

# PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ

## FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



PONTIFICIA  
**UNIVERSIDAD  
CATÓLICA**  
DEL PERÚ

### ESTUDIO DE LAS EMISIONES ATMOSFÉRICAS DE BUSES URBANOS CON MOTORES DIESEL EN LIMA Y CALLAO EN BASE A LA METODOLOGIA COPERT

Tesis para optar el Título de **Ingeniero Mecánico**, que presenta el bachiller:

**Eduardo Alfonso Carcelén Nava**

**ASESOR: Ing. Fernando Octavio Jiménez Ugarte**

**Lima, Octubre del 2014**

## Resumen

En este trabajo se calcularon las emisiones de buses con motores diesel en Lima y Callao de los contaminantes de CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, HCT y NOx. Los resultados fueron; 220,358 ton/año, 2,034 ton/año, 377 ton/año, 643 ton/año y 7,250 ton/año.

La metodología consistió en obtener una base de datos que representa la flota actual de transporte público de Lima y Callao, luego se obtuvieron factores de emisión para estimar los niveles de cada uno de los contaminantes, los cuales fueron seleccionados para cada tipo de vehículo por año de fabricación, por clase y después se aplicó a cada tipo de emisión los factores de corrección que correspondan.

Este trabajo consta de cuatro partes. La primera es una investigación sobre el origen de las emisiones en motores diesel, sus parámetros de formación y las tecnologías de reducción de emisiones en el sistema de escape. También se investigaron los Factores de emisión, por medio de los cuales se calculó los niveles de emisión generados de manera global. Finalmente se describió la legislación actual de Lima y Callao la comercialización del combustible diesel.

En la segunda parte se presentan las características de la flota de transporte a través de una muestra que representa el 11.1% de la flota total de Lima y Callao. El 72.2% del total de la flota vehicular son buses sin norma de emisión durante la fabricación (anteriores al año 1992) y los cuales contribuyen a más del 70% de las emisiones en Lima y Callao.

En la tercera parte se plantea el método de cálculo para estimar los niveles de emisión de cada vehículo según su clasificación por clase y por norma euro a la que pertenece. Dependiendo de cada contaminante se obtienen factores de corrección para llegar a los resultados finales, esto en base a factores de emisión de la metodología COPERT.

Finalmente se presentan tres escenarios de reducción del exceso de la flota actual y reemplazo de vehículos antiguos por nuevos fabricados bajo normas de emisión Euro III logrando reducciones de hasta 90%.

## Dedicatoria

Dedico este trabajo a mi madre Eliana y a mis abuelos; Alonso y Edilia.

Estaré eternamente agradecido por todo.



## Índice de contenido

<b>Índice de contenido</b> .....	iv
<b>Lista de símbolos</b> .....	vi
<b>Índice de figuras</b> .....	viii
<b>Índice de tablas</b> .....	xi
<b>Introducción</b> .....	1
<b>Capítulo 1: Descripción de las emisiones atmosféricas de motores diesel vehiculares</b> .....	2
1.1 Formación de emisiones en motores diesel .....	2
1.1.1 Formación de hidrocarburos no quemados (HCT) .....	3
1.1.2 Formación de monóxido de carbono (CO) .....	4
1.1.3 Formación de óxidos nitrosos .....	5
1.1.4 Formación de material particulado (PM <sub>10</sub> ) .....	6
1.1.5 Formación de dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> ) .....	7
1.2 Tecnologías de reducción de emisiones en motores diesel .....	8
1.2.1 Catalizadores de oxidación diesel .....	8
1.2.2 Sistemas SCR .....	9
1.2.3 Catalizadores de NO <sub>x</sub> .....	9
1.2.4 Trampas NO <sub>x</sub> .....	10
1.2.5 Filtros de partículas .....	11
1.3 Deterioro en motores diesel .....	12
1.4 Normas de emisiones europeas .....	17
1.4.1 Niveles de Emisiones tóxicas .....	18
1.5 Factores de emisión .....	18
1.6 Normas Peruanas .....	22
1.7 Efecto del contenido de biodiesel en emisiones de motores de encendido por compresión .....	23
1.7.1 Óxidos nitrosos .....	23
1.7.2 Material particulado (PM) .....	24
1.7.3 Hidrocarburos totales (HCT) .....	26
1.7.4 Monóxido de carbono .....	26
<b>Capítulo 2: Características de la flota de buses de transporte público con motores diesel en Lima y Callao</b> .....	31
2.1 Metodología para obtención base de datos .....	31

2.2	Base de datos obtenida .....	35
<b>Capítulo 3: Descripción de la metodología aplicada para el cálculo de emisiones a través de factores de emisión y factores de corrección.....</b>		
3.1	Contaminantes Considerados.....	49
3.2	Tipos de emisiones que son consideradas en los cálculos (tipos de descarga) .....	50
3.3	Desagregación de las emisiones totales.....	50
3.4	Metodología de cálculo de emisiones en caliente por tubo de escape .....	52
3.4.1	Recorrido anual promedio – $R_{\text{año}}$ y velocidad promedio de viaje.....	53
3.4.2	Factores de emisión ( $FE$ ).....	54
3.4.3	Emisiones de $CO_2$ .....	55
3.4.4	Factor de corrección por deterioro ( $FC_{\text{Det}}$ ) .....	55
3.4.5	Corrección por combustible .....	58
3.4.6	Corrección por porcentaje de Biodiesel.....	59
<b>Capítulo 4: Determinación del nivel de emisiones en Lima y Callao .....</b>		
4.1	Caso 1: Retiro de exceso de flota .....	78
4.2	Caso 2: Reemplazo de vehículos mayores a 15 años por buses Euro III..	82
4.3	Caso 3: Retiro de exceso de flota y reemplazo por Buses Euro III de los vehículos restantes con más de 15 años de antigüedad.....	86
<b>Conclusiones .....</b>		<b>92</b>
<b>Recomendaciones .....</b>		<b>93</b>
<b>Bibliografía.....</b>		<b>95</b>

## Lista de símbolos

PM <sub>10</sub>	Partículas sólidas cuyo diámetro es menor que 10 µm
CO	Monóxido de carbono
HCT	Hidrocarburos no quemados
NO <sub>x</sub>	Óxidos Nitrosos
A/C	Relación aire-combustible
C/A	Relación combustible-aire
O	Molécula de oxígeno
N <sub>2</sub>	Nitrógeno gaseoso
NO	Óxido de nitrógeno
H	Molécula de hidrógeno
OH	Grupo hidroxilo
EPA	Agencia de protección del medio ambiente
SCR	Reducción Catalítica Selectiva
BaNO <sub>3</sub>	Nitrato de bario
D2	Diesel N°2
NH <sub>3</sub>	Amoniaco
DPF	Filtro de partículas diesel
E	emisión de un contaminante
A	Velocidad de actividad
FE	Factor de emisión
ER	Eficiencia global de reducción de emisiones (%)
HBEFA	Manual de Factores de Emisión para Transporte por Carretera
B2	Mezcla Diesel 2 con 2% de Biodiesel
B5	Mezcla Diesel 2 con 5% de Biodiesel
B100	Mezcla Diesel 2 con 100% de Biodiesel
C12	Cadena de 12 átomos de carbono
C16	Cadena de 16 átomos de carbono

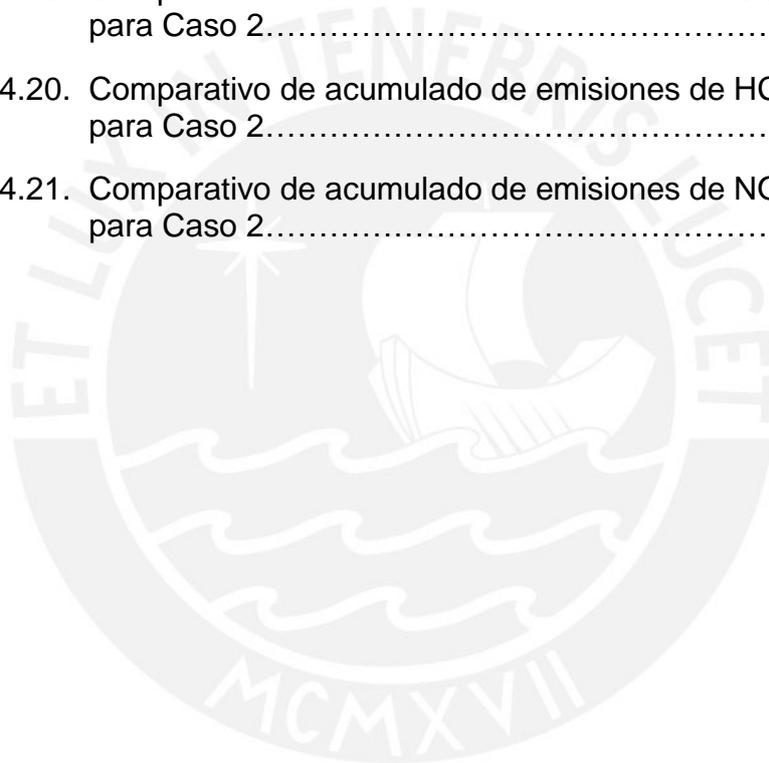
C18	Cadena de 18 átomos de carbono
MML	Municipalidad Metropolitana de Lima
GTU	Gerencia de transporte Urbano
$E_i$	Emisiones del contaminante “i” para la categoría vehicular “k”, (g/km)
$FE_{iKT}$	Emisiones del contaminante considerado “i”, para la categoría vehicular “k”, (g/km)
$R_{año}$	Recorrido anual promedio (km)
$FC_{Comb}$	Factor de corrección por composición del combustible local
$FC_{Det}$	Factor de corrección por deterioro vehicular
$FC_{BD}$	Factor de corrección por contenido de biodiesel en el combustible
$V_{prom}$	Velocidad promedio, (km/hr)
CC	Consumo de Combustible
r H:C	Relación entre el hidrogeno y carbono existente en el combustible 1.8 para gasolina; 2.0 para diesel
CN	Número de Cetano
S	Contenido de azufre, (ppm)
PAH	Contenido de aromáticos policíclicos, (%)
DEN	Densidad del combustible diesel a 15°C, (kg/m <sup>3</sup> )
VPE	Variación porcentual de emisiones (%)
Vol <sub>BD</sub>	Porcentaje en volumen de Biodiesel (%)
f	Coefficiente según tipo de contaminante
bsfc	Consumo específico de combustible
%B	Porcentaje de biodiesel

## Índice de figuras

Figura 1.1.	Relación entre la formación de HCT y Carga.....	4
Figura 1.2.	Relación entre la formación de CO y relación de C/A.....	5
Figura 1.3.	Transformación de productos de combustión en un catalizador de oxidación.....	9
Figura 1.4.	Configuración de un catalizador típico.....	11
Figura 1.5.	Sistemas de desactivación catalítica.....	17
Figura 1.6.	Ilustración de la variabilidad de resultados de ensayos de emisiones.....	22
Figura 1.7.	Incremento medio de emisiones NOx al aumentar el contenido de biodiesel.....	24
Figura 1.8.	Reducción en emisiones de material particulado al incrementar el contenido de biodiesel.....	25
Figura 1.9.	Reducción de las emisiones de HCT al incrementar el contenido de biodiesel.....	26
Figura 1.10.	Reducción de emisiones de CO al aumentar el contenido de biodiesel.....	27
Figura 2.1.	Diagrama de flujo para obtención de la base de datos.....	33
Figura 2.2.	Distribución de la muestra obtenida según año de fabricación.....	35
Figura 2.3.	Distribución de la muestra obtenida según edad.....	36
Figura 2.4.	Distribución de la muestra obtenida según año de fabricación.....	37
Figura 2.5.	Distribución de muestra obtenida según tipo de vehículo.....	38
Figura 2.6.	Distribución de muestra según norma de emisión Euro para motores Diesel.....	40
Figura 2.7.	Distribución de muestra según de edad para vehículos tipo vehículo.....	41
Figura 2.8.	Distribución según de edad para vehículos tipo Bus.....	41
Figura 2.9.	Distribución de muestra según de edad para vehículos tipo Minibus.....	42
Figura 2.10.	Distribución según de edad para vehículos tipo Minibus.....	42
Figura 2.11.	Distribución de muestra según de edad para vehículos tipo Microbus.....	43

Figura 2.12. Distribución según de edad para vehículos tipo Microbus.....	43
Figura 2.13. Distribución de la muestra obtenida según edad en el año de ingreso al sistema de transporte público.....	45
Figura 2.14. Distribución de la muestra por marca vehicular.....	46
Figura 3.1. Evolución de las emisiones según porcentaje de biodiesel....	59
Figura 3.2. Incremento del consumo específico de combustible al aumentar el contenido de biodiesel.....	61
Figura 3.3. Diagrama de flujo para el proceso de cálculo de emisiones....	64
Figura 4.1. Acumulado de emisiones de HCT para muestra obtenida.....	72
Figura 4.2. Acumulado de emisiones de PM <sub>10</sub> para muestra obtenida.....	73
Figura 4.3. Acumulado de emisiones de CO para muestra obtenida.....	73
Figura 4.4. Acumulado de emisiones de CO <sub>2</sub> para muestra obtenida.....	74
Figura 4.5. Acumulado de emisiones de NO <sub>x</sub> para muestra obtenida.....	74
Figura 4.6. Acumulado de emisiones de PM <sub>10</sub> para flota total.....	75
Figura 4.7. Acumulado de emisiones de CO para flota total.....	76
Figura 4.8. Acumulado de emisiones de HCT para flota total.....	76
Figura 4.9. Acumulado de emisiones de NO <sub>x</sub> para flota total.....	77
Figura 4.10. Acumulado de emisiones de CO <sub>2</sub> para flota total.....	77
Figura 4.11. Distribución de la flota total según año de fabricación al retirar exceso de flota.....	78
Figura 4.12. Comparativo de acumulado de emisiones de CO <sub>2</sub> para Caso 1.....	79
Figura 4.13. Comparativo de acumulado de emisiones de PM <sub>10</sub> para Caso 1.....	80
Figura 4.14. Comparativo de acumulado de emisiones de CO para Caso 1.....	80
Figura 4.15. Comparativo de acumulado de emisiones de HCT para Caso 1.....	81
Figura 4.16. Comparativo de acumulado de emisiones de NO <sub>x</sub> para Caso 1.....	81
Figura 4.17. Comparativo de acumulado de emisiones de CO <sub>2</sub> para Caso 2.....	83
Figura 4.18. Comparativo de acumulado de emisiones de PM <sub>10</sub> para Caso 2.....	84

Figura 4.19. Comparativo de acumulado de emisiones de CO para Caso 2.....	84
Figura 4.20. Comparativo de acumulado de emisiones de HCT para Caso 2.....	85
Figura 4.21. Comparativo de acumulado de emisiones de NOx para Caso 2.....	85
Figura 4.22. Comparativo de acumulado de emisiones de CO <sub>2</sub> para Caso 3.....	87
Figura 4.23. Comparativo de acumulado de emisiones de PM <sub>10</sub> para Caso 3.....	88
Figura 4.19. Comparativo de acumulado de emisiones de CO para Caso 2.....	88
Figura 4.20. Comparativo de acumulado de emisiones de HCT para Caso 2.....	89
Figura 4.21. Comparativo de acumulado de emisiones de NOx para Caso 2.....	89



## Índice de tablas

Tabla 1.1.	Limitaciones a las emisiones con motor Diesel.....	18
Tabla 1.2.	Comparación Porcentual de Conclusiones Respecto al Efecto del Biodiesel en el Motor.....	28
Tabla 2.1.	Datos de cantidad Flota total en Lima y Callao.....	32
Tabla 2.2.	Interpolación para el universo de vehículos de la MML.....	34
Tabla 2.3.	Distribución de la muestra por marca vehicular.....	46
Tabla 3.1.	Factores de deterioro anuales.....	56
Tabla 3.2.	Factor de corrección por combustible y propiedades del Diesel-2 Peruano.....	58
Tabla 3.3.	Coeficiente según tipo de contaminante.....	59
Tabla 3.4.	Porcentaje de cambio en emisiones por 5% de biodiesel en el combustible.....	60
Tabla 4.1.	Contribución de emisiones por intervalos años de fabricación en ton/año.....	68
Tabla 4.2.	Contribución de emisiones por intervalos años de fabricación %.....	69
Tabla 4.3.	Equivalencias entre bus Patrón y flota vehicular actual con más de 15 años de edad.....	82
Tabla 4.3.	Equivalencias entre bus Patrón y flota vehicular actual con más de 15 años de edad y exceso de flota.....	87

## Introducción

El parque automotor de Lima y Callao está creciendo rápidamente debido a la alta densidad demográfica y al crecimiento económico del país. Esto repercute en generar un sistema de tránsito caótico debido a que la infraestructura en la ciudad no está preparada para la gran cantidad de vehículos y la poca renovación del parque automotor. Además al tener un parque automotor con una antigüedad promedio de 22 años la contaminación en la ciudad causada por gases de combustión de los vehículos es elevada.

