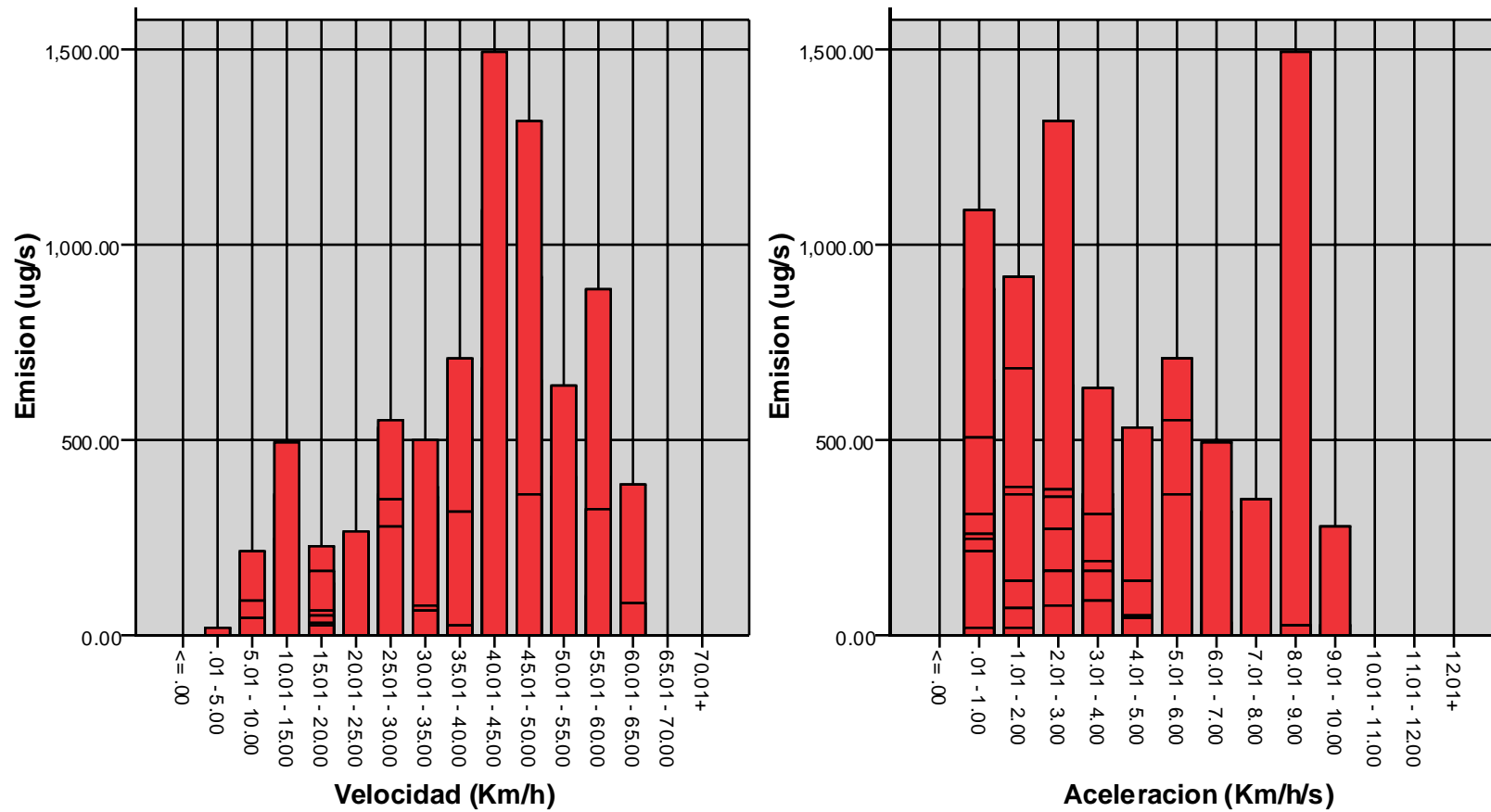


Figura 1.15. Emisión Promedio Vs Velocidad y Aceleración MB en 3D. Fase Dinámica

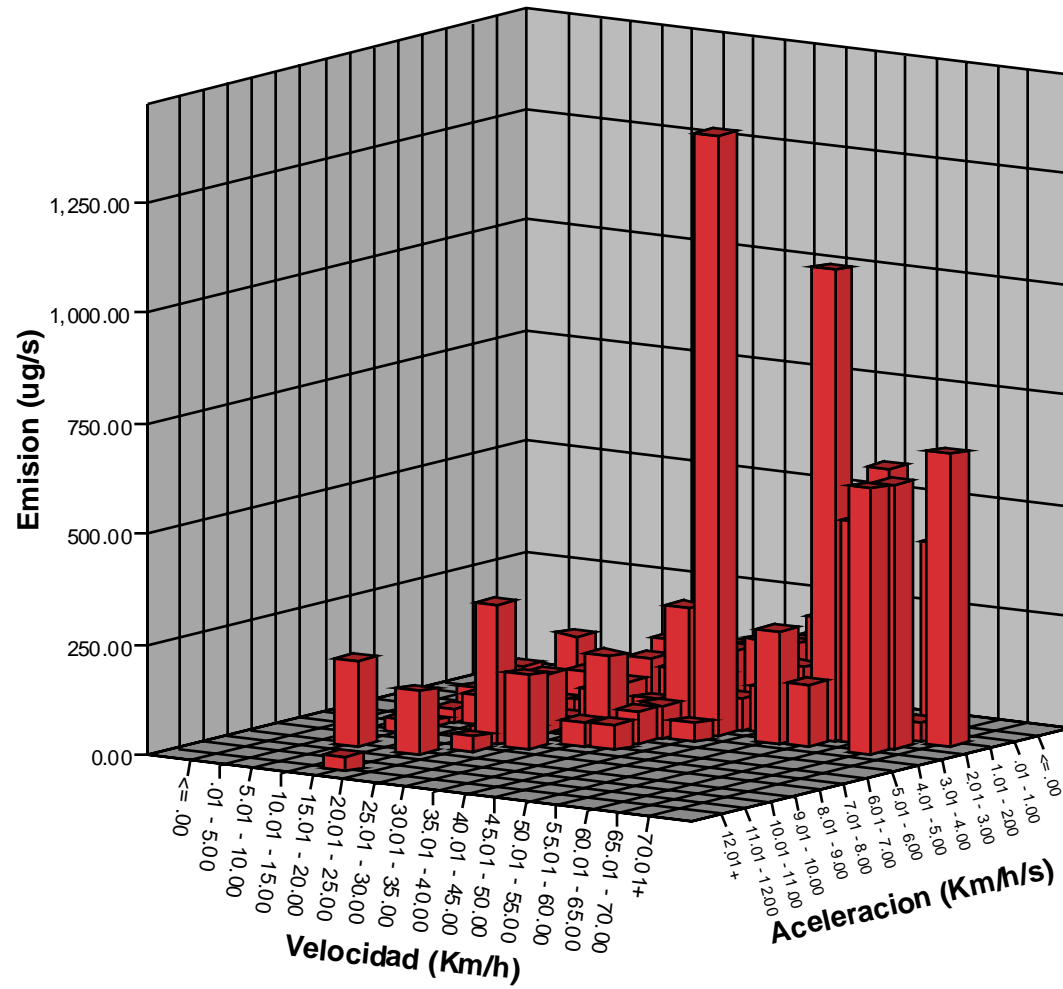
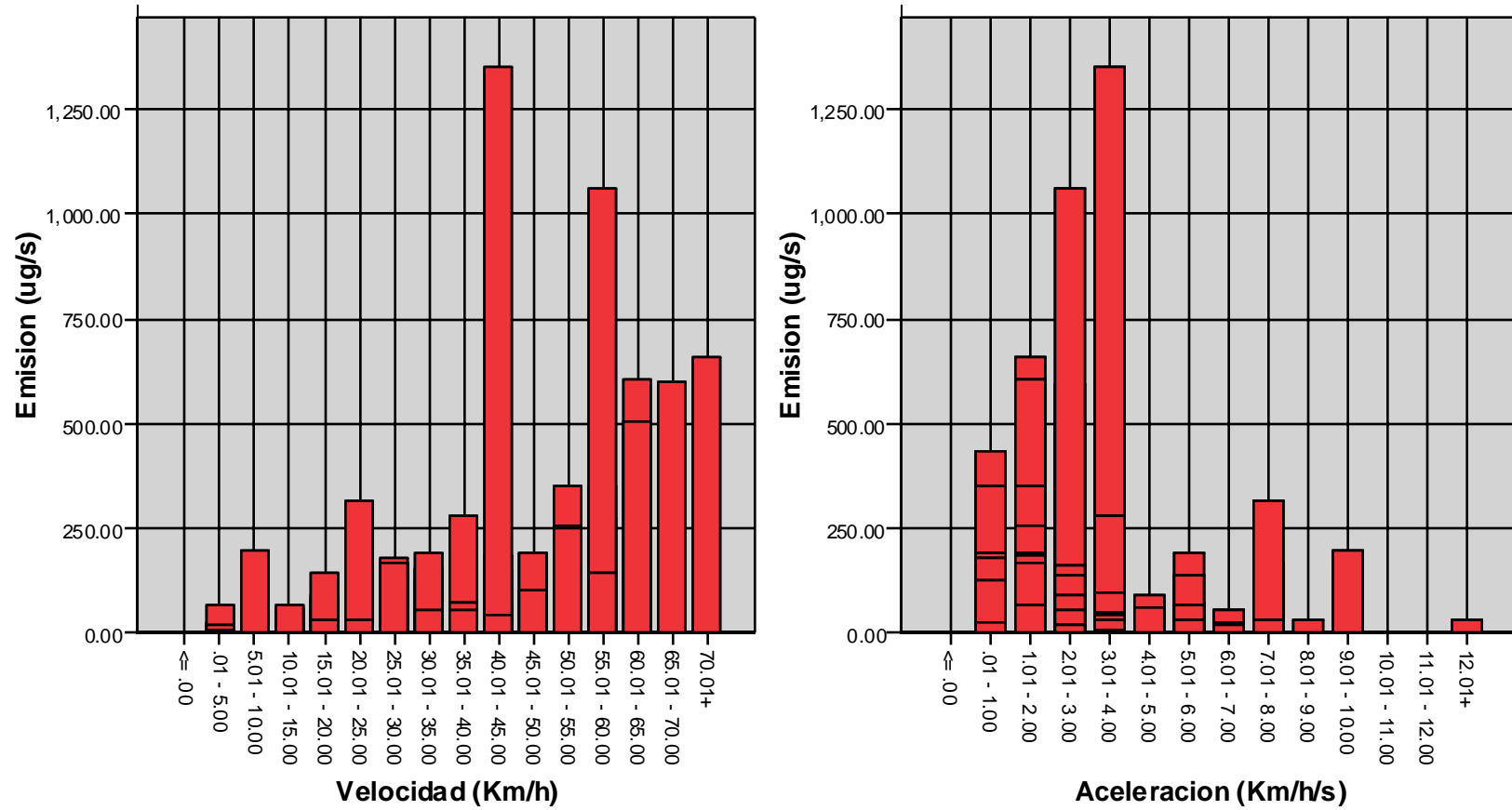


Figura 1.16. Emisión Promedio Vs Velocidad y Aceleración MB en 2D. Fase Dinámica



La forma en que se distribuye la emisión promedio en función de los pares velocidad-aceleración define el impacto emisivo promedio de cada uno de los pares velocidad-aceleración que se generan en la fase dinámica de un ciclo de manejo típico de los vehículos de servicio público colectivo. Las graficas en "3D" muestran el comportamiento de la emisión promedio en función de los pares velocidad-aceleración y las graficas en "2D" son una imagen frontal y lateral de las graficas en "3D" y permiten describir con mayor facilidad el comportamiento de la emisión promedio en función de cada una de los intervalos de velocidad y aceleración. Con estas graficas se puede describir el comportamiento de la emisión promedio en función de los pares velocidad-aceleración en la fase dinámica de un ciclo de manejo típico de los vehículos de servicio público.

Al igual que la fase cinemática, la fase dinámica presenta 3 franjas de velocidad en un ciclo de manejo típico asociadas al comportamiento de la emisión promedio que se define en términos de la potencia requerida y la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador.

En la primera franja de velocidades la emisión promedio aumenta a medida que aumenta la velocidad espacial. En la categoría B1 a una velocidad promedio de 2.5 Km/h se emite en promedio 100  $\mu\text{g/s}$  y a una velocidad promedio de 52.5 Km/h se emite en promedio 800  $\mu\text{g/s}$ . Esto indica que en un cambio de velocidad promedio de 50 Km/h en la categoría B1 genera un cambio en la emisión promedio de 700  $\mu\text{g/s}$  en la misma categoría. Se puede decir que en la primera franja de velocidades en la fase dinámica de la categoría B1 la tasa de cambio promedio de la emisión promedio con respecto a la velocidad promedio es de 14 ( $\mu\text{g/s}$ )/ Km/h. En la categoría B2 a una velocidad promedio de 2.5 Km/h se emite en promedio 10  $\mu\text{g/s}$  y a una velocidad promedio de 37.5 Km/h se emite en promedio 700  $\mu\text{g/s}$ . Esto indica que en un cambio de velocidad promedio de 35 Km/h en la categoría B2 genera un cambio en la emisión promedio de 690  $\mu\text{g/s}$  en la misma categoría. Se puede decir que en la primera franja de velocidades en la fase dinámica de la categoría B2 la tasa de cambio promedio de la emisión

promedio con respecto a la velocidad promedio es de  $20 \text{ (}\mu\text{g/s)}/\text{Km/h}$ . Finalmente en la categoría MB a una velocidad promedio de  $2.5 \text{ Km/h}$  se emite en promedio  $50 \text{ }\mu\text{g/s}$  y a una velocidad promedio de  $37.5 \text{ Km/h}$  se emite en promedio  $260 \text{ }\mu\text{g/s}$ . Esto indica que en un cambio de velocidad promedio de  $35 \text{ Km/h}$  en la categoría MB genera un cambio en la emisión promedio de  $210 \text{ }\mu\text{g/s}$  en la misma categoría. Se puede decir que en la primera franja de velocidades en la fase dinámica de la categoría MB la tasa de cambio promedio de la emisión promedio con respecto a la velocidad promedio es de  $6 \text{ (}\mu\text{g/s)}/\text{Km/h}$ . Al igual que en la fase cinemática, el cambio de las emisiones instantáneas promedio en términos del cambio de velocidad es mayor para la categoría B2 que tiene vehículos con motores de cilindraje mayor a  $5000 \text{ cc}$ , seguido por la categoría B1 que tiene vehículos con motores de cilindraje menor a  $5000 \text{ cc}$  y finalmente por la categoría MB que tiene vehículos con motores de cilindraje promedio de  $3000 \text{ cc}$ . Esto se debe principalmente a que el consumo de gasolina de un vehículo no solo se define en términos de la potencia requerida definida por la velocidad espacial promedio, sino que también se define por el tamaño de su motor. Entre mayor sea el tamaño del motor, mayor será el consumo en cada uno de los intervalos de velocidad y por lo tanto será mayor la emisión promedio. Cabe resaltar que estas tasas de cambio casi constantes demuestran que en esta primera franja de velocidades, la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador son proporcionales a la velocidad espacial promedio.

En la segunda franja de velocidades la emisión promedio es máxima. En esta franja la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador son máximas. Dado esto el consumo de combustible y la emisión son máximos. En la categoría B1 se presenta la segunda franja en promedio desde los  $55.0 \text{ Km/h}$  hasta los  $60.0 \text{ Km/h}$  con una emisión promedio de  $2200 \text{ }\mu\text{g/s}$ . En la categoría B2 se presenta la segunda franja en promedio desde los  $40.0 \text{ Km/h}$  hasta los  $50.0 \text{ Km/h}$  con una emisión promedio de  $1375 \text{ }\mu\text{g/s}$ . Finalmente en la categoría MB se presenta la segunda franja en promedio desde los  $40.0 \text{ Km/h}$  hasta los  $45 \text{ Km/h}$  con una



emisión promedio de 1350  $\mu\text{g/s}$ . En esta franja de máxima emisión en la fase dinámica el impacto emisor promedio de la categoría B1 es mayor que los impactos emisivos promedio de las categorías B2 y MB. Este fenómeno, en el que la emisión no depende única y exclusivamente del tamaño del motor, de la potencia requerida y de la inyección de combustible con el pedal del acelerador, se debe principalmente a la falta de mantenimiento y sincronización del vehículo de la categoría B1. La falta de mantenimiento del motor de los vehículos lleva a que pase aceite refrigerante a la cámara de combustión, lleva a que el aire y el combustible entren sucios a la cámara de combustión y finalmente lleva a que partículas producidas en el desgaste de la fase pistón-cilindro entren a la cámara de combustión. Así mismo, la falta de sincronización del motor causa que el “rack”, o dosificador de combustible, inserte mayor cantidad de combustible que el necesario para reaccionar estequiométricamente con el oxígeno en la cámara de combustión. La falta de sincronización también puede causar que los inyectores introduzcan el combustible antes de que el oxígeno este comprimido, refrigerado y listo para reaccionar con el ACPM. Bajo estas condiciones de no sincronización el combustible no es quemado en su totalidad y se emite en forma de material particulado a la atmósfera. Por lo tanto, la falta de mantenimiento y sincronización en la categoría B1 permite que su vehículo emita en promedio mayor cantidad de material particulado en la segunda franja de velocidades dinámicas que el vehículo de la categoría B2, que debería emitir mas por el consumo de gasolina asociado al tamaño de su motor.