Debido a esta situación la Municipalidad de Lima en un intento de renovar y reducir la flota de buses urbanos para el transporte público, aprobó la ordenanza número 1538 para el congelamiento de la flota actual y la cual establece un bus patrón para la renovación de la flota de transporte público. Es por lo anterior que en el presente trabajo se determinarán los niveles de emisiones en Lima y Callao para tener una herramienta que permita evaluar distintos escenarios en la modificación de la flota vehicular de Lima y Callao.

El trabajo se basa en cuatro objetivos específicos. Primero se realiza una descripción de las emisiones de CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, HCT, CO y NO<sub>x</sub> dentro de un motor para entender su formación y control.

En segundo lugar se estudiarán las características de la flota vehicular de transporte público con motores diesel en base a una muestra del universo total obtenida en el mes marzo del 2013, la cual permitirá proyectarse hacia la flota entera de la ciudad.

El tercer objetivo es utilizar la metodología COPERT para el cálculo de emisiones a través de factores de emisión y aplicar factores de corrección adecuados para Lima y Callao. Finalmente como último objetivo del trabajo, se calculará el nivel de emisiones de la muestra obtenida proyectándolo a toda la flota de Lima y Callao, presentando tres escenarios de reducción y reemplazo de la flota actual y sus efectos en la cantidad de emisiones total por contaminante.

## Capítulo 1: Descripción de las emisiones atmosféricas de motores diesel vehiculares

En esta primera parte se va a profundizar en tres temas fundamentales, primero se explicará cómo es la formación de emisiones dentro de un motor diesel y cuáles son las tecnologías, componentes y parámetros del diseño de un motor que afectan la generación de emisiones contaminantes  $PM_{10}$ , CO, HCT y  $NO_x$  y también la cantidad de emisiones de  $CO_2$  que son liberadas en la atmósfera.

### 1.1 Formación de emisiones en motores diesel

A diferencia de motores de encendido por chispa donde la mezcla de aire combustible es predominantemente homogénea, la combustión en motores diesel es heterogénea por naturaleza. El combustible diesel es inyectado en el cilindro el cual contiene aire comprimido a una temperatura elevada.

Las emisiones se generan como resultado de la combustión de esta mezcla irregular, dependiendo no solo de las condiciones durante la combustión, sino también durante la expansión de potencia y especialmente en los momentos anteriores a la apertura de las válvulas de escape. [ref. 1.1]

La preparación de la mezcla durante el retardo de la combustión, calidad de inyección de combustible, diferentes temperaturas de combustión, expansión durante la combustión y en general el diseño del motor, son características que afectan de manera importante la formación de emisiones. En esencia la concentración de diferentes especies de emisiones en el sistema de escape es el resultado directo de su formación y de los sistemas auxiliares de reducción en el sistema de escape. [ref. 1.2]

Los productos derivados de la combustión incompleta, generados durante las etapas iniciales de la combustión, pueden llegar a ser oxidados después, durante la expansión del pistón. La mezcla de hidrocarburos no quemados con gases oxidantes, altas temperaturas de la cámara de combustión y un tiempo de adecuado para el proceso de oxidación permiten combustiones más completas. [ref. 1.3]

En la mayoría de casos, una vez que óxido nítrico es formado ya no puede ser descompuesto, particularmente en las zonas ricas de oxígeno en la cámara de combustión, sin embargo descomposición de NO puede ocurrir en zonas ricas en combustible a menos que más oxidación siga ocurriendo. [ref. 1.4]

### 1.1.1 Formación de hidrocarburos no quemados (HCT)

Hidrocarburos en los gases de escape de un motor diesel consisten en moléculas de combustible descompuestas o compuestos intermedios recombinados. Otra fuente de HCT es el aceite de lubricación. Estas fuentes pueden ser vinculadas mayormente a una excesiva o pobre mezcla de aire y combustible (A/C) o grandes gotas de combustible al final de la inyección. En general hidrocarburos no quemados están relacionados a la región de combustión rica en combustible, al centro de la atomización, porción de combustible inyectado en las paredes de la cámara, final de la inyección y la post-inyección. El diseño de los motores y variables de operación juegan un gran rol en la formación y oxidación de moléculas de hidrocarburos. Características como la Relación aire combustible, inyección secundaria, retardo en la inyección y el sistema de combustible disponible son parámetros del diseño del motor importantes para determinar la cantidad de HCT que serán formados como producto de combustión. También la incorporación del turbocompresor en motores modernos generan mayores turbulencias durante la mezcla, esto conlleva a mejores mezclas, tasas más altas de reacción y oxidación, resultando en temperaturas de combustión mayores reduciendo la concentración de HCT. [ref. 1.5]

Un factor que modifica la cantidad de emisiones liberadas a la atmósfera es el efecto de la cantidad de carga que se le pone a un motor. Mientras que la carga incrementa, disminuye la formación de HCT debido a que las temperaturas dentro de la cámara de combustión aumentan generando

mayores velocidades de combustión. [ref. 1.6] En la siguiente gráfica podemos observar como la emisión de HCT disminuye a mayor carga.

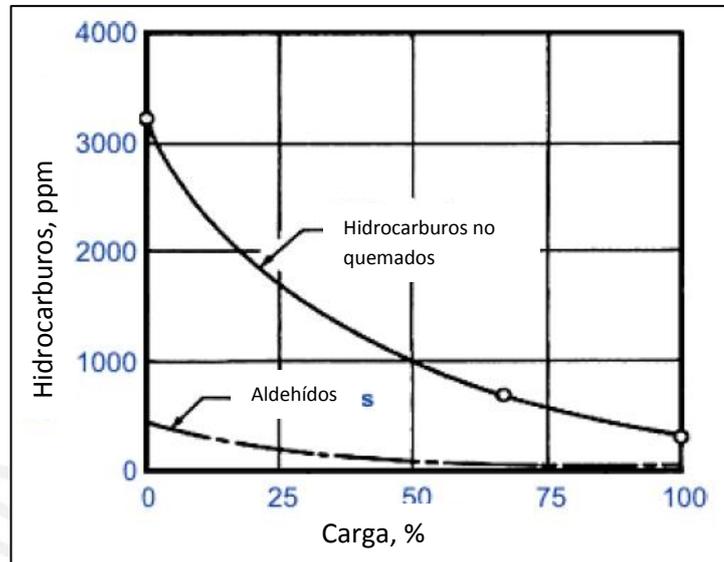


Figura 1.1: Relación entre la formación de HCT y Carga [ref. 1.7]

### 1.1.2 Formación de monóxido de carbono (CO)

Monóxido de carbono (CO) es un producto intermedio en la combustión de hidrocarburos, es formado mayormente debido a combustión incompleta, la cual es provocada por falta de oxidantes, temperatura y retardo en la inyección. Mientras la combustión se lleva a cabo, la oxidación de CO a CO<sub>2</sub> ocurre a través de reacciones de recombinación entre CO y otros oxidantes. Si estas reacciones son incompletas debido a falta de oxidantes o bajas temperaturas, CO quedará sin terminar su proceso de transformación. La combustión de mezclas ricas en combustible produce altos niveles de emisiones de CO, sin embargo debido a que la combustión en motores diesel es rica en aire, estos producen niveles bajos de CO. [ref. 1.8]

Debido a las varias etapas en la combustión, las condiciones que promueven altas temperaturas, alto contenido de oxígeno y buenas mezclas son las responsables de la oxidación de CO a CO<sub>2</sub>. Pero, el principal parámetro que afecta esta formación es una baja relación de combustible:aire. [ref. 1.9]

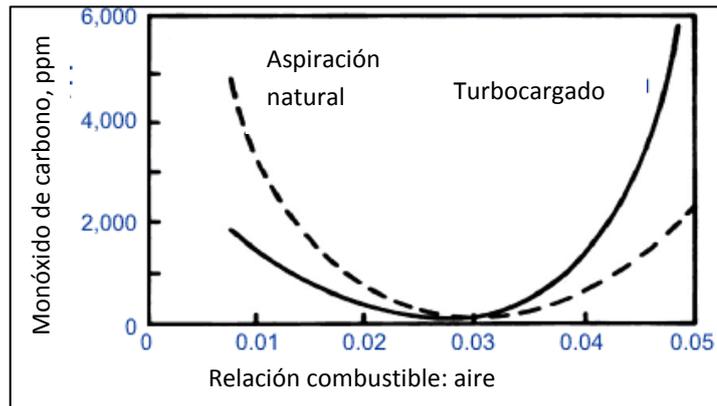


Figura 2.2: Relación entre la formación de CO y relación de C/A [ref. 1.10]

### 1.1.3 Formación de óxidos nitrosos

El mecanismo térmico, conocido como mecanismo extendido de Zeldovich, es el responsable de la mayoría de emisiones  $\text{NO}_x$  en motores diesel convencionales. Las tres reacciones térmicas que son importantes para este mecanismo son [ref. 1.11]:

1.  $\text{O} + \text{N}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{N}$
2.  $\text{N} + \text{O}_2 \leftrightarrow \text{NO} + \text{O}$
3.  $\text{N} + \text{OH} \leftrightarrow \text{NO} + \text{H}$

La velocidad de reacción total para este mecanismo es relativamente lenta y muy sensible a la temperatura. Como consecuencia,  $\text{NO}_x$  aparece en cantidades significativas después del comienzo de liberación de calor, es por esto que este mecanismo es muy importante de considerar a altas temperaturas y relaciones de A/C cercanas a la estequiometría. Entonces la formación de  $\text{NO}_x$  es acelerada rápidamente mientras que la temperatura aumenta a valores mayores de 2000K.

Otro mecanismo de emisión de  $\text{NO}_x$  es a través de  $\text{N}_2\text{O}$ . A presiones elevadas, átomos de oxígeno reaccionan con  $\text{N}_2$  resultando en la formación de  $\text{NO}_x$  a través de una reacción de tres cuerpos. [ref. 1.12]



Donde “M” es cualquier otro tipo de molécula necesaria para remover la energía y para completar la reacción. Es importante denotar que estas reacciones de tres cuerpos son sensibles a la presión por lo tanto su importancia se incrementa a elevadas presiones.

En este caso el diseño de los motores y variables de operación son responsables directas de la formación de emisiones de tipo  $NO_x$ . Características como relación aire combustible, presión durante la apertura de los inyectores, el retardo en la inyección, la turbulencia en la admisión de aire y el número de cetano del combustible son factores importantes para determinar la cantidad de  $NO_x$  que serán formados como producto de combustión.[ref. 1.13]

#### 1.1.4 Formación de material participado ( $PM_{10}$ )

Este tipo de emisiones se pueden definir como cualquier material sólido en el sistema de escape de un motor diesel de combustión interna que puede ser retenido por un filtro a  $52^\circ C$  o menos. La 'partícula' es un término que se emplea para describir cualquier material sólido o líquido dividido finamente, que es dispersado y arrastrado por el aire y que tiene un tamaño que varía entre  $0.0002$  y  $500 \mu m$ . Existen dos tipos de partículas que se monitorean como resultado de la combustión en motores diesel:  $PM_{2.5}$  y  $PM_{10}$ . Según experimentos realizados como en la ciudad de Medellín, Colombia, la cantidad de hollín emitido por motores puede ser precedido a través de los datos obtenidos de emisiones de  $PM_{10}$ . Esta es la razón por la cual en este trabajo se van a utilizar los factores de emisión para  $PM_{10}$ . [ref. 1.14]

En general, material particulado se origina del material orgánico e inorgánico que ingresa al motor. Uno de los componentes principales de PM es material carbonoso que resulta de la combustión heterogénea en un motor diesel. Pequeñas partículas se forman como resultado de difusión y flamas durante el premezclado. Una de las causas de material carbonoso es la combustión incompleta de la mezcla.

Un ejemplo de esto es la formación de hollín, en otras palabras material carbonoso resulta de una combustión pobre. Esto aumentará cuando más combustible es inyectado después del comienzo de la ignición. Otra posibilidad es que una gran porción del combustible no se llegue a mezclar adecuadamente durante el periodo de retraso de la ignición. Para reducir lo anterior se puede incrementar el número de cetano, incrementar la relación de compresión que provee mayor calor para evaporar el combustible inyectado para que se evapore rápidamente y se mezcle con el aire. Otras Fuentes de emisiones PM son

- Tierra en el aire
- Material inorgánico en el combustible o sus aditivos
- Metales de los componentes del motor [ref. 1.15]

#### 1.1.5 Formación de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>)

El dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) existe naturalmente en la atmósfera y es un producto normal de la combustión. Idealmente, la combustión de un combustible hidrocarburo debe producir solo dióxido de carbono y agua. La proporción relativa de estos dos depende de la relación carbono-hidrógeno en el combustible, alrededor de 1:1,75 para diesel común. Sin embargo, las emisiones de CO<sub>2</sub> provenientes del motor pueden reducirse mediante la reducción del contenido de carbono por unidad de energía, o por mejoramiento de la eficiencia del combustible en el motor. La alta eficiencia del motor diesel le da una ventaja ambiental sobre otros combustibles fósiles.

Como un inevitable punto final de la combustión, el CO<sub>2</sub> no puede ser reducido mediante medidas de post-tratamiento (como los convertidores catalíticos). Es más, la oxidación catalítica del CO y HCT puede incrementar las emisiones de CO<sub>2</sub> levemente. [ref. 1.16]

## 1.2 Tecnologías de reducción de emisiones en motores diesel

Existen diversos mecanismos para reducir la cantidad de emisiones contaminantes de un motor. A continuación veremos algunas de las formas tanto en el sistema de escape como en otros componentes del motor para lograr reducciones importantes.