En la tercera franja de velocidades la emisión promedio disminuye. Esto se debe principalmente a que el vehículo se está movilizand o a altas velocidades. El motor no debe ejercer mucha potencia ni debe consumir mucho combustible, como en la segunda franja, para vencer la inercia del vehículo y lograr movilizarlo. El vehículo de la categoría B1 alcanza a llegar a la tercera franja de velocidades con una velocidad promedio de 62.5 Km/h y presenta una emisión promedio asociada de material particulado de 550  $\mu\text{g/s}$ . El vehículo de la categoría B2 alcanza a llegar a la tercera franja de velocidades con una velocidad promedio de 52.5 Km/h y presenta una emisión promedio asociada de material particulado de 617  $\mu\text{g/s}$ .

Finalmente, el vehículo de la categoría MB alcanza a llegar a la tercera franja de velocidades con una velocidad promedio de 47.5 Km/h y presenta una emisión promedio asociada de material particulado de 540  $\mu\text{g/s}$ . Para las categorías B1 y B2, las emisiones promedio presentadas en esta franja son menores que las presentadas en la velocidad límite superior de la primera franja y las presentadas en promedio en la segunda franja de velocidades. En el caso de la categoría B1 la emisión en la tercera franja de velocidades es aproximadamente 1.5 veces menor que la emisión promedio presentada en la velocidad promedio máxima de la primera franja y la cuarta parte de la emisión promedio de la segunda franja de velocidades. En el caso de la categoría B2 la emisión en la tercera franja de velocidades es aproximadamente 1.5 veces menor que la emisión promedio presentada en la velocidad promedio máxima de la primera franja y es aproximadamente 2.5 menor que la emisión promedio de la segunda franja de velocidades. Para la categoría MB, las emisiones promedio presentadas en esta franja son mayores que las presentadas en la velocidad límite superior de la primera franja y menores que las presentadas en promedio en la segunda franja de velocidades. La emisión en la tercera franja de velocidades es aproximadamente 2 veces mayor que la emisión promedio presentada en la velocidad promedio máxima de la primera franja y es aproximadamente 2.5 menor que la emisión promedio de la segunda franja de velocidades. En el caso de la categoría MB el motor debe ejercer menos potencia y debe consumir menos combustible que en la segunda franja, pero debe ejercer más potencia y consumir más combustible que en la primera franja para vencer la inercia del vehículo y lograr movilizarlo. Esto lleva a concluir que bajo condiciones dinámicas en un ciclo de manejo típico, la mejor opción para tener las menores emisiones promedio en las categorías B1 y B2 es que los vehículos de transporte público colectivo se movilicen a una velocidad mayor de 60 Km/h, pero en el caso de la categoría MB la mejor opción es que los vehículos se movilicen a una velocidad menor de 37.5 Km/h.

Las tasas de cambio promedio de la emisión promedio con respecto a la velocidad promedio de las categorías B1 y B2 son mayores en esta fase que en la fase

cinemática. Este incremento en las tasas de cambio se debe principalmente a un incremento en la diferencia de emisiones en los intervalos de velocidad inicial y final de la fase dinámica con respecto a la fase cinemática. El intervalo de velocidad final en la fase dinámica emite mayor cantidad de material particulado en promedio en la fase dinámica que en la fase cinemática. Este incremento en la emisión se debe a un incremento en el consumo de combustible asociado a un incremento en la potencia requerida. En esta franja la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador son máximas

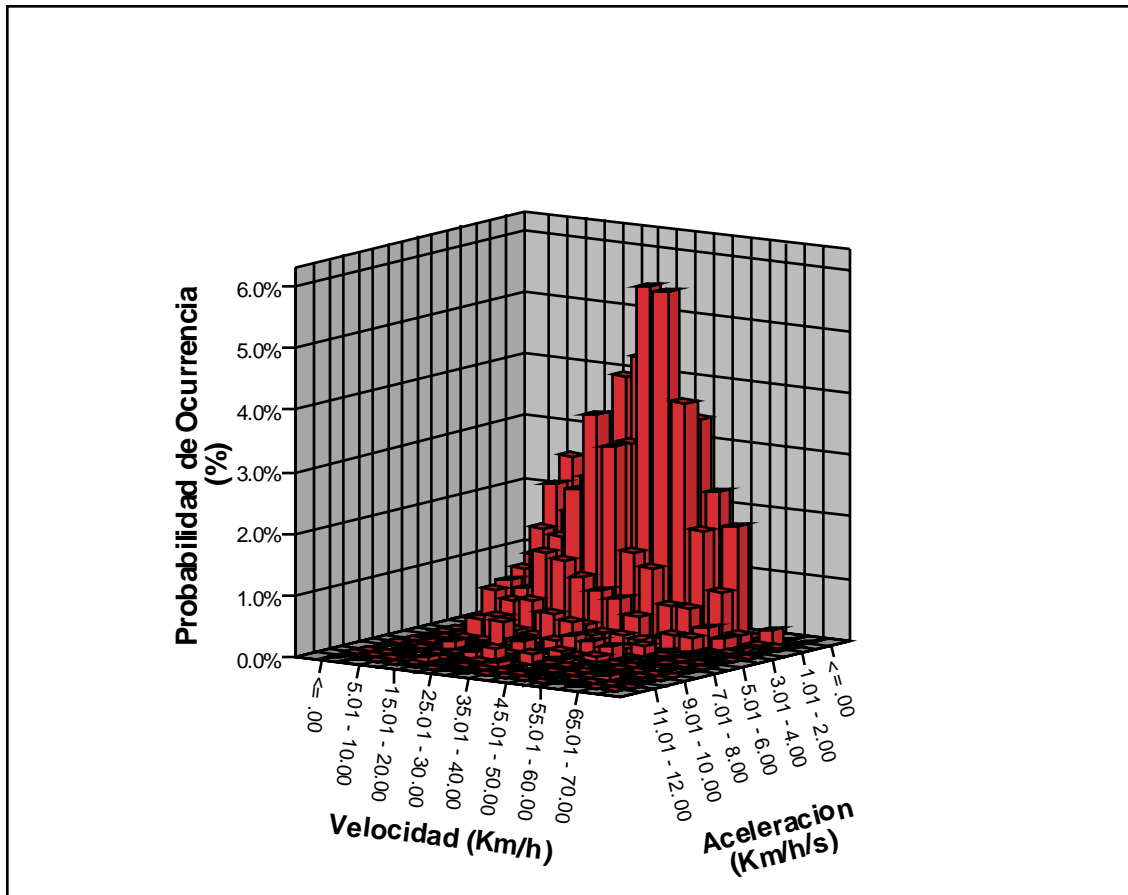
Las emisiones promedio en función de los intervalos de aceleraciones en la fase dinámica tienen un comportamiento variable. Esto se debe a que la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se está inyectando a la cámara de combustión con el pedal del acelerador en un intervalo de aceleración dada del vehículo, dependen de la velocidad instantánea del vehículo. En la primera franja de velocidades, a medida que la velocidad instantánea del vehículo va aumentando, la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se necesita inyectar a la cámara de combustión en un proceso de aceleración para incrementar la velocidad instantánea del vehículo, aumenta. En la segunda franja de velocidades, la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se necesita inyectar a la cámara de combustión en un proceso de aceleración para incrementar la velocidad instantánea del vehículo, es máxima. Finalmente, en la tercera franja de velocidades, la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se necesita inyectar a la cámara de combustión en un proceso de aceleración para incrementar la velocidad instantánea del vehículo, disminuye frente a la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se necesita inyectar en la cámara de combustión en un proceso de aceleración en la segunda franja. Esto indica que el comportamiento de las emisiones promedio, que son proporcionales al consumo