### 1.2.1 Catalizadores de oxidación diesel

En la mayoría de aplicaciones, un catalizador de oxidación diesel consiste en una estructura de acero inoxidable que contiene una construcción en forma de panel llamada sustrato o soporte del catalizador. No existen partes en movimiento, simplemente una gran cantidad de área superficial interior. Estas áreas están revestidas con un metal catalítico como el platino o paladio. Es llamado un catalizador oxidante porque este dispositivo convierte los contaminantes de los gases de combustión en gases inofensivos para los seres humanos por medio de oxidación química. En el caso de gases de combustión de motores diesel, los catalizadores oxidan monóxido de carbono (CO), material particulado (PM), e hidrocarburos no quemados (HCT). Los hidrocarburos líquidos absorbidos por partículas de carbón en los gases de combustión son convertidos en estos catalizadores por oxidación en dióxido de carbono y agua. [ref. 1.17]

Estos catalizadores han demostrado mucha efectividad para reducir material particulado en vehículos antiguos, especialmente en el programa organizado por la EPA en los Estados Unidos, de reconstrucción de buses urbanos. Se demostró que pueden llegar a reducir un 25% en emisiones de PM en estos vehículos. [ref. 1.18]

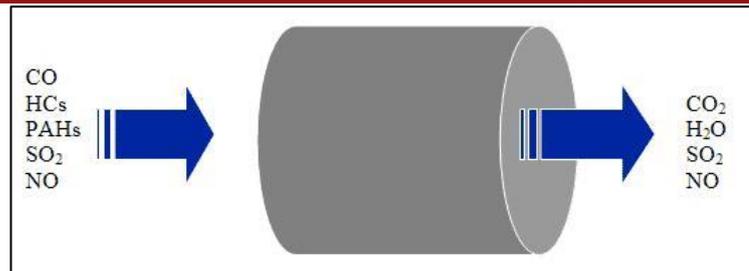


Figura 1.3: Transformación de productos de combustión en un catalizador de oxidación [ref. 1.19]

### 1.2.2 Sistemas SCR

Una reducción catalítica selectiva o SCR por sus siglas en inglés, es un sistema que utiliza un recubrimiento cerámico o metálico, o un reductor químico para convertir óxidos nitrosos en nitrógeno y oxígeno. En fuentes móviles es más utilizada como agente reductor una solución acuosa de úrea. Debido a la descomposición térmica en el sistema de escape, úrea se descompone en amonio que sirve como reductor. Mientras los gases de escape atraviesan el sistema SCR, ocurren reacciones de reducción de compuestos NO<sub>x</sub> a nitrógeno y agua. Este sistema puede ser combinado con un filtro de partículas para obtener un efecto de reducción de PM y NO<sub>x</sub>. Como todo sistema basado en tecnología catalítica, su desempeño depende directamente en la utilización de combustible con muy bajo contenido de azufre. [ref. 1.20]

### 1.2.3 Catalizadores de NO<sub>x</sub>

Controlar emisiones NO<sub>x</sub> de un motor diesel es altamente difícil porque motores diesel están diseñados, como la mayoría de motores, para funcionar con una mezcla muy rica en oxígeno, esta atmósfera rica en oxígeno en el sistema de escape genera dificultad para químicamente reducir emisiones tipo NO<sub>x</sub> a nitrógeno puro. La conversión de NO<sub>x</sub> a nitrógeno puro en el sistema de escape requiere un agente reductor y bajo condiciones típicas de operación del motor, las cantidades del agente reductor presentes no llegan a ser suficientes para convertir la mayoría del NO<sub>x</sub> en N<sub>2</sub>.

Algunos de los sistemas de Catalizadores NO<sub>x</sub>, inyectan una pequeña cantidad de combustible diesel u otro agente reductor en el sistema de escape, antes del catalizador. El combustible o hidrocarburo sirve para la conversión catalítica de NO<sub>x</sub> a N<sub>2</sub>. Otros sistemas operan sin agregar ningún agente reductor como combustible pero a bajas tasas de conversión. Este sistema usualmente incluye material metálico poroso fabricado de zeolita (material micro poroso con una estructura de conductos altamente ordenada), además de un metal precioso o base para el catalizador. Las zeolitas proporcionan lugares microscópicos los cuales son ricos en combustibles/hidrocarburos donde reacciones de reducción pueden ocurrir. Actualmente las eficiencias pico de conversión de NO<sub>x</sub> está alrededor de 10 a 30 por ciento (para niveles razonables de consumo de diesel como agente reductor). [ref. 1.21]

#### 1.2.4 Trampas NO<sub>x</sub>

Otro tipo de catalizador que se está desarrollando para motores diesel es conocido como trampas NO<sub>x</sub> debido a que funcionan atrapando NO<sub>x</sub> en forma de un metal de nitrato durante la operación del motor. El compuesto más común usado para capturar NO<sub>x</sub> es hidróxido de bario o carbonato de bario. Bajo las condiciones de exceso de aire, NO<sub>x</sub> reacciona para formar N<sub>2</sub> sobre un catalizador de platino seguido de una reacción con el compuesto de bario para formar BaNO<sub>3</sub>. Sin embargo después de un tiempo de funcionamiento, el dispositivo se termina saturando y debe ser regenerado. Esto es comúnmente realizado por el mismo motor en operación a través de un modo de enriquecer la mezcla de aire-combustible con combustible por un corto periodo de tiempo para facilitar la conversión del compuesto de bario otra vez a su estado oxigenado o carbonizado restándole el NO<sub>x</sub> absorbido para formar N<sub>2</sub> o NH<sub>3</sub>. [ref. 1.22]

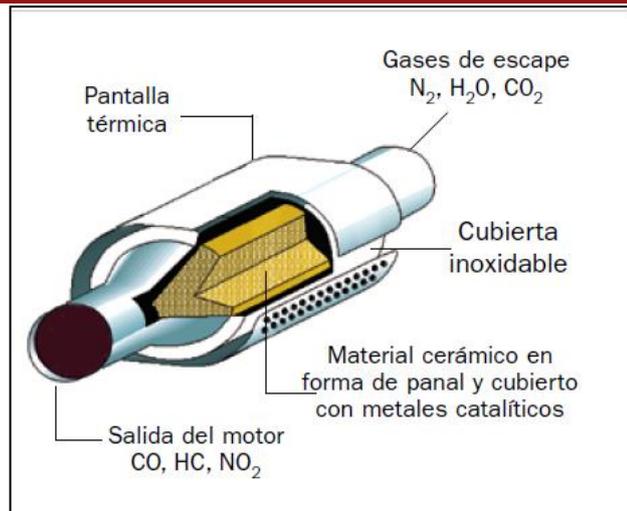


Figura 1.4: Configuración de un catalizador típico [ref. 1.23]

### 1.2.5 Filtros de partículas

Los filtros de partículas remueven material particulado en el sistema de escape de motores diesel. Para estos filtros (DPF; siglas en inglés) existen en una variedad de tipos dependiendo del nivel de filtración requerido. La forma más simple de remoción de partículas es alcanzada utilizando un catalizador de oxidación. Filtros pueden ser de flujo parcial o completo o de flujo a través de paredes los cuales alcanzan la mayor eficiencia de filtración. [ref. 1.24]

El primer nivel de filtración puede ser alcanzado utilizando estos tipos de filtros para material particulado. En este tipo de sistemas, el elemento filtrante puede ser fabricado de una variedad de materiales y diseños tales como, metal sinterizado (tratamiento térmico de un polvo o compactado metálico o cerámico a una temperatura inferior a la de fusión de la mezcla, para incrementar la fuerza y la resistencia de la pieza creando enlaces fuertes entre las partículas), mallas metálicas, o un metal reticulado o una estructura de espuma cerámica. En este tipo de sistemas los gases de escape y por ende el PM fluyen a través de un camino complicado, así la filtración parcial ocurre mientras que partículas chocan con las áreas rugosas del sistema enmallado. Estos filtros parciales pueden ser catalíticos

o no catalíticos, y son menos propensos a obstrucciones como los filtros de flujo a través de paredes que se describirán a continuación. [ref. 1.25]

Para poder satisfacer las estrictas normas de emisiones de material particulado para vehículos diesel comerciales, filtros de gran eficiencia son requeridos. Estos son comúnmente fabricados de materiales cerámicos como cordierita (piedra preciosa), titanato de aluminio, porcelanita o carburo de silicio. La base para el diseño de este tipo de filtro es una estructura tipo panel con canales alternantes colocados en ambos extremos.

Debido a que filtros se saturan con el tiempo desarrollando una capa de partículas retenidas en sus superficies interiores, se ha diseñado estos sistemas para que puedan quemar o remover todo el material particulado acumulado y entonces regenerando el mismo filtro. Una manera muy conveniente para poder eliminar este material filtrado es quemándolo u oxidándolo en el mismo filtro cuando la temperatura en el sistema de escape sea adecuada para este propósito. Si se quema el material atrapado, el filtro es limpiado o regenerado a su estado original. La frecuencia de regeneración es determinada por la cantidad de carboncillo dentro del mismo filtro que resulta en un aumento de presión en la entrada de este. Para facilitar la descomposición de la partículas, un catalizador es utilizado ya sea en la forma de una capa en el filtro o un catalizador es añadido al combustible.

Para algunas aplicaciones o ciclos de operación, el sistema de escape nunca alcanza altos niveles de temperatura para oxidar completamente el carboncillo presente, a veces ni aunque existe un catalizador de por medio. En estos casos se emplea una regeneración activa, la cual utiliza un quemador de combustible o una resistencia eléctrica. Durante la regeneración externa, el filtro es removido del vehículo y calentado en una atmosfera controlada. [ref. 1.26]

### 1.3 Deterioro en motores diesel.

El deterioro en cualquier motor de combustión interna tiene factores muy complejos de determinar, siendo uno de los principales factores el mantenimiento periódico que el usuario debe ejecutar así como también la calidad y características del aceite utilizado, filtros de aceite, calidad en el combustible y los filtros en el sistema de combustible. Si bien este trabajo no está enfocado a analizar el desgaste dentro de un motor diesel, es importante conocer donde ocurre el desgaste que repercutirá en las emisiones del motor.

Teniendo en cuenta la relación deterioro – emisiones para motores diesel se puede identificar los principales componentes que al deteriorarse causarán un cambio negativo en la formación de emisiones dentro de él.

En primer lugar el deterioro en el sistema de admisión de aire puede ser causado debido a desgaste de las uniones en las tuberías o sellos el cual generaría que el flujo de aire no atravesase el filtro. Aire no filtrado generará que material particulado entre a la cámara de combustión aumentando emisiones de PM. Sin embargo, cuando es un motor turbocargado, desgaste en el turbocompresor tal como daños en las hélices, o desajustes de estas por el tiempo de uso puede causar poca elevación de la masa de aire creando una mezcla más rica en combustible. Además la turbulencia disminuirá, reduciendo la calidad de la mezcla restante y una menor compresión del motor. Esto genera que la potencia disminuya aumentando el consumo de combustible, mayor inyección de combustible. [ref. 1.27]

El desgaste por uso del motor se genera por dos aspectos principales: contaminación y lubricación menos que ideal en el arranque. Cada vez que un motor arranca, éste debería tener una película de aceite que ha quedado en todas las partes con movimiento relativo, hasta que el sistema de aceite empieza a generar la presión apropiada. Si existe contaminación en el aceite por algún agente externo o por exceso de uso estos actúan como un agente abrasivo que desgasta componentes como los cojinetes, pistones, anillos, el cigüeñal, válvulas, asientos, guías, etc. Si no se tiene un buen manejo de los tiempos de mantenimiento, todas las partes antes mencionadas que están sometidas a fuerza de fricción durante el funcionamiento del motor, sufrirán mayores desgastes. [ref. 1.28]

Teniendo claro que siempre existirá desgaste por funcionamiento, este se puede ver agravado debido a problemas en el sistema de refrigeración del motor, o lubricación. Por ejemplo, la excesiva contaminación con carbón debido al tiempo de uso, tupe los rociadores de enfriamiento del pistón por aceite aumentando bruscamente la temperatura de los pistones los que se dilatan excesivamente y comienza un proceso acelerado de desgaste, inclusive puede trancar los pistones muy rápidamente al fallar el flujo de aceite. [ref. 1.29]

Lo antes expuesto al pasar el tiempo se traduce en que las tolerancias de las partes van incrementándose. Conforme las partes comienzan a desgastarse, habrán fluctuaciones en la presión de aceite que se generan por las mayores tolerancias internas del motor, humo y una pérdida de potencia que resultan en problemas de sellado de los anillos de pistón y la pérdida de la presión de combustión. Conforme aumentan las tolerancias principales, se podrá notar también un cambio en el ruido de operación del motor, cuando partes como los cojinetes de biela y bancada, varillas levanta válvulas, válvulas, y pines de pistón experimentan mayor holgura debido al desgaste. A la vez, hay otros signos más sutiles, incluyendo múltiples de escape húmedos, que pueden indicar que el aceite está rebasando los anillos de pistón debido a tolerancias excesivas, consumo excesivo de aceite y disminución en la economía de combustible.

Otro componente que también sufre desgaste por el kilometraje acumulado es el sistema de inyección. Ya sea de inyector – bomba o un sistema de riel común, los inyectores se ven afectados debidos principalmente a la calidad del combustible. En los inyectores diesel los problemas más comunes son el bloqueo de la aguja, y la suciedad en el asiento de la tobera, la obstrucción de los orificios y pérdida de presión.

El deterioro en el sistema de escape ya no es responsable de la formación de emisiones pero si de la limpieza de estas. El filtro de partículas sólo funciona a partir de altas temperaturas, mayores a 300 grados centígrados, por lo que puede presentar problemas de limpieza, eliminación de las

partículas, en las condiciones de funcionamiento en las que no se alcanzan [ref. 1.30]:

- Utilización exclusiva en ciudad
- Utilización a velocidades inferiores a 60 kilómetros por hora
- Cortos recorridos

En estos casos las partículas no son eliminadas al no producirse la regeneración y quedan dentro del filtro. Ello impide la salida de los gases de escape, por lo que se podría detectar una pérdida de potencia del motor, que va aumentando a medida de que el filtro se va llenando de partículas, dando lugar a un mayor consumo de combustible. Una elevada concentración de partículas en el filtro da como resultado tener que efectuar una limpieza "forzada" del filtro. A veces esta limpieza se puede realizar circulando por carretera, o autopista, a velocidades superiores a 60 kilómetros.

La actividad de los catalizadores de tres vías se asegura por la estructura altamente porosa, con una gran área superficial, donde se encuentran los metales nobles. Sin embargo, tiende a disminuir con el tiempo y con el uso, debido, principalmente, a la pérdida de superficie activa y a la disminución de la dispersión de los metales nobles. Las principales causas de su desactivación están relacionadas con las severas condiciones de operación a las que están sometidos, pero también influyen las propiedades de los combustibles utilizados. Suelen clasificarse en tres grupos, térmicas, químicas y mecánicas, y pueden aparecer separadamente o en combinación, pero el efecto neto es siempre la pérdida de actividad catalítica.

La desactivación mecánica implica fracturas físicas o el agotamiento del material catalítico y es irreversible. En cuanto a la desactivación térmica, ocurre debido a que el sustrato y los metales activos se ven afectados en el rango de variación de la temperatura de operación (20-850°C). Se producen cambios cristalográficos en los constituyentes del sustrato, interacciones entre sustrato y metales activos, aleaciones, etc., que reducen el número de sitios activos del catalizador y por lo tanto su actividad. Además, estos

cambios térmicos, junto con el efecto del flujo de las partículas de la corriente gaseosa, promueven la pérdida mecánica de material. Al igual que la desactivación mecánica, la térmica es normalmente irreversible, aunque en algunos casos esta última puede revertirse mejorando la dispersión de los metales en la superficie.

Sin embargo, a diferencia de las anteriores, la desactivación química es reversible. Debido a que se produce como consecuencia del envenenamiento de los sitios activos del catalizador por impurezas (compuestos contaminantes presentes en las emisiones gaseosas), si éstas se retiran, el catalizador recupera su actividad. [ref. 1.31]

Finalmente, cabe indicar que, aunque la escala de tiempo para la degradación depende de factores como las condiciones de conducción, el tipo de combustible, etc., suele considerarse que, aproximadamente, el tiempo de vida de los catalizadores es de 100.000 km o 5 años aproximadamente. Por otro lado, la aparición de cada uno de los tres fenómenos de desactivación descritos, aunque depende de varios factores y se da durante toda la vida útil del catalizador, ocurre a diferentes escalas de tiempo. Por ejemplo, el fenómeno de desactivación química es proporcional al tiempo de operación, mientras que los efectos causados por las altas temperaturas decaen de forma exponencial con el tiempo. Además, el caso de la desactivación total por roturas mecánicas se considera un evento puntual, mientras que el desgaste físico del material catalítico va ocurriendo de forma gradual.[ref. 1.32]

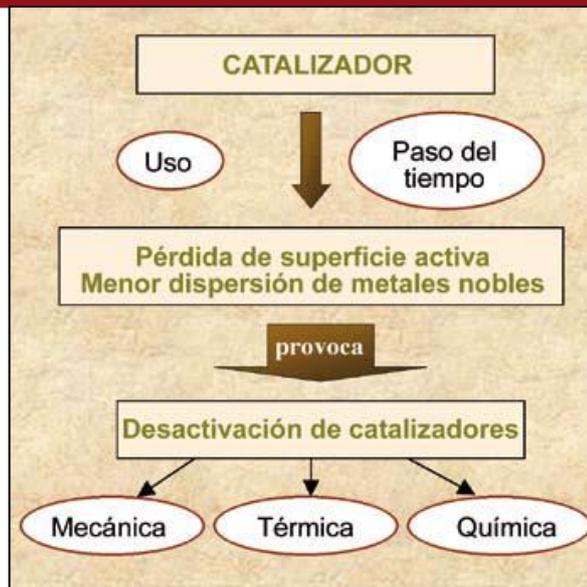


Figura 1.5: Sistemas de desactivación catalítica [ref. 1.33]

#### 1.4 Normas de emisiones europeas

Estas definen los límites aceptables para las emisiones de vehículos nuevos vendidos en la unión europea. Las normas de emisiones son definidas un una serie de directivas de la unión europea siendo más severas al pasar el tiempo.