de combustible, en función de los intervalos de aceleración depende de la velocidad instantánea del vehículo.

También hay que tener en cuenta que a medida que se incrementa la velocidad promedio del vehículo, se incrementa el consumo de combustible a menores valores de aceleración. Si la velocidad promedio del vehículo aumenta, la velocidad angular del motor aumenta. Cuando la velocidad angular del motor aumenta el número de ciclos de Otto del motor en un intervalo de tiempo aumenta. Si el número de ciclos de Otto del motor en un intervalo de tiempo aumenta, el consumo de combustible aumenta. Por lo tanto, la potencia requerida por el vehículo en un proceso de aceleración que incrementa la velocidad instantánea del vehículo, aumenta el número de ciclos de Otto y por lo tanto la cantidad de combustible que se necesita inyectar a la cámara de combustión. Entre mayor sea la velocidad promedio de marcha del vehículo mayor será el incremento de ciclos de Otto en un proceso de aceleración.

Para determinar la emisión esperada en la fase dinámica de un ciclo de manejo típico es necesario tener en cuenta la frecuencia de los pares de intervalos velocidad-aceleración. Al tener la frecuencia de los intervalos de velocidad-aceleración, se tiene la forma en que se distribuye la probabilidad de ocurrencia de cada uno de los pares velocidad-aceleración en la fase dinámica del ciclo de manejo típico. Con la probabilidad de ocurrencia de cada una de los pares de intervalos de velocidad-aceleración y sus emisiones promedio asociadas, se puede determinar el valor esperado de las emisiones en la fase dinámica.

**Figura 1.17. Frecuencia de los pares de intervalos de velocidad-aceleración.  
Fase Dinámica**



En un ciclo de manejo típico de los vehículos de servicio público colectivo, la distribución de ocurrencias de los pares de intervalos de velocidad-aceleración en la fase dinámica disminuye exponencialmente en el eje de las aceleraciones y presenta una forma de campana en el eje de las velocidades. El par de intervalos de velocidad-aceleración que tienen la mayor probabilidad de ocurrir son los que están comprendidos entre los 35 y 50 Km/h y entre los 1.0 y 2.0 Km/h/s. Estos intervalos se encuentran en la primera franja de velocidades del vehículo de la categoría B1 y acobijan toda la segunda franja de velocidades de los vehículos de las categorías B2 y MB. Esto quiere decir, que en la fase dinámica de un ciclo de manejo típico, los vehículos de las categorías B2 y MB están marchando en muchos instantes de tiempo en la segunda franja de velocidades. En esta franja

las emisiones promedio, la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador, son máximas.

La forma en que se distribuye la probabilidad en los pares de intervalos de velocidad-aceleración conduce a un valor esperado de velocidad dinámica de 32 Km/h y conduce a un valor esperado de aceleración dinámica de 2 Km/h/s en un ciclo de manejo típico. La velocidad esperada se encuentra en la primera franja de velocidades en cada una de las categorías vehiculares y la aceleración esperada es muy pequeña (produce un cambio de 2 Km/h en un segundo). Por lo tanto se espera que la potencia requerida por el vehículo y la cantidad de combustible que se inyecta a la cámara de combustión con el pedal del acelerador sean proporcionales a la velocidad espacial promedio y se espera que el impacto de un proceso de aceleración sobre la velocidad angular del motor y por ende el consumo de gasolina en un intervalo de tiempo, sea muy bajo. Las emisiones promedio esperadas en la fase dinámica son de 250  $\mu\text{g/s}$  en la categoría B1, 500  $\mu\text{g/s}$  en la categoría B2 y 200  $\mu\text{g/s}$  en la categoría MB. Esto indica que el impacto emisoro esperado en la fase dinámica de un ciclo de manejo típico está confinado en la primera franja de velocidades y es mayor a medida que se incrementa el tamaño del motor. Sin embargo, la varianza del ciclo de manejo típico es muy alta y es muy probable que se presenten varios pares de intervalos velocidad-aceleración en la segunda franja de velocidades en un ciclo de manejo típico y por lo tanto, es muy probable que los vehículos se encuentren emitiendo la máxima cantidad de material particulado en la fase dinámica de un ciclo de manejo típico.