Actualmente, emisiones de óxidos nitrosos ( $\text{NO}_x$ ), hidrocarburos totales (HCT), monóxido de carbono (CO) y material particulado (PM) son reguladas para la mayoría de tipos de vehículos comerciales incluyendo automóviles, trenes, tractores y maquinaria similar con la excepción de vehículos marítimos y aviones. Para cada tipo de vehículo, diferentes normas aplican. La conformidad de las normas es determinada con pruebas a motores en ciclos estandarizados. Los vehículos que no estén en conformidad con estas normas no pueden ser vendidos en la unión europea, sin embargo las normas no aplican a vehículos que ya están circulando. No existe un uso obligatorio de alguna tecnología para poder cumplir las normas. Es importante recalcar que cuando una norma nueva es elaborada es considerada la tecnología existente.

### 1.4.1 Niveles de Emisiones tóxicas

Los niveles de emisiones tóxicas se estandarizan como Euro 1, Euro 2, Euro 3, Euro 4 y Euro 5 para normas de vehículos livianos, sin embargo las normas para vehículos de trabajo pesado utilizan números romanos (Euro I, Euro II, etc.). En la siguiente tabla podemos observar una cronología por año de las normas y sus límites máximos para cada contaminante para motores diesel en unidades de gr/km.

	válido a partir de	CO (g/km)	HCT (g/km)	NOx (g/km)	PM (g/km)
Euro I	1992	3.16	-	-	0.14
Euro II	1996	1	0.15	0.55	0.08
Euro III	2000	0.64	0.06	0.5	0.05
Euro IV	2005	0.5	0.05	0.25	-

Tabla 1.1: Limitaciones a las emisiones con motor Diesel [ref. 1.34]

### 1.5 Factores de emisión

Si bien se ha visto a lo largo de este capítulo como se forman las emisiones contaminantes y también como se logran reducir a través de parámetros en el diseño de motores diesel y de las tecnologías en los sistemas de escape, el alcance de este trabajo es poder determinar el nivel de emisiones de la flota de transporte público de buses con motores diesel de la Ciudad de Lima y Callao. Para esto se van a utilizar Factores de emisión.

Un factor de emisión es un valor representativo que relaciona la cantidad de emisión liberada a la atmósfera de cierta actividad asociada a la liberación de dicha emisión. Estos factores son expresados usualmente como el cociente entre el peso del contaminante y una unidad de peso, volumen,

distancia o duración de la actividad asociada a la emisión del contaminante.  
[ref. 1.35]

La ecuación general para la estimación de un tipo de emisión es [ref. 1.36]:

$$E = AxFE_x(1 - \frac{ER}{100}) \quad (1.1)$$

Dónde:

E = emisión, (g/km)

A = velocidad de la actividad, (km/hr)

FE = factor de emisión (g/km)

ER = eficiencia global de reducción de emisiones, %.

Sin embargo existen muchos tipos de inventarios de factores de emisión ya que hay distintas maneras de generarlos pero no todas son confiables.

Las emisiones de los vehículos dependen de muchos parámetros. Modelos de emisiones son usados para realizar cálculos de emisiones de transporte. Según el estudio “Road vehicle emission factors development: A review, 2013” se proponen 5 categorías principales de acuerdo al tipo ingreso de información, estas van desde modelos que solo requieren una velocidad promedio para estimar el nivel de emisión (ej. COPERT, EMFAC) y modelos que necesitan ingresar la situación del tráfico vehicular (ej. HBEFA). También modelos que requieren segundo a segundo el estado del motor o del vehículo para derivar en un perfil completo de conducción. Independientemente de que modelo se utilice, cada uno de ellos proporciona factores de emisión apropiados. [ref. 1.37]

Factores de emisión vehiculares son relaciones funcionales que predicen la cantidad de algún contaminante que es emitida por distancia recorrida, energía consumida o por cantidad de combustible utilizado. FEs comúnmente son derivados de categorías vehiculares las cuales dependen de varios parámetros como las características del vehículo y la tecnología de

control de emisiones, especificaciones del combustible y condiciones de operación. [ref. 1.38]

La aplicación de cada modelo de FEs para vehículos dependen de la representatividad de los FEs que contiene el modelo, es decir la precisión con la cual el modelo de FEs elegido puede describir el nivel actual de emisión de un tipo vehículo en particular.

En este trabajo se va a utilizar el modelo COPERT. Este modelo tiene la ventaja de que en su documentación deja conocer las ecuaciones que relacionan el tipo de vehículo y la velocidad promedio con el factor de emisión, siendo además la base de todos los estudios realizados en Chile, país cuyo parque automotriz ha sido estudiado y del cual se ha obtenido resultados utilizando los FEs de este modelo [ref. 1.39]

El inventario de factores de emisión a utilizarse (g/km) provienen de la literatura internacional, se ha obtenido la información de sus versiones II y III del modelo COPERT, modelo de estimación de emisiones vehiculares de la Agencia Europea del Ambiente, tiene la ventaja de que los factores de emisión registrados en su documentación metodológica están expresados como ecuaciones que relacionan la tasa de emisión de un vehículo con su velocidad media de circulación. Esta metodología utilizada dentro de este modelo será la base de este trabajo.

Según el trabajo "Road vehicle emission factors development: A review, 2013", FEs basados en la velocidad promedio de la flota vehicular sujeta a estudio sí es representativa si se desea estimar emisiones a un nivel nacional. Las emisiones de vehículos pueden ser medidas bajo condiciones controladas en laboratorios. Los resultados son obtenidos utilizando dinamómetros para motores o para chasis. En estos casos, los operadores controlan el ciclo de prueba de cada vehículo, los factores ambientales y otros parámetros, realizando repeticiones necesarias para obtener resultados fidedignos.

En el caso del modelo COPERT se utilizan dinamómetros de chasis para generar los FE. Estos simulan la resistencia impuesta en los neumáticos de un vehículo. Consisten en un dinamómetro que es acoplado a través de

engranajes a las ruedas del vehículo o de lo contrario a rodillos sobre los cuales el vehículo es puesto y pueden ser regulados para simular la resistencia al conducir.

Durante estas pruebas, el vehículo se mantiene estacionario mientras un conductor lo opera de acuerdo a un perfil de tiempo-velocidad. El conductor del vehículo intenta reproducir velocidades de diferentes ciclos de conducción. Estos son perfiles predefinidos que el vehículo tiene que ser conducido. Duran varios minutos y a menudo comprenden diferentes etapas en un mismo ciclo de conducción que representan diferentes condiciones de manejo (ej. Urbano o en carretera)

Pruebas de chasis en dinamómetros podría decirse que es la tecnología que con la cual mejor se pueden estimar emisiones de vehículos habiendo logrado un gran nivel de estandarización. Para poder obtener FEs confiables se deben realizar un gran número de pruebas a gran cantidad de vehículos repetidas veces.

Una vez obtenidos los resultados del dinamómetro de diferentes ciclos de conducción con respecto a una velocidad promedio o algún otro parámetro cinemático y luego generar una tendencia polinomial utilizando una regresión matemática, la fórmula resultante es el FE que expresa la emisión del vehículo como función de un parámetro definido (en el caso del modelo COPERT se utiliza la velocidad promedio). [ref. 1.40]

En la figura 1.6 se pueden observar los resultados de emisiones  $\text{NO}_x$  de más de 41 distintos ciclos de conducción para 15 diferentes vehículos Diesel Euro 4 de similar capacidad de motor y los cuales han sido resumidos como función de la velocidad promedio del ciclo. Podemos apreciar los valores promedio, máximos y mínimos obtenidos en las pruebas de emisiones de los vehículos, esto ilustra la variabilidad de los niveles de emisión de acuerdo a cada clase vehicular y también la variabilidad del valor promedio del nivel de emisión para distintos ciclos con velocidades promedios similares. La variabilidad es mucho mayor para  $\text{CO}$ , HCT y menores para  $\text{CO}_2$  y consumo de combustible de lo que es para  $\text{NO}_x$ .

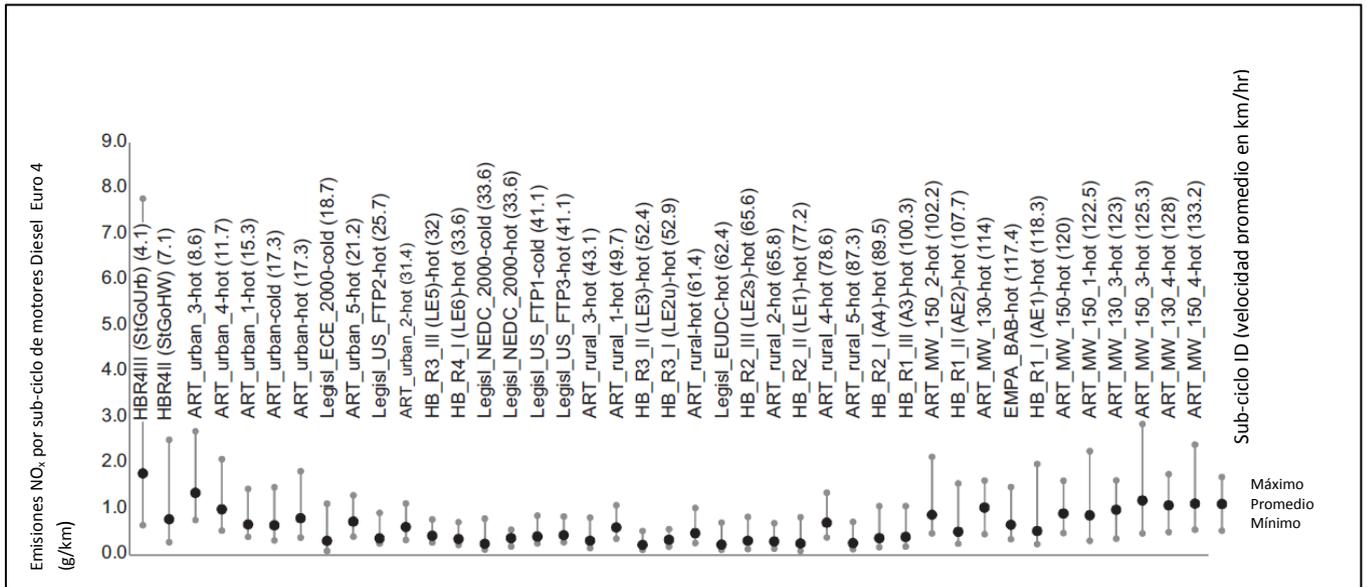


Figura 1.6: Ilustración de la variabilidad de resultados de ensayos de emisiones [ref. 1.41]

En resumen, la generación de FE confiables requiere de suficientes mediciones en una cantidad grande de vehículos y una adecuada selección de ciclos de conducción que puedan representar las condiciones de conducción que se desean modelar.

### 1.6 Normas Peruanas

Las emisiones que se generan en un motor no solo dependen del diseño de este y de los sistemas de reducción en el escape de un vehículo, el combustible utilizado es decir disponible en cada país es responsable también. En la ciudad de Lima el combustible disponible para motores diesel es una mezcla de 5% biodiesel y 95% de diesel 2. En el país no existe una norma que regule las características de la mezcla B5 sin embargo el comité técnico de normalización de petróleo y derivados elaboró las normas que rigen las propiedades del Diesel 2 y del Biodiesel B100.

- La norma Técnica Peruana NTP 321.003 2005 contempla las propiedades del diesel 2 en el país.
- La Norma Técnica Peruana NTP 321.125 2008 establece las propiedades del biocombustible Biodiesel B100.

Como el estado creó un cronograma para empezar a comercializar mezclas de combustible diesel con biodiesel, a partir del 1 de enero del año 2010, empezó en la ciudad de Lima la venta de combustible B2 y salió el decreto supremo 092-2009-EM con las propiedades que debía tener este combustible, ver anexo I. Dentro de las propiedades que fueron afectadas ligeramente están la viscosidad cinemática cuyo rango permisible disminuyó, el índice de cetano también disminuyó y aumentó el nivel de corrosión.

Aun no se dispone de las propiedades legales a cumplir por los productores y vendedores de las mezcla B5 para estaciones de servicios por lo que se utilizará de apoyo para este trabajo las propiedades del B2.

### 1.7 Efecto del contenido de biodiesel en emisiones de motores de encendido por compresión

Se han realizado una gran variedad de pruebas experimentales con diferentes tipos de motores diesel para poder ver el efecto del contenido de biodiesel en las emisiones. Sin embargo se puede apreciar muchas características que siguen un patrón de comportamiento en cuanto a la cantidad de emisiones.

#### 1.7.1 Óxidos nitrosos

En la mayoría de los ensayos realizados, la cantidad de óxidos nitrosos liberados como productos de combustión de mezclas de diesel y biodiesel aumentó. Se realizaron variedad de ensayos con motores diesel de servicio pesado y se pudo sacar la correlación mostrada en el grafico 1.7. Vemos como al aumentar el porcentaje de biodiesel las emisiones de  $\text{NO}_x$  aumentan. [ref. 1.42] En el caso del combustible de la Ciudad de Lima y Callao el aumento será ligeramente mayor en comparación al uso de diesel puro ya que el porcentaje de mezcla solo es de 5%.

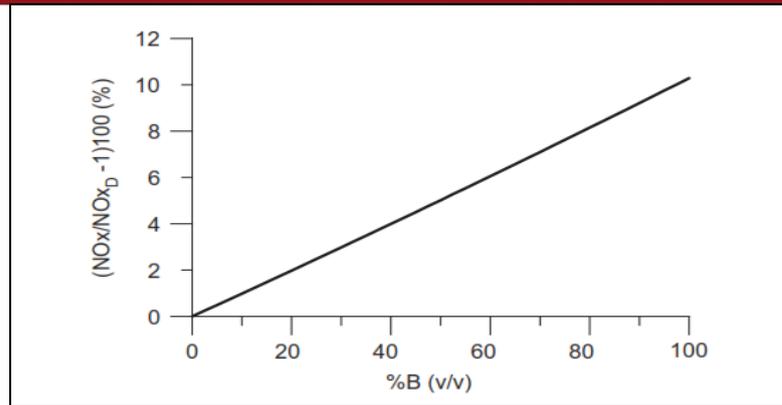


Figura 1.7 : Incremento medio de emisiones NOx al aumentar el contenido de biodiesel [ref. 1.43]

Cuando el biodiesel es inyectado, el incremento de presión de la bomba de combustible tiene mayor velocidad a consecuencia del menor grado de compresibilidad del biodiesel y también se propaga más rápido hacia los inyectores. Además su alta viscosidad, reduciendo pérdidas en la bomba conlleva a un aumento en la presión del sistema de inyección. Es por esto que se observa mayor rapidez en la apertura de los inyectores. Esto aumenta la formación de óxidos nitrosos como también el incremento los picos de temperatura durante la combustión, además que disminuye la cantidad de reacciones de carbón con óxidos nitrosos. Otro factor es la reducción de la formación de hollín debido al biodiesel. Cuando hollín se forma durante la combustión reduce la transferencia de temperatura hacia el exterior aumentando la temperatura dentro del cilindro, generando mayor formación de óxidos nitrosos. [ref. 1.44]

### 1.7.2 Material particulado (PM)

Al aumentar el contenido de biodiesel, en la mayoría de casos se observa una considerable disminución en las emisiones de material particulado. Esta afirmación puede considerarse prácticamente unánime entre los estudios y pruebas realizadas. Se puede modelar una relación entre el aumento de biodiesel y la variación de PM en comparación al uso de diesel puro con 95% de confiabilidad. Esta relación muestra una reducción máxima de 50%

de PM al usar B100, reducción máxima, y entre un 2.5% a 3% para mezclas B5. [ref. 1.45]

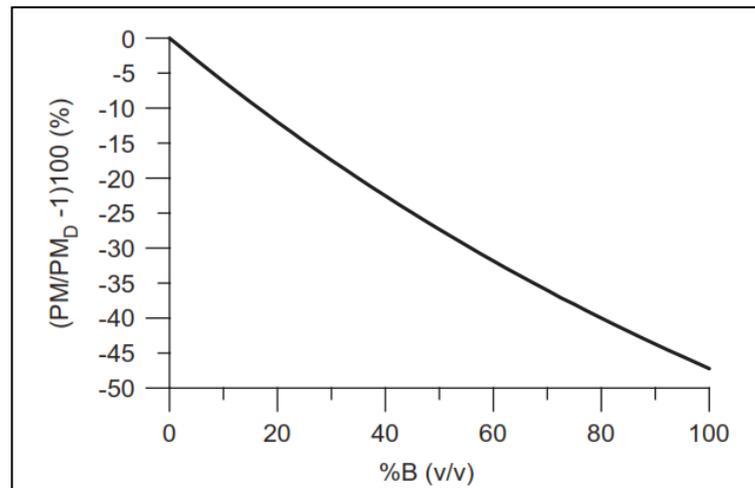


Figura 1.8: Reducción en emisiones de material particulado al incrementar el contenido de biodiesel [ref. 1.46]

El contenido de oxígeno en las moléculas de biodiesel permite una combustión completa en la cámara de combustión hasta en regiones donde la mezcla es más rica en combustible que en aire. También permite la oxidación de hollín que se genera durante la combustión. Otra razón es la baja necesidad estequiometría de aire al utilizar biodiesel que reduce las probabilidades de regiones muy ricas en combustible solamente. Los combustibles biodiesel no poseen estructuras aromáticas las cuales son generadoras de hollín.

El hollín generado por la combustión de biodiesel tiene una estructura diferente al generado por diesel, permitiendo una más favorable oxidación, esto genera que a pesar de su formación, siga reaccionando para emitir menos a la atmósfera. Otro factor que explica la reducción de PM es que el biodiesel tiene un punto final de ebullición menor, a pesar que la temperatura promedio de destilación es mayor. Esto genera menores probabilidades de formación de hollín de fracciones pesadas de hidrocarburos incapaces de quemarse. [ref. 1.47]

### 1.7.3 Hidrocarburos totales (HCT)

La mayoría de estudios muestran una gran reducción en las emisiones de HCT al sustituir diesel con biodiesel. Cuando esta sustitución es de 100% se puede llegar a apreciar un 70% de reducción. En el caso de B5 se aprecia entre un 7% a 8% de reducción. [ref. 1.48]

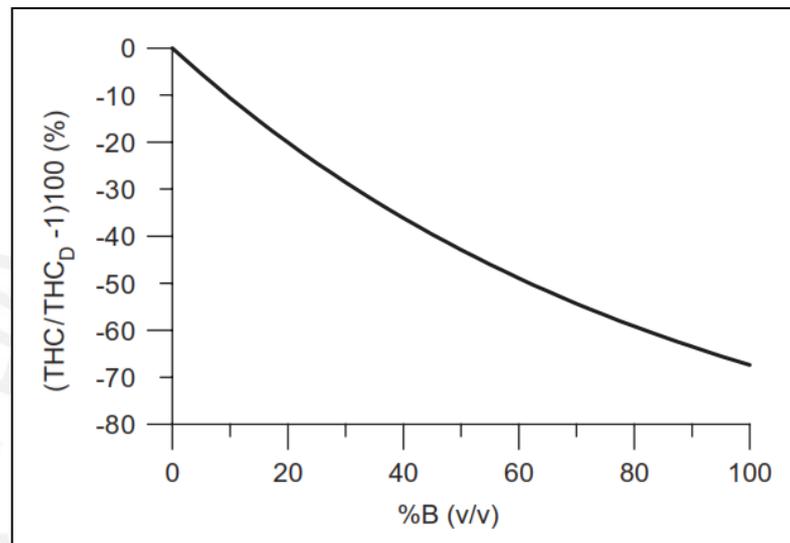


Figura 1.9: Reducción de las emisiones de HCT al incrementar el contenido de biodiesel [ref. 1.49]

Las razones para esta reducción en emisiones de HCT es el contenido de oxígeno en las moléculas de biodiesel que permite una combustión más completa y limpia. Esto se probó en ensayos enriqueciendo el contenido de oxígeno en el aire o con combustibles enriquecidos de oxígenos, en ambos casos se obtuvo los mismos resultados, disminución en HCT. El mayor número de cetano del biodiesel es otro factor ya que reduce el retardo en la combustión permitiendo que esta sea más completa. [ref. 1.50]

### 1.7.4 Monóxido de carbono

Se puede considerar que el contenido de CO disminuye al aumentar el contenido de biodiesel como el patrón común. En este caso también

después de una cantidad de ensayos y estudios se logró llegar a la correlación que muestra una reducción del 50% de emisiones de CO si se utiliza biodiesel puro. Para la mezcla B5 se aprecia una reducción de entre 4% y 5%. [ref. 1.51]

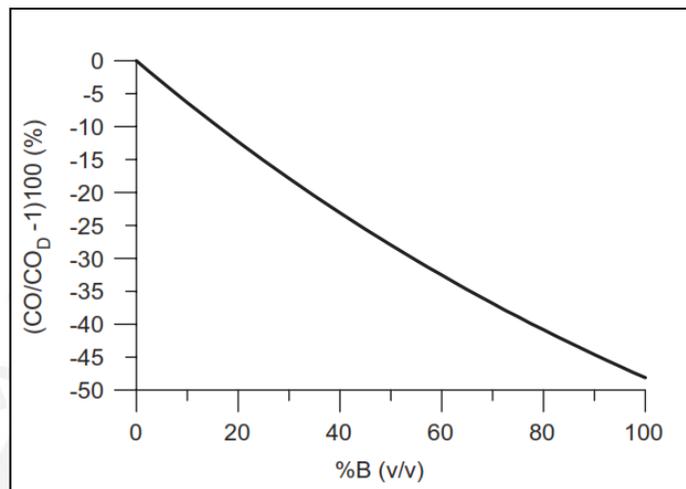


Figura 1.10: Reducción de emisiones de CO al aumentar el contenido de biodiesel [ref. 1.52]

Existen varias razones para esta disminución de CO, el contenido adicional de oxígeno en la mezcla permite una combustión completa, es decir sin generación de CO. Ya que el biodiesel tiene un número de cetano mayor, como se mencionó anteriormente, serán menores las probabilidades de zonas ricas solamente en combustible, lo cual está relacionado directamente con emisiones de CO. [ref. 1.53]

Los resultados anteriormente mencionados acerca de las emisiones generadas por el uso de biodiesel, son el resultado del consenso de la mayor parte de experimentos y pruebas realizadas por autores, se puede apreciar en la tabla 1.2. Sin embargo hubo otras conclusiones que no se muestran ya que solamente una pequeña parte de los estudios mostraron esas tendencias. Para emisiones NO<sub>x</sub>, el 85% de estudios mostraron un

aumento, 95% de disminución para emisiones de PM al igual que para HCT y un 90% mostraron que las emisiones de CO disminuyeron. [ref. 1.54]

Tabla 1.2: Comparación Porcentual de Conclusiones Respecto al Efecto del Biodiesel en el Motor [ref. 1.55]

Característica	Aumenta	Igual	Disminuye
Consumo Específico de Combustible	98	2	0
Emisiones NOx	85	10	5
Emisiones PM	3	2	95
Emisiones HCT	1	3	95
Emisiones CO	2	7	90

Elaboración Propia

Si bien solo se mencionó la variación de las emisiones con el contenido de biodiesel, es decir se vió como las propiedades de este afectan el nivel de emisiones. Sin embargo existen otros factores tales como las tecnologías de los motores, las condiciones de operación o ciclos de manejo. Estos serán expuestos en los siguientes capítulos.

## Referencias bibliográficas

- [ref. 1.1] MAGDI K. Khair, HANNU Jääskeläinen, Revision 2008.11b, *Emission Formation in Diesel Engines*, 2008. p. 1.
- [ref. 1.2] Ibídem.
- [ref. 1.3] Ibídem.
- [ref. 1.4] Ibídem.
- [ref. 1.5] Idem, p. 2.
- [ref. 1.6] Idem, p. 4.
- [ref. 1.7] Ibídem.
- [ref. 1.8] Idem, p. 8.
- [ref. 1.9] Ibídem.
- [ref. 1.10] Idem, p. 9.
- [ref. 1.11] Ibídem.
- [ref. 1.12] Idem, p. 11.
- [ref. 1.13] Ibídem.
- [ref. 1.14] ROJANO Roberto E., ANGULO Luis C., RESTREPO Gloria, *Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM10 y PM2.5 y su Relación en Lugares Públicos de la Ciudad Riohacha, Caribe Colombiano*, Vol. 24, 2013, pp. 37-46
- [ref. 1.15] Idem, p. 21.
- [ref. 1.16] ACEVEDO HERRERA, Cristian Ignacio, *Determinación experimental de factores de emisión en vehículos pesados de transporte público*, Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico, Santiago de Chile : Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería mecánica, Enero 2007, p. 12
- [ref. 1.17] MANUFACTURERS OF EMISSION CONTROLS ASSOCIATION, *Emission Control Technologies for Diesel-Powered Vehicles*, 2007, p. 10
- [ref. 1.18] Idem, p. 11.
- [ref. 1.19] Ibídem.
- [ref. 1.20] Idem, p. 28.
- [ref. 1.21] RINCÓN J., ASECIO I., CAMARILLO R., MARTÍN A., *Tratamiento de Residuos: reciclado de catalizadores de automóviles*, España, Universidad de Castilla-La Mancha, 2008, p. 455.
- [ref. 1.22] Idem, p. 456.
- [ref. 1.23] Ibídem.
- [ref. 1.24] MANUFACTURERS OF EMISSION CONTROLS ASSOCIATION, *Emission Control Technologies for Diesel-Powered Vehicles*, 2007, p. 12.
- [ref. 1.25] Idem, p. 12.
- [ref. 1.26] Idem, p. 13.
- [ref. 1.27] MARTÍN Karl Castillo, BARBERÁN Freddy Cevallos, *Análisis y desgaste en motores de combustión interna a diesel*, 1998, p.7.
- [ref. 1.28] Idem, p. 10.
- [ref. 1.29] Idem, p. 11.
- [ref. 1.30] ACEVEDO HERRERA, Cristian Ignacio, *Determinación experimental de factores de emisión en vehículos pesados de transporte público*, Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico, Santiago de Chile : Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería mecánica, Enero 2007, p. 27
- [ref. 1.31] Idem, p. 28.
- [ref. 1.32] RINCÓN J., ASECIO I., CAMARILLO R., MARTÍN A., *Tratamiento de Residuos: reciclado de catalizadores de automóviles*, España, Universidad de Castilla-La Mancha, 2008, p. 455.
- [ref. 1.33] Ibídem.

- [ref. 1.34] EUROPEAN UNION, *Commission Directive 2005/78/EC*, 2005
- [ref. 1.35] U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 2011*, [en línea]. Disponible en:  
<http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
- [ref. 1.36] Ibídem.
- [ref. 1.37] FRANCO Vicente, KOUSOULIDOU Marina, MUNTEAN Marilena, NTZIACHRISTOS Leonidas, HAUSBERGER Stefan, DILARA Panagiota, *Road vehicle emission factors development: A review, 2013, p. 84.*
- [ref. 1.38] Idem, p. 85.
- [ref. 1.39] Ibídem.
- [ref. 1.40] Idem, p. 86.
- [ref. 1.41] Idem, p. 87.
- [ref. 1.42] LAPUERTA Pedro, ARMAS Octavio, RODRIGUEZ-FERNANDEZ Jose. Effect of Biodiesel fuels on diesel engine emissions, 2007. p. 206.
- [ref. 1.43] Ibídem.
- [ref. 1.44] Ibídem.
- [ref. 1.45] Ibídem.
- [ref. 1.46] Ibídem
- [ref. 1.47] Idem, p. 210.
- [ref. 1.48] Idem, p. 214.
- [ref. 1.49] Idem, p. 214.
- [ref. 1.50] Idem, p. 215.
- [ref. 1.51] Idem, p. 216.
- [ref. 1.52] Ibídem.
- [ref. 1.53] Idem, p. 217.
- [ref. 1.54] Ibídem.
- [ref. 1.55] Idem, p. 202.

## Capítulo 2: Características de la flota de buses de transporte público con motores diesel en Lima y Callao

En este capítulo a través de una muestra obtenida se conocerán las características de la flota de transporte siendo las más importantes para este trabajo la distribución por año de fabricación de la flota (edad de cada vehículo) y la distribución de la flota por tipo de vehículo (según su capacidad de transporte). Estas dos características permitirán utilizar los factores de emisión que se plantearán para luego determinar los niveles de emisión en la Ciudad de Lima y Callao.

### 2.1 Metodología para obtención base de datos

Según las estadísticas de GTU de la ciudad de Lima, en ella existe alrededor de 8 millones de habitantes, de los cuales 6 millones utilizan las unidades de transporte público para desplazarse por toda la ciudad con un promedio de 8 millones de viajes diarios. Para poder atender la demanda existente por esta población la Municipalidad Metropolitana de Lima ha autorizado la circulación de 29,700 unidades de transporte público, distribuidas en 418 rutas. Además la Municipalidad Provincial del Callao, ha autorizado circular 7,300 unidades de las cuales 5,200 transitan de forma unilateral. [ref. 2.1]

También se ha estimado que aproximadamente 3,500 unidades piratas circulan por toda la ciudad en las principales vías troncales lo que nos lleva a un total de 40500 vehículos en Lima y Callao. Sin embargo los planes de desarrollo establecen que la flota requerida para poder satisfacer la demanda actual es de 22000 vehículos, es decir que existe actualmente un excedente de 18500 vehículos, casi un 45% de la flota actual resulta en un exceso de oferta. Estos datos se pueden apreciar mejor en la siguiente tabla. [ref. 2.2]

Tabla 2.1: Datos de cantidad Flota total en Lima y Callao [ref. 2.3]

	Unidades formales	Unidades informales	Total de unidades
Lima	29700	3500	<b>40500</b>
Callao	7300		

Flota requerida	22000
Exceso de flota	18500
Porcentaje de exceso	45.7%

No existe una base de datos que permita poder realizar estudios referentes a la flota de transporte público actual. Esta fue una de las primeras observaciones que se encontraron al empezar la investigación. Por esta limitante se tuvo que crear una metodología con la cual se ha trabajado para generar una base de datos propia ya que no existía otra disponible.

Existe información acerca de las multas otorgadas a las empresas de transporte público. Esta información, disponible en línea, clasifica las multas por empresas a la cuales pertenece cada vehículo multado y por su ruta. Debido al elevado número de vehículos actualmente, 40500, repartidos en un total de 343 empresas de transporte se eligieron 32 empresas con un total de 75 rutas. Todas estas empresas tienen registradas más de 200 unidades, por lo cual fueron elegidas. Además se eligió un número de empresas pequeñas para poder cubrir la mayoría de rutas en Lima y Callao. Con la placa de circulación de cada vehículo se pudo verificar a través de registros vehiculares las características de la unidad, la ruta actual a la cual pertenece y se cruzó la información ruta-empresa según las empresas elegidas.

Finalmente la base de datos resultante se elaboró solo utilizando vehículos de las empresas/rutas escogidas, con motores diesel, con estado activo en

el registro de unidades de transporte público de Lima y Callao y se actualizaron todas las placas de circulación las cuales no arrojaban registros debido a que fueron reemplazadas por la nueva placa de circulación (información fue obtenida de SUNARP para estos casos).

En la tabla del Anexo III podemos ver la lista de empresas seleccionadas, así como también sus rutas actuales, cantidad de unidades y orientación de la ruta en Lima y Callao.