Si se comparan las máximas emisiones esperadas de las fases de aceleraciones negativas, estática y cinemática con las emisiones esperadas de la fase dinámica, se puede determinar en cual fase se espera que se emita más en un ciclo de manejo típico. En la categoría B1 se espera que en la fase de aceleraciones

negativas en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 390.5  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase dinámica en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 250  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría B1 se espera que el impacto emisivo sea mayor en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico en una magnitud 2 veces mayor que en la fase dinámica. Esto se debe principalmente a la falta de sincronización del motor del vehículo de la categoría B1. El “rack”, o dosificador de combustible, inserta mayor cantidad de combustible que el necesario para reaccionar estequiométricamente con el oxígeno en la cámara de combustión para mantener encendido el vehículo. La falta de sincronización también puede causar que los inyectores introduzcan el combustible antes de que el oxígeno este comprimido, refrigerado y listo para reaccionar con el ACPM. Ambos problemas de sincronización enriquecen la mezcla aire-combustible en la cámara de combustión y como consecuencia aumentan la cantidad de hidrocarburos inquemados emitidos en los gases que salen por el exhaust. En la categoría B2 se espera que en la fase de aceleraciones negativas en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 450.2  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase dinámica en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 500  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría B2 se espera que el impacto emisivo sea mayor en la fase dinámica en un ciclo de manejo típico en una magnitud 2 veces mayor que en la fase de aceleraciones negativas. Finalmente, en la categoría MB se espera que en la fase cinemática en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 125  $\mu\text{g/s}$  y se espera que en la fase dinámica en un ciclo de manejo típico la emisión promedio sea de 200  $\mu\text{g/s}$ , por lo tanto en la categoría MB se espera que el impacto emisivo sea un 60% mayor en la fase dinámica en un ciclo de manejo típico que en la fase de cinemática. En conclusión, se espera que en un ciclo de manejo típico de los buses de servicio público colectivo, la fase de aceleraciones negativas tenga un impacto emisivo mayor que la fase dinámica para las categoría B1, por su falta de mantenimiento. Por otro lado, se espera que en un ciclo de manejo típico de los buses de servicio público, la fase dinámica tenga un impacto emisivo mayor que las otras fases para las categorías B2 y MB. Esto se debe principalmente a que la potencia instantánea demandada por la

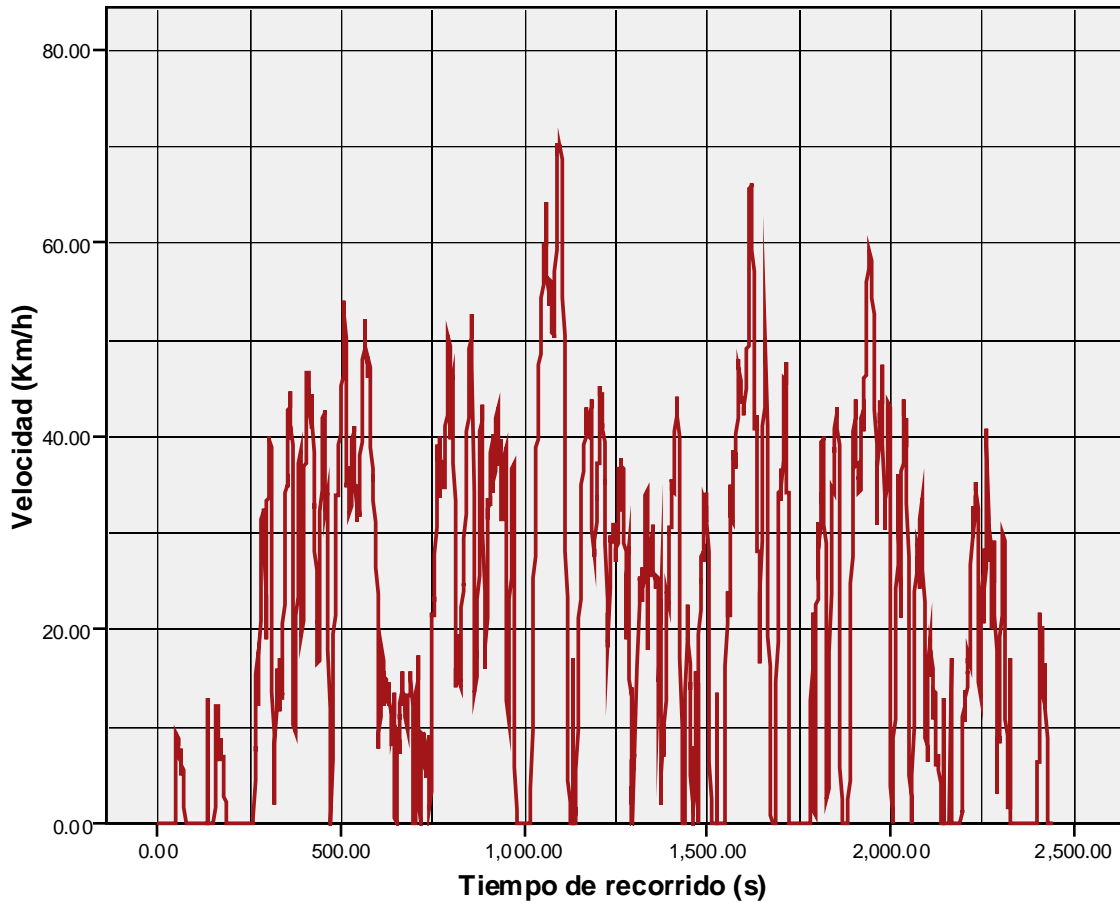
transmisión hacia el motor y la cantidad de combustible inyectado a la cámara de combustión están definidas por la velocidad y aceleración espaciales. Este par de variables dinámicas que mantienen en movimiento el vehículo requieren de un mayor esfuerzo que en las fases de aceleraciones negativas, estática y cinemática por parte del motor. Es claro que para que el motor pueda suplir este esfuerzo necesita energía química suministrada por el consumo de gasolina y entre mayor sea el consumo de gasolina, mayor será la emisión.



## **2. EMISION VEHICULAR DEL SERVICIO PÚBLICO EN UN CICLO DE MANEJO TIPICO (CONCLUSIÓN)**

El ciclo de manejo típico de los vehículos de servicio público colectivo se puede modelar con una grafica de velocidad espacial promedio contra tiempo de recorrido. Cada punto de la grafica refleja la velocidad instantánea del vehículo en un instante del recorrido. La pendiente promedio que se presenta en un intervalo de tiempo representa la aceleración promedio de ese intervalo de tiempo. Si la pendiente es positiva la aceleración es positiva y si la pendiente es negativa la aceleración es negativa. Entre más grande sea la magnitud de la pendiente mayor será la aceleración.