Todo lo antes descrito se detalla en el Anexo II, el cual incluye los pasos seguidos para obtener la información de cada vehículo de la base de datos y todas las verificaciones realizadas. También se detallan las fuentes de información utilizadas y el procedimiento que se creó para obtener como resultado la base de datos.

A continuación podemos ver un diagrama de flujo que resume lo detallado en el Anexo II, la metodología para la creación de la base de datos.

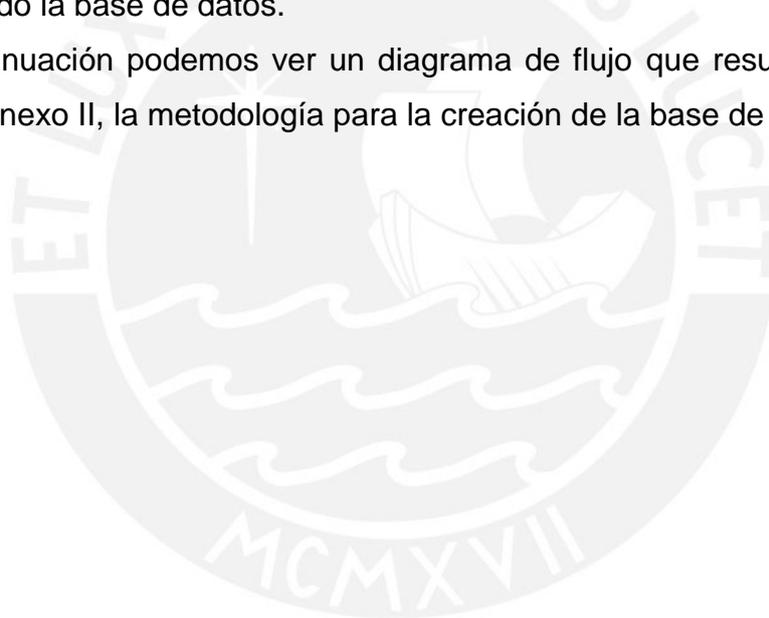
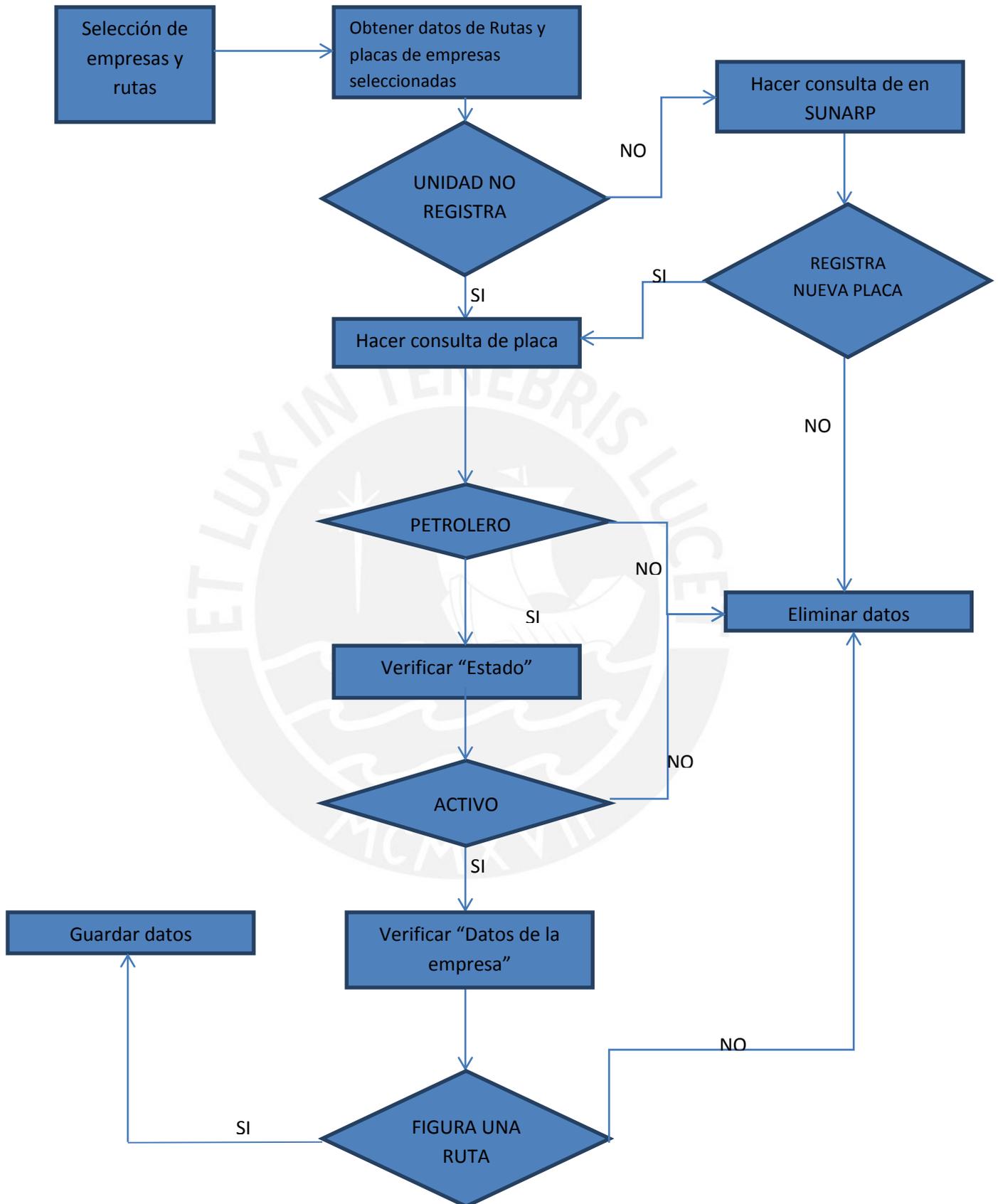


Figura 2.1: Diagrama de flujo para obtención de la base de datos



Elaboración Propia

## 2.2 Base de datos obtenida

La muestra obtenida fue de 4490 unidades con motor diesel de Lima y Callao. Esta cifra vendría representar el 11.1% de la flota actual. Para poder validar esta muestra se utilizó el método propuesto por ROBERT V. KREJCIE, quien muestra una tabla que según un universo conocido se puede determinar el tamaño de la muestra para satisfacer ciertos criterios de aproximación [ref. 2.4]. En el anexo IV se muestra la tabla completa.

En el caso de este trabajo la muestra que se obtuvo durante la recolección de datos fue de 4490 vehículos como se mencionó anteriormente. Ahora si ingresamos a la tabla para un universo de 40500 vehículos para cada porcentaje de confianza, realizando una interpolación lineal se obtiene que la muestra obtenida tanto para un nivel de confianza de 95% o de 99% tiene un margen de error entre 2.5% y 1%.

Tabla 2.2: Interpolación para el universo de vehículos de la MML

Tamaño del universo	Nivel de confianza			
	95%		99%	
	Margen de error		Margen de error	
	2.5%	1.0%	2.5%	1.0%
25000	1448	6939	2399	9972
40500	1475	7632	2474	11511
50000	1491	8056	2520	12455

Elaboración Propia

Este resultado valida la muestra obtenida, sin embargo también se realizaron comparaciones adicionales con otros estudios y cifras conocidas para poder tener un mayor nivel de confianza sobre la muestra de datos.

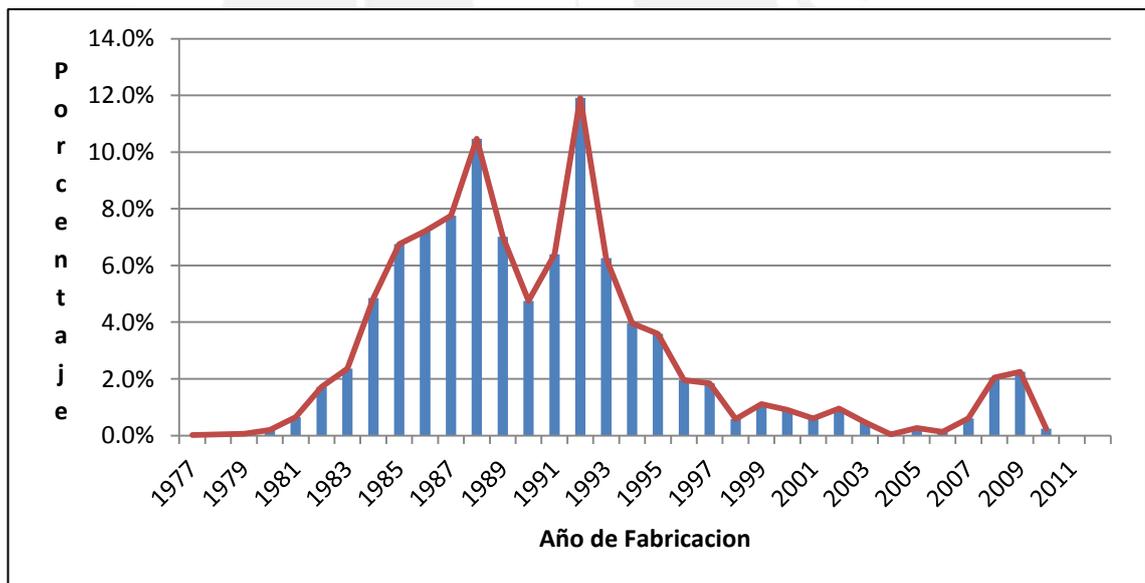
Se comparó la cantidad de unidades por empresa obtenidas con el número de unidades que registra la empresa en GTU. En promedio se obtuvo más

del 90% de unidades registradas de las empresas seleccionadas y además para todas las empresas se obtuvieron valores por encima del 85% de datos. Se detalla en el Anexo V.

De la muestra obtenida se puede observar que la edad de los buses oscila desde el año 1977 hasta el año 2010, con un 49% de vehículos fabricados en los años ochenta, es decir cuando aún no existían normas de restricción de emisiones contaminantes, por lo tanto no se podía cumplir con ninguna norma Euro, vehículos que en adelante serán denominados “Sin Norma (SN)”.

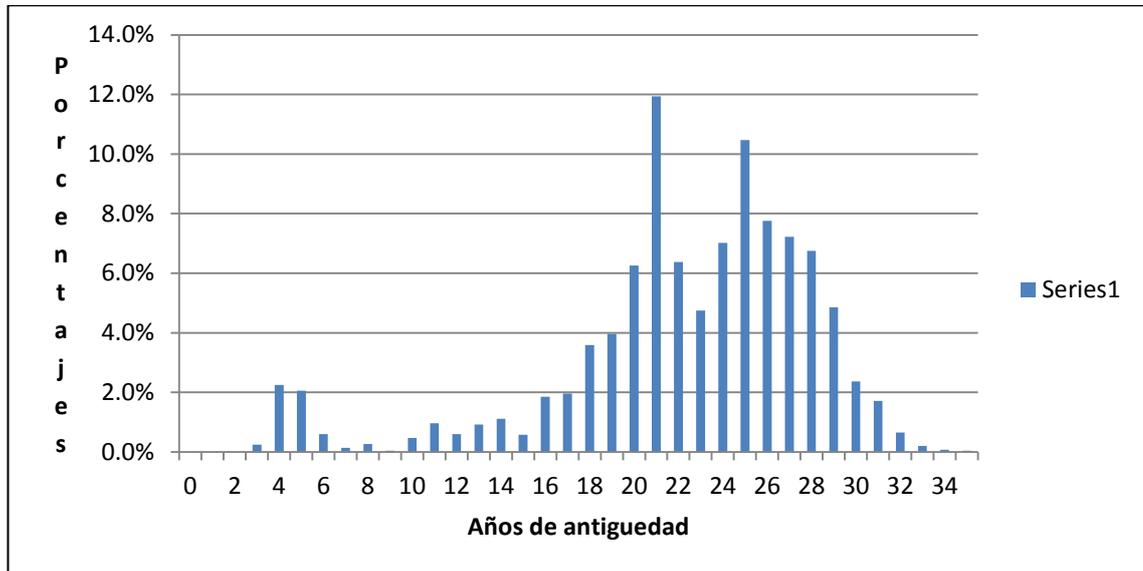
Entre los años 1990 y 1999, se fabricaron el 42.3% de la flota de vehículos, entre 23 y 14 años de antigüedad. (Ver tabla anexo V).

Figura 2.2: Distribución de la muestra obtenida según año de fabricación



Elaboración Propia.

Figura 2.3: Distribución de la muestra obtenida según edad



Elaboración Propia

Si se compara la figura 2.2 con la que se tiene disponible del “PROYECTO DE ORDENANZA QUE APRUEBA CRONOGRAMA PARA LA CONVOCATORIA DE LICITACION DE RUTAS, LIMITA INCREMENTO DE FLOTA, DISPONE ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE VEHICULO PADRON Y REGULA OTROS ASPECTOS EN MATERIA DE TRANSPORTE PÚBLICO DE PASAJEROS EN LIMA METROPOLITANA” [ref. 2.12] se puede observar similitud en la tendencia de la muestra. En primer lugar se observa una cantidad pequeña de unidades de los años 70, mientras que a partir de los ochentas el número de vehículos asciende rápidamente. En los gráficos se identifican dos picos importantes, uno es en entre los años 87 y 89 y el otro muy marcado en el 92. Al final de la tendencia, se ve como a través de los años 2000 disminuye drásticamente la cantidad de unidades teniendo una leve recuperación en el 2008 y 2009 cayendo de nuevo el 2010. Estos resultados son reflejo de la ordenanza 1538 de la MML en la cual se establece el congelamiento de la flota vehicular a partir del 14 de julio del 2011 en miras a la reforma del transporte. [ref. 2.5]

Este gran parecido de ambas gráficas, una realizada en este trabajo con la muestra obtenida y la otra realizada por la MML con toda la flota a su disposición confirma una misma tendencia en la antigüedad de la flota vehicular.