**Figura 2.1. Ciclo de manejo típico de los vehículos de servicio público colectivo**



El impacto emisoro esperado de un vehículo de servicio público en el ciclo de manejo típico depende de la frecuencia de ocurrencia de cada una de las fases en las que puede estar el motor. Entre más frecuente sea una fase en el ciclo de manejo típico, más probable es que el impacto emisoro esperado del vehículo en el ciclo de manejo típico se parezca a la emisión esperada de esa fase. Para determinar la frecuencia de ocurrencia de cada una de las fases en las que puede estar el motor en el ciclo de manejo típico se toman intervalos de tiempo de recorrido de 1 segundo de magnitud y se miden los valores de las variables dinámicas (velocidad y aceleración). Un intervalo de tiempo se clasifica en alguna

de las 4 fases en las que puede estar el motor, en función de los valores que toman las variables dinámicas.

**Tabla 2.1. Criterios de clasificación de los intervalos de tiempo en función de los valores que pueden tomar las variables dinámicas.**

		Aceleracion (Km/h/s)		
		<= .00	.01 - .00	.01+
Velocidad (Km/h)	<= .00	Aceleraciones Negativas	Estatica	Dinamica
	.01+		Cinematica	

Si en un intervalo de tiempo la aceleración es negativa, el intervalo se clasifica en la fase de aceleraciones negativas. Si en un intervalo de tiempo tanto la aceleración como la velocidad son nulas, el intervalo se clasifica en la fase estática. Si en un intervalo de tiempo la aceleración es nula y la velocidad es mayor que 0, el intervalo se clasifica en la fase cinemática. Finalmente, si en un intervalo de tiempo la aceleración es mayor que 0, el intervalo se clasifica en la fase dinámica. Con el porcentaje total de intervalos de tiempo que se clasifican en cada una de las fases en las que puede estar el motor, se determina la frecuencia de ocurrencia de cada una de las fases en un ciclo de manejo típico. Con el valor de la frecuencia de cada una de las fases se puede determinar la importancia que tiene cada una de las fases en el ciclo de manejo típico.

**Tabla 2.2. Frecuencia de ocurrencia de cada una de las fases en un ciclo de manejo típico de los vehículos de servicio público colectivo**

		Aceleracion (Km/h/s)		
		<= .00	.01 - .00	.01+
Velocidad (Km/h)	<= .00	1	22	0
	.01+	30	9	38

En un ciclo de manejo típico, un bus de servicio público colectivo se encuentran en la fase dinámica en el 38% del tiempo, se encuentran en la fase de aceleraciones negativas en el 31% del tiempo, se encuentran en la fase estática en el 22% del tiempo y finalmente se encuentran en la fase de cinemática en el 9% del tiempo. Estas frecuencias de ocurrencia de cada una de las fases en un ciclo de manejo típico de un bus de servicio público colectivo demuestran la cultura precaria de los choferes de bus bogotanos. Estos choferes de bus, están en promedio, en la mayoría del tiempo en un ciclo de manejo típico acelerando, frenando y parados recogiendo pasajeros y en muy poco tiempo en un ciclo de manejo típico marchando a velocidad constante. Como resultado, el impacto emisor esperado de un vehículo de servicio público en el ciclo de manejo típico depende en mayor magnitud de las fases dinámica y de aceleraciones negativas y en menor magnitud de las fases estática y cinemática.

Los impactos emisivos esperados en cada una de las fases en las que puede estar el motor en un ciclo de manejo típico dependen de la potencia que debe producir el motor y la cantidad de combustible que consume en un instante dado. Entre mayor sea la inyección de combustible, mas rica es la mezcla aire-combustible en la cámara de combustión. Entre más rica sea la mezcla aire-combustible, mayor será la emisión de hidrocarburos inquemados. Por lo tanto, las fases en las que pueda estar el motor DIESEL en un ciclo de manejo típico más problemáticas son las que presentan en promedio un mayor consumo de combustible.

**Tabla 2.3 Impactos emisivos esperados en cada una de las fases de un ciclo de manejo típico para cada una de las categorías**

		FASE			
		Aceleraciones Negativas	Estática	Cinematica	Dinamica
CATEGORIA	B1	390.5	83.6	250	250
	B2	450.2	34.2	260	500
	MB	106.3	20.9	125	200

En el caso de la categoría B1 el mayor impacto emisivo esperado es el que se presenta en la fase de aceleraciones negativas. Este impacto es aproximadamente 5 veces mayor que el impacto emisivo esperado de la fase estática y 2 veces mayor que el impacto emisivo esperado de la fase cinemática y dinámica. En el caso de la categoría B2 el mayor impacto emisivo esperado es el que se presenta en la fase dinámica. Este impacto es aproximadamente igual al impacto emisivo esperado de la fase de aceleraciones negativas, 15 veces mayor que el impacto emisivo esperado de la fase estática y 2 veces mayor que el impacto emisivo esperado de la fase cinemática. En el caso de la categoría MB el mayor impacto emisivo esperado es el que se presenta en la fase dinámica. Este impacto es aproximadamente 2 veces mayor que el impacto emisivo esperado de la fase de aceleraciones negativas, 10 veces mayor que el impacto emisivo esperado de la fase estática y 2 veces mayor que el impacto emisivo esperado de la fase cinemática. En otras palabras, los mayores impactos emisivos esperados para el vehículo de la categoría B1 son los impactos emisivos promedio de las fases de aceleraciones negativas, cinemática y dinámica, los mayores impactos emisivos esperados para el vehículo de la categoría B2 son los impactos emisivos promedio de las fases de aceleraciones negativas y dinámica y los mayores impactos emisivos esperados para el vehículo de la categoría MB son los impactos emisivos promedio de las fases cinemática y dinámica. En el caso del vehículo de la categoría B1 casi todas las fases tienen un impacto emisivo alto por su falta de mantenimiento y sincronización, por otro lado, en el caso de la

categoría B2 y MB las dos fases de máximo impacto emisor son las fases que requieren máxima potencia e inyección de combustible con el pedal del acelerador por parte del motor bajo una velocidad angular de rotación. No hay que olvidar que el consumo de gasolina y por ende el impacto emisor esperado es mayor a medida que se incrementa el tamaño del motor. Por lo tanto, es lógico que el impacto emisor esperado del vehículo de la categoría B2 sea mayor que el impacto esperado del vehículo de la categoría B1 y el impacto esperado del vehículo de la categoría MB.

En resumen, se puede decir que el estilo de manejo de los choferes de bus bogotanos genera un ciclo de manejo típico caracterizado por una alta ocurrencia de las fases del motor dinámica y de aceleraciones negativas. En estas fases se presenta el máximo impacto emisor esperado para los vehículos del servicio público colectivo. En el caso de la categoría B1, el máximo impacto emisor esperado se presenta en la fase de aceleraciones negativas, en el caso de la categoría B2, el máximo impacto emisor esperado se presenta en la fase dinámica y finalmente, en el caso de la categoría MB, el máximo impacto emisor esperado se presenta en la fase dinámica. Por lo tanto, lo esperado es que los vehículos de servicio público colectivo en una gran franja de tiempo del ciclo de manejo típico, emitan la mayor cantidad de material particulado posible.

## COMENTARIOS ADICIONALES

La emisión esperada de material particulado de cada una de las categorías de transporte público colectivo en un ciclo de manejo típico depende de la forma en que se distribuyen las frecuencias de ocurrencia de cada una de las fases en el ciclo de manejo típico y depende de los valores esperados de emisión en cada una de las fases. En el caso de la categoría B1 la emisión esperada en un ciclo de manejo típico es 257  $\mu\text{g/s}$ , en el caso de la categoría B2 la emisión esperada en un ciclo de manejo típico es 360  $\mu\text{g/s}$  y en el caso de la categoría MB la emisión esperada en un ciclo de manejo típico es 125  $\mu\text{g/s}$ . Esto indica que el impacto emisoro esperado en un ciclo de manejo típico es mayor a medida que se incrementa el tamaño del motor, pero no hay que olvidar que estas emisiones esperadas podrían reducirse si la frecuencia de las fases de aceleraciones negativas y dinámica se redujera en un ciclo de manejo típico.

A pesar de que la emisión esperada de material particulado en un ciclo de manejo típico es mayor para la categoría B2, es necesario tener en cuenta el factor de actividad anual de cada una de las categorías para determinar cual categoría trabaja más en el año y por lo tanto cual categoría emite más material particulado en un año. Según Rodríguez, el factor de actividad anual de los vehículos de servicio público colectivo es igual para todas las categorías y tiene una magnitud de 65.000 Km/año<sup>4</sup>. Esto indica que todas las categorías vehiculares trabajan igual en todo el año y su impacto emisoro frente a las otras categorías depende única y exclusivamente de su impacto emisoro esperado en un ciclo de manejo típico. Por lo tanto, la categoría B2 emite un 50% más que la categoría B1 y un 200% más que la categoría MB en un año típico.

---

<sup>4</sup> RODRIGUEZ, Paula. A. Actualización de l Inventario de Fuentes Móviles para la ciudad Bogotá a través de mediciones directas. Bogotá: Universidad de los Andes, 2009.

Por lo tanto, la solución al impacto emisor de los vehículos de servicio público colectivo propuesta para un estudio posterior consta de dos fases. La primera es disminuir las fases de aceleraciones negativas y dinámica en un ciclo de manejo típico. Esto se logra con la ubicación de paraderos de buses y la jerarquización de carriles. Si se privatiza un carril para uso exclusivo de servicio público colectivo y se ubican estaciones de bus obligadas, los vehículos presentan ciclos de manejo más cinemáticas, como en el caso de Transmilenio. La segunda fase consiste en disminuir el factor de actividad de los vehículos de la categoría B2. Si estos vehículos trabajan menos en el año, su impacto emisor anual disminuye. Al aplicar este par de soluciones las fases de máxima emisión en un ciclo de manejo típico pierden importancia y la categoría de mayor impacto emisor, la categoría B2, disminuye su impacto emisor anual.



**BIBLIOGRAFIA**

**BARRERA, Sergio.** *Introducción a la Problemática del Medio Ambiente.* Bogotá : Universidad de los Andes, 1999. pp. 311-313.

Diesel Engine Fundamentals. [En línea] [Citado el: 15 de Marzo de 2009.] [http://www.tpub.com/content/doe/h1018v1/css/h1018v1\\_25.htm](http://www.tpub.com/content/doe/h1018v1/css/h1018v1_25.htm).

**ESPINOSA, Mónica.** *Caracterización del Material Particulado en Vías de Transporte Público Colectivo y Masivo en Bogotá.* Bogotá: Universidad de los Andes, 2005.

**EUA, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2000.** *EUA. ENV Development of a Comprehensive Modal Emission Model.* California : National Cooperative Highway Research Program, 2000.

**EUA, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY.** [En línea] Office of Transportation and Air Quality. [Citado el: 3 de Marzo de 2009.] <http://www.epa.gov/otaq/models/moves/index.htm>.

**EUA, ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. 2004.** *Advance Technology Vehicle Modeling in PERE.* California : Office of Transportation and Air Quality, 2004.

*Microscale Emission Models Incorporating Acceleration and Deceleration* . **YI, G, HUALIANG, H y LEI, Y. 2004.** Mayo/Junio de 2004, Journal of Transportation Engineering, págs. 348-359.

*Regional driving characteristics, regional driving cycles.* **Lin, Jie y Niemeier, D A. 2003.** D 8, California : Pergamon, 2003, Transportation research, págs. 361-381.

**RODRIGUEZ, Paula. 2007.** *Actualizacion del inventario de emisiones para vehiculos operados con gasolina y gas natural en Bogota.* Bogota : Universidad de los Andes, 2007.

**RUIZ, Cristhian.** *Caracterización del Material Particulado en las Principales Vías de Transporte Público Colectivo y Masivo del Centro de Bogotá.* Bogotá: Universidad de los Andes, 2006.