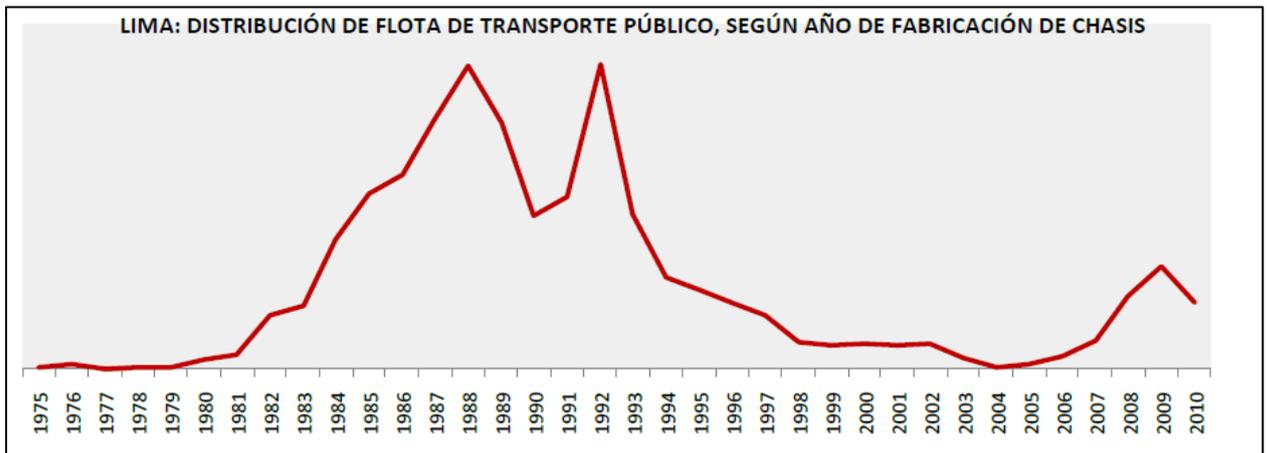
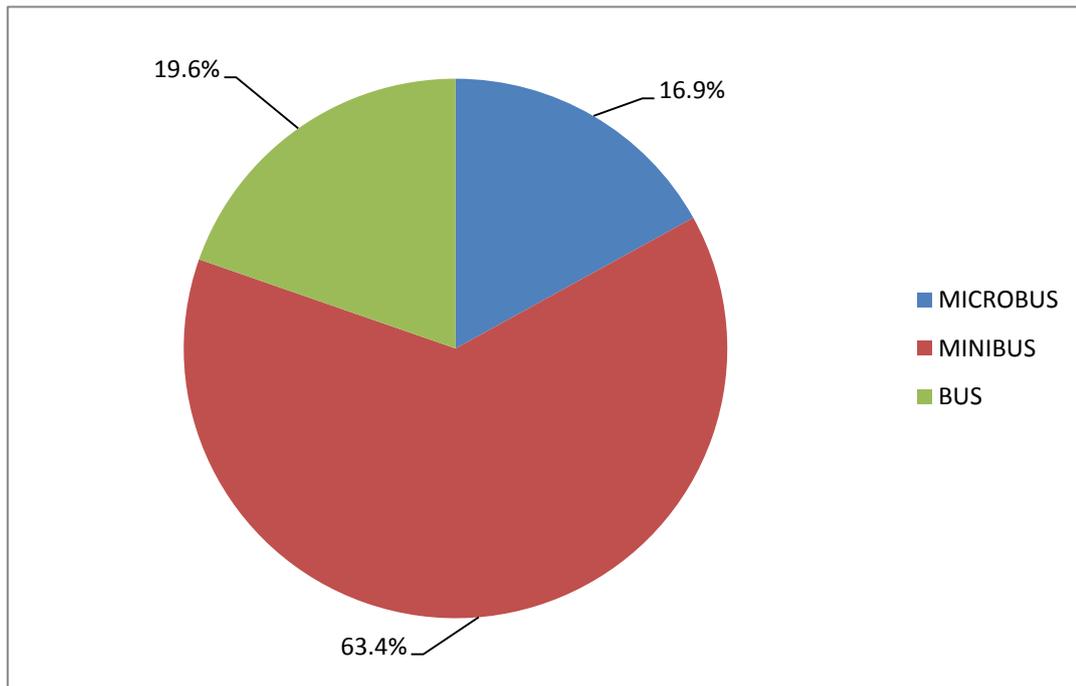


Figura 2.4: Distribución de la muestra obtenida según año de fabricación  
[ref. 2.6]

Además se puede observar cómo se distribuye la flota de buses según las tres categorías existentes: “Bus”, vehículo con una capacidad promedio de 80 pasajeros; “Minibus”, vehículo con una capacidad promedio de 30 pasajeros y “Microbus”, vehículo con una capacidad promedio de carga de 17 pasajeros. [ref. 2.7]

La distribución encontrada de estas categorías muestra que existe una mayor cantidad de minibuses en la ciudad y un porcentaje muy parecido de buses y microbuses.

Figura 2.5: Distribución de muestra obtenida según tipo de vehículo



Elaboración Propia

La municipalidad de Lima el 17 de abril del año 2012 publicó la ordenanza N°1599 donde se establece lo siguiente:

“...25.3 La antigüedad máxima de permanencia de los vehículos del servicio de transporte público regular de personas en Lima Metropolitana será de veinte (20) años, contados a partir del uno (1) de enero del año siguiente al de su fabricación.” [ref. 2.8]

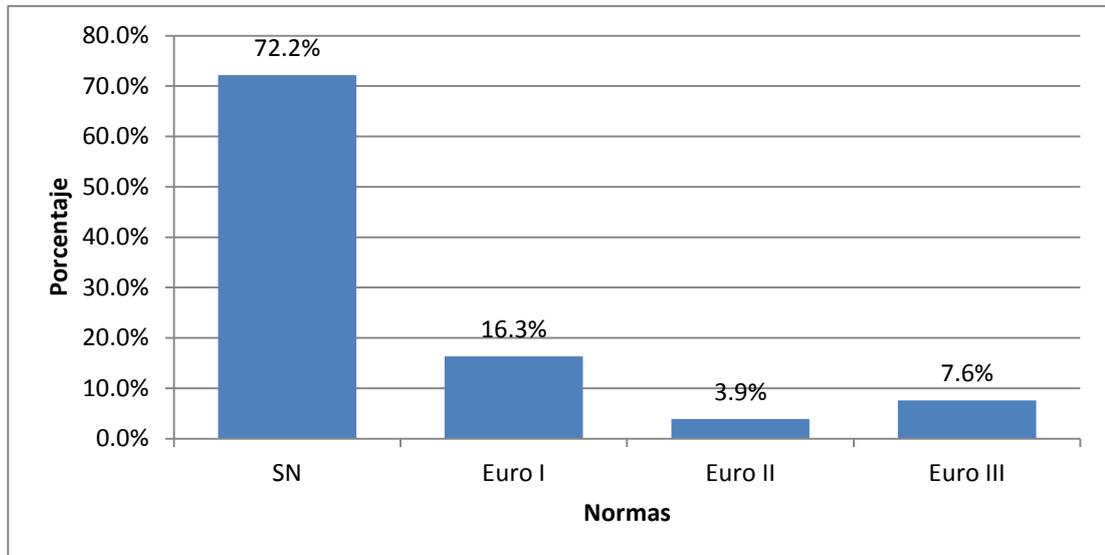
Esto significa que según los datos obtenidos el 72% de vehículos deben ser retirados de circulación quedando solo buses con fecha de fabricación desde el año 1993 (20 años de antigüedad). Además permite el ingreso de vehículos nuevos que correspondan a la norma Euro III a partir del siguiente día de publicada la ordenanza para el transporte público, y a partir del 1 de enero del 2013 solo los que correspondan a la norma Euro IV. . [ref. 2.9]

Según la muestra obtenida del parque vehicular se clasifica cada vehículo según una de las tres normas; euro I, euro II y euro III. Para poder clasificar los vehículos se asumió que de acuerdo al año de fabricación de cada vehículo este pertenece a la norma euro si fue fabricado un año después de la publicación de dicha norma, es decir [ref. 2.10]:

- Vehículos con año de fabricación desde 1992 hacia atrás no corresponden a ninguna norma euro.
- Vehículos con años de fabricación entre 1993 y 1996 corresponden a la norma euro I.
- Vehículos con años de fabricación entre 1997 y 2000 corresponden a la norma euro II.
- Vehículos con años de fabricación entre 2001 en adelante corresponden a la norma euro III.

Habiendo asumido lo anterior los datos obtenidos en este trabajo serían el mejor escenario para la flota vehicular obtenida. Esto quiere decir que se asume que solo existe un año de retraso entre la publicación de una norma euro y la disponibilidad de la tecnología en el país. Esto no necesariamente ocurre ya que a pesar de las existencias de normas más estrictas aún se fabrican vehículos de normas inferiores siendo únicamente la legislación del país lo que restringe el ingreso de los tipos de vehículos. Además no se asume la existencia de vehículos que correspondan a la norma euro IV debido a que justamente el debate entre la MML y los transportistas es acerca del ingreso de este tipo de tecnología. Según lo descrito anteriormente se obtuvo la distribución que se muestra en la siguiente figura:

Figura 2.6 : Distribución de muestra según norma de emisión Euro para motores Diesel



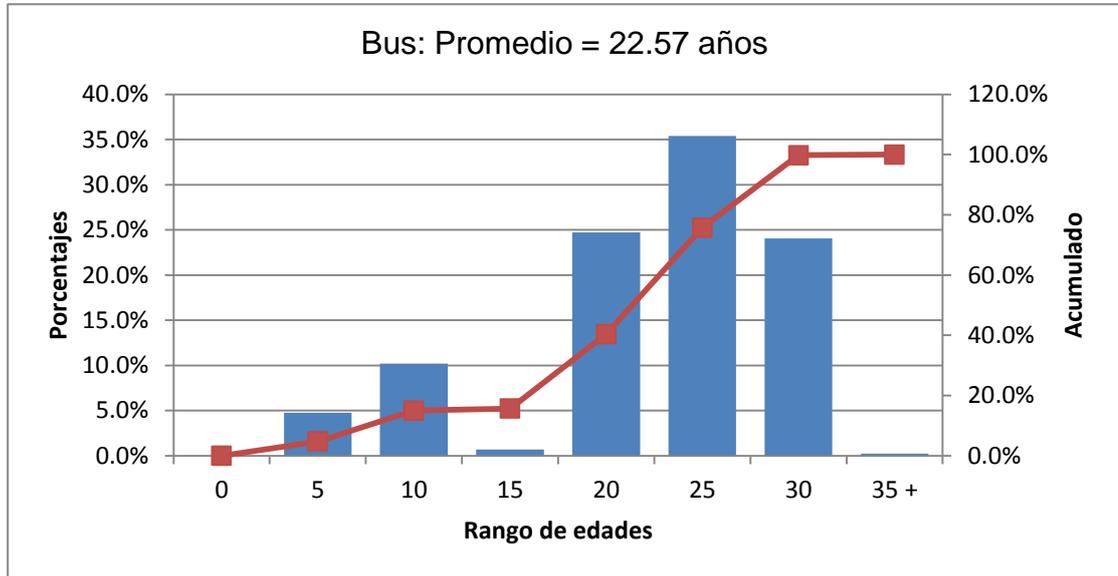
Elaboración Propia

Salta a la vista que como la mayoría de buses son del año 1992 hacia atrás y que estos no se regían por ninguna norma Euro de emisiones ya que la norma Euro I se emitió ese mismo año.

Si solo se observa los porcentajes de vehículos que cumplen las normas Euro I, Euro II y Euro III, existe un reemplazo mínimo tecnológico a lo largo del tiempo. Como durante la década del 2000 no hubo un estándar que cumplir en cuanto a normas de emisiones, se siguió importando vehículos antiguos en relación a la fecha de importación, al pasar el tiempo se dejaron de fabricar vehículos sin normas ya por política de las empresas productoras de estos tipos de unidades, lo que generó que se importaran tipo Euro I, y así sucesivamente. Si hubiera existido alguna ley sobre este tema se apreciaría un cambio significativo del porcentaje en alguna norma, pero este cambio nunca existió.

Se cuentan con datos del Plan Maestro de Transporte Urbano para el área Metropolitana de Lima y Callao elaborado por la agencia de Cooperación Internacional de Japón el año 2004 en el cual podemos ver ciertos datos de antigüedad del parque de buses por categorías y compararlos con los obtenidos.

Figura 2.7: Distribución de muestra según de edad para vehículos tipo vehículos



Elaboración Propia

Figura 2.8: Distribución según de edad para vehículos tipo Bus [ref. 2.11]

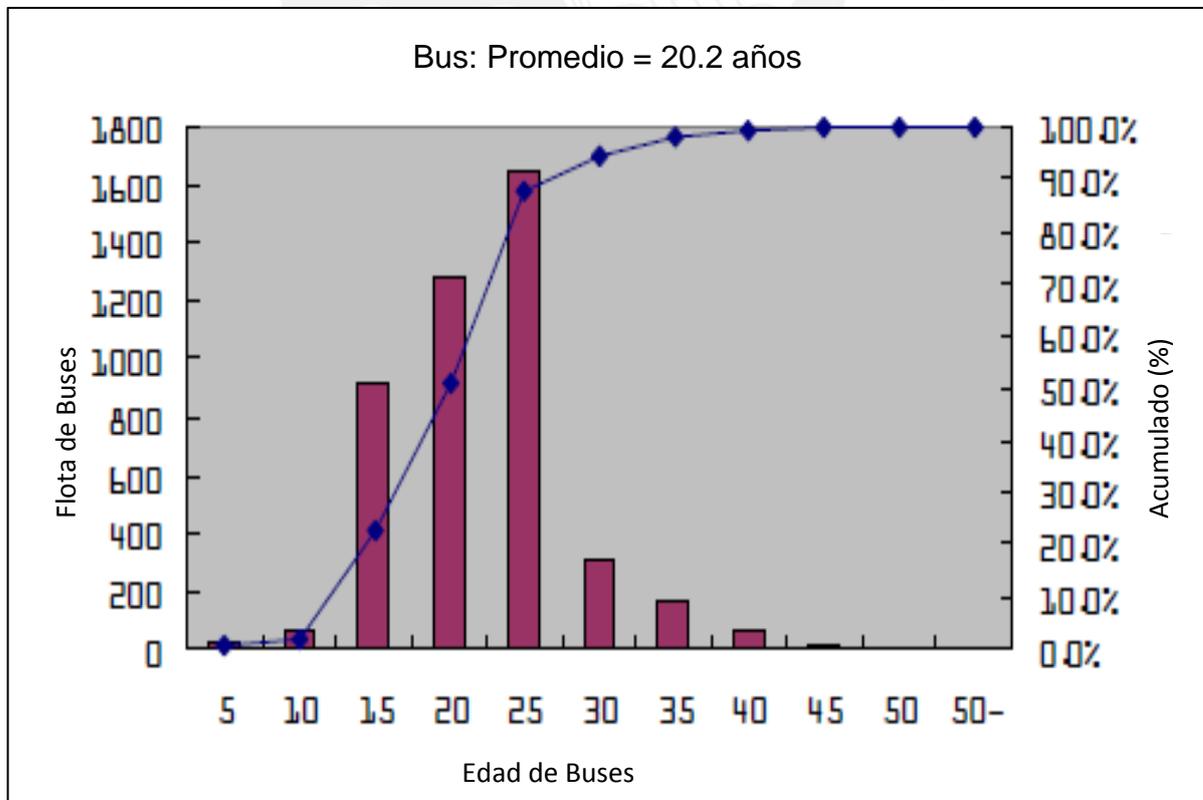
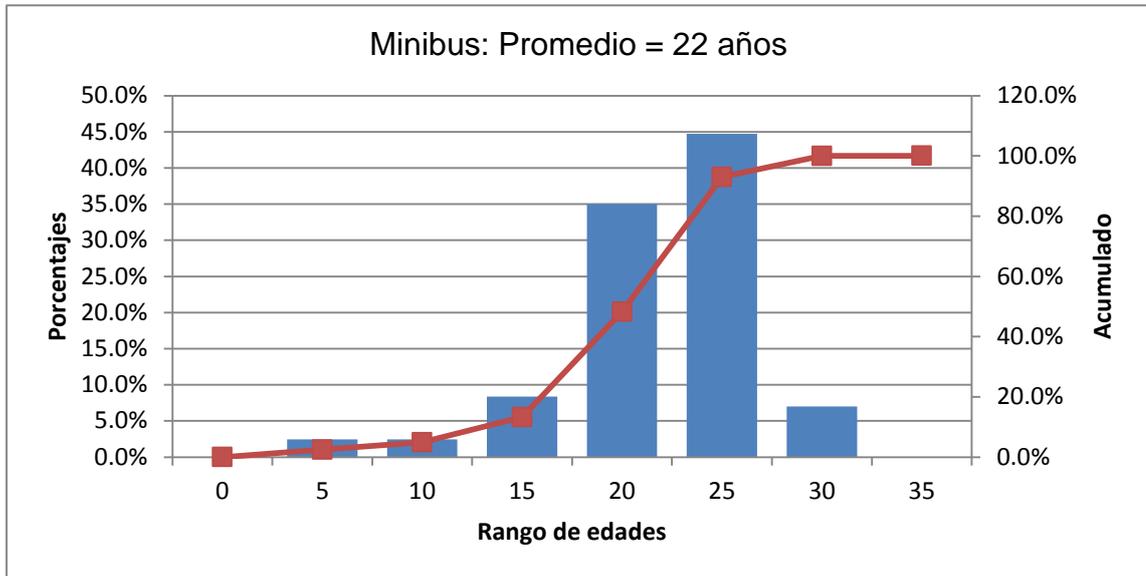


Figura 2.9: Distribución de muestra según de edad para vehículos tipo Minibus



Elaboración Propia

Figura 2.10: Distribución según de edad para vehículos tipo Minibus [ref. 2.12]

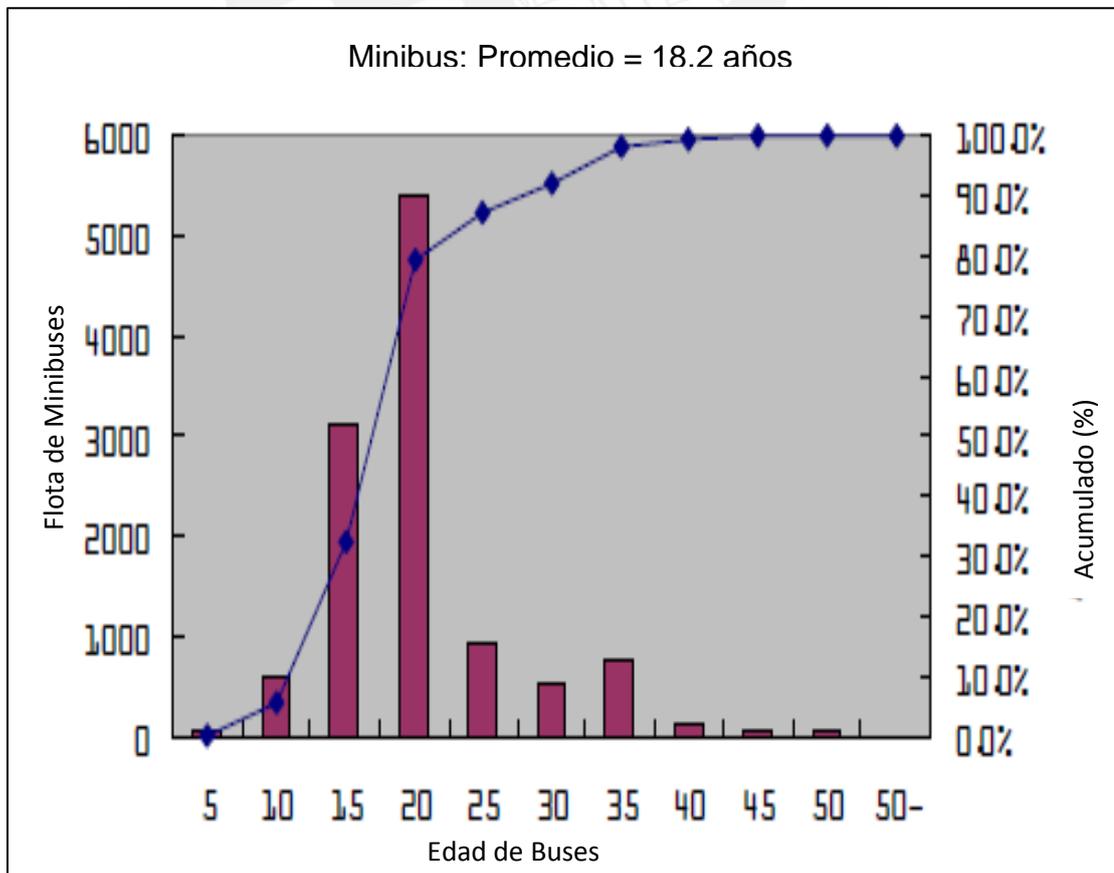
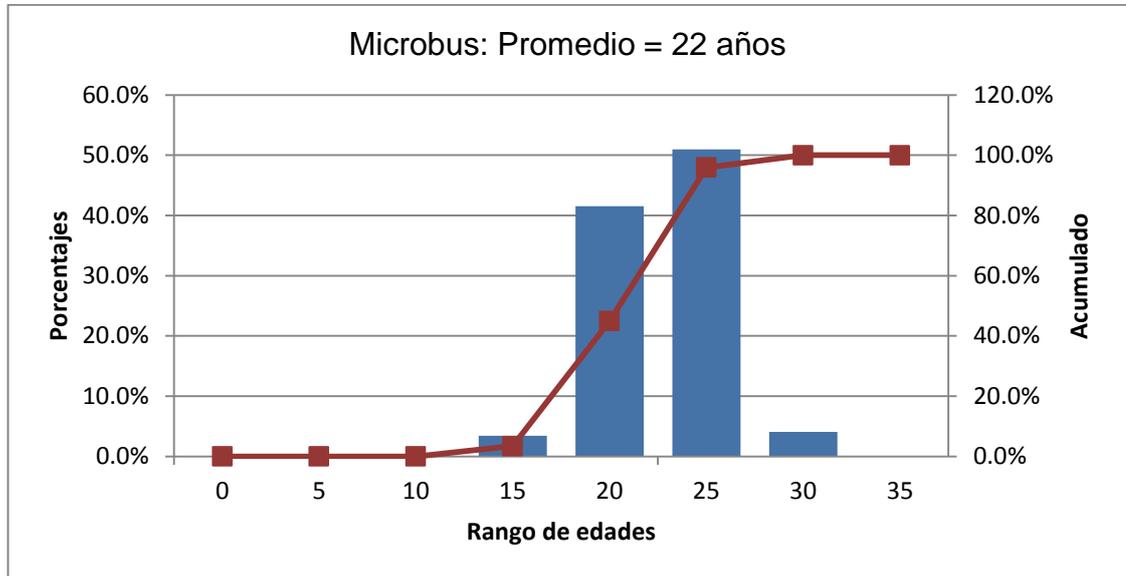
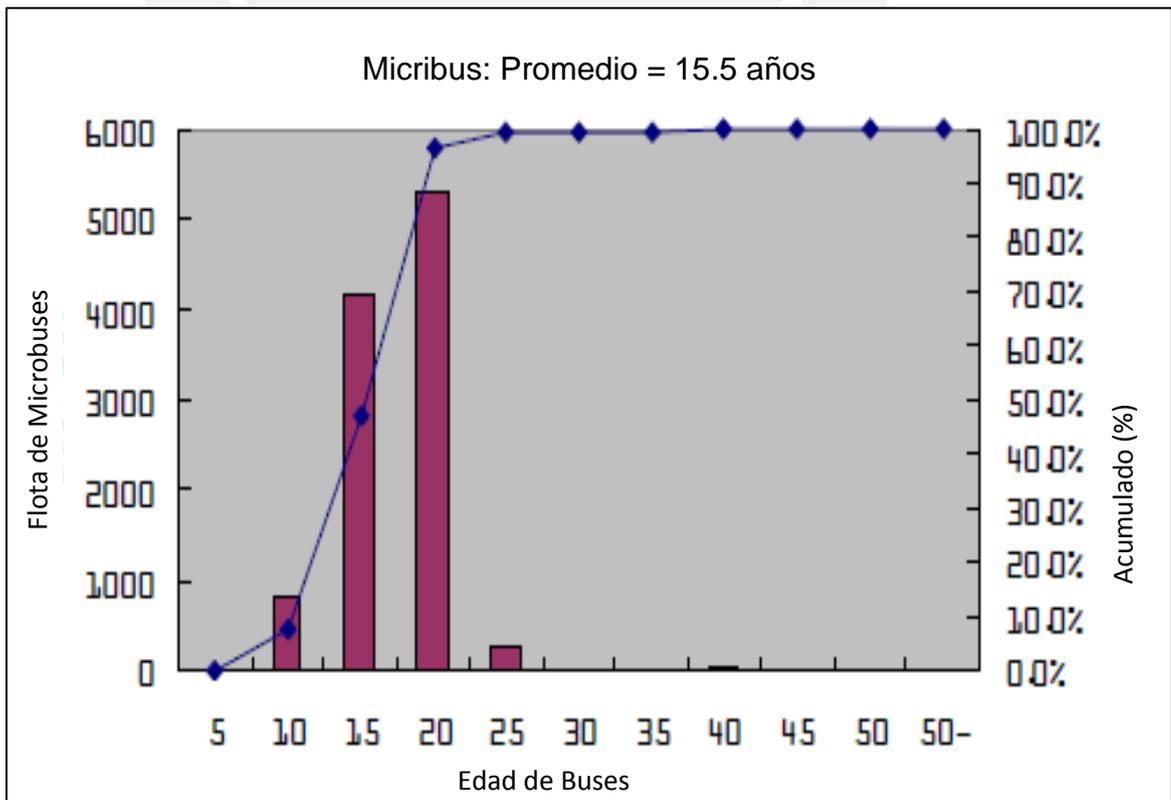


Figura 2.11: Distribución de muestra según de edad para vehículos tipo Microbus



Elaboración Propia

Figura 2.12: Distribución según de edad para vehículos tipo Microbus [ref. 2.13]



Comparando los gráficos de “Microbuses” podemos ver que en el año 2004 la distribución partía de aproximadamente cero vehículos entre 0 y 5 años de antigüedad a un 10% de vehículos entre 6 y 10 años de antigüedad, aumentando el porcentaje para las edades de entre 11 y 15, y 16 y 20, 70% y 88% respectivamente. Ahora bien en los datos obtenidos, primero se aprecia que no se encontraron unidades fabricadas en los últimos 10 años. Además que el porcentaje que corresponde para las edades de entre 6 y 10 años es aproximadamente 1% y que la mayoría de unidades está entre los 16 y 25 años de edad. Debido a que la comparación se hace con un estudio del 2004 existe una relación en los dos cuadros, se aprecia como estos vehículos han envejecido por el paso del tiempo corriendo la gráfica hacia la derecha además que se ha podido apreciar que no ha existido ingreso de vehículos nuevos, los existentes han envejecido y si han ingresado vehículos de transporte estos no han sido fabricados en un lapso de 10 años hacia atrás a partir del presente año.

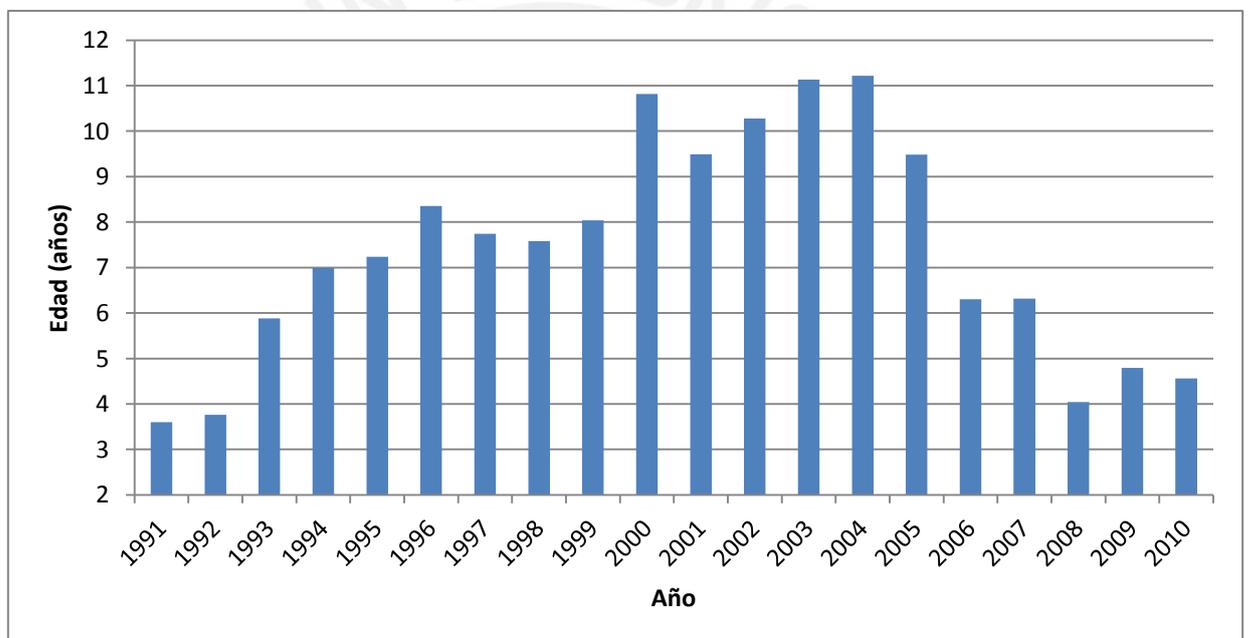
En el caso de los “Minibuses” también se aprecia que la gráfica esta corrida hacia la derecha, es decir que las unidades evaluadas en el año 2004 han seguido en circulación envejeciendo con el paso del tiempo y ahora son parte de un grupo de datos con mayor antigüedad y como en el caso anterior no han ingresado vehículos fabricados en un lapso de 10 años a partir del presente. De haber ingresado vehículos de transporte, estos han tenido como una edad de 11 años a más. Sin embargo vemos una depuración de vehículos con edad mayor a 30 años y gran aumento en comparación al 2004 de unidades modernas.

Esta característica también se puede apreciar en la comparación de “Buses” de manera más marcada. Existe un 15% de unidades con menos de 10 años de antigüedad. Esta iría de la mano con la tendencia de empresas transportistas de adquirir vehículos tipo Bus ya que son más eficientes para el transporte público evitando la generación de congestión vehicular. Se ven en la figura 2.7 que ha existido una renovación de Buses y depuración de vehículos de más de 30 años de antigüedad al compararlo con la figura 2.8.

Para los tres tipos de vehículos la edad promedio se ha incrementado desde el año 2004 a la fecha indicando que la edad promedio general del transporte público de buses con motor diesel ha aumentado.

Otro dato obtenido es el año de ingreso a la ciudad para cada vehículo como transporte público. Se trabajó con estas cifras para poder obtener por año (de 1991 a 2010) cual fue la media de antigüedad de los vehículos al ingresar. Se obtuvo lo siguiente:

Figura 2.13: Distribución de la muestra obtenida según edad en el año de ingreso al sistema de transporte público



Elaboración Propia

Desde el año 1993 existió una tendencia a la alza de nacionalizar vehículos usados llegando a sobrepasar los 11 años de antigüedad en algunos años. El año 1992 la ley N° 25789 el presidente de la Republica, Ing. Alberto Fujimori, deroga todas las disposiciones que prohibían o restringían la importación de bienes usados incluyendo vehículos de transporte público. Esta ley, si bien con algunas modificaciones se mantuvo en el tiempo permitiendo el ingreso en exceso de vehículos de gran antigüedad que se conservan hasta el día de hoy. [ref. 2.14] El 68% de vehículos ingresaron

con 10 o más años de antigüedad a prestar servicio como transporte público es decir que cada uno de estos vehículos ya presentaba un nivel considerable de deterioro simplemente por uso.

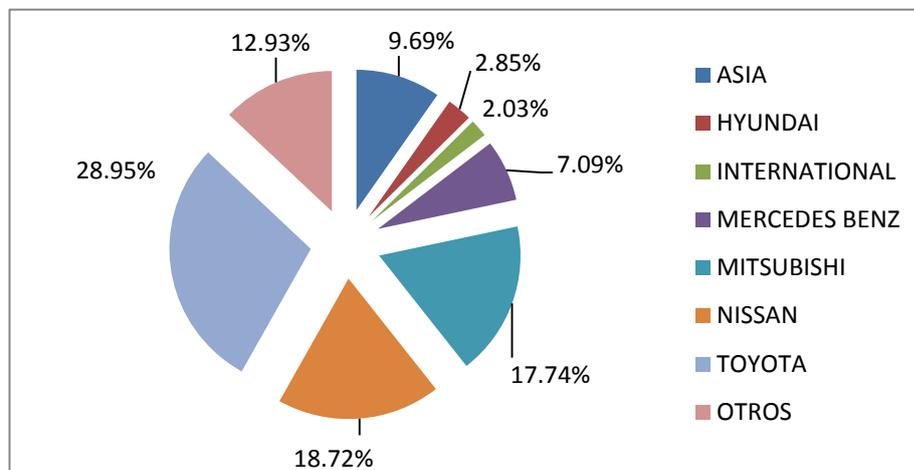
Finalmente se finaliza este capítulo con una revisión de las marcas de vehiculares encontradas en la base de datos, Toyota liderando con casi el 30% de la muestra seguida de Nissan y Mitsubishi entre otras.

Tabla 2.3: Distribución de la muestra por marca vehicular

Marca	Cantidad	Edad		Porcentaje
		Min	Max	
ASIA	435	1984	1998	9.69%
HYUNDAI	128	1985	2010	2.85%
INTERNATIONAL	91	1981	2008	2.03%
MERCEDES BENZ	318	1980	2010	7.09%
MITSUBISHI	796	1979	2010	17.74%
NISSAN	840	1982	2002	18.72%
TOYOTA	1299	1981	2009	28.95%
OTROS	580	1977	2010	12.93%

Elaboración Propia

Figura 2.14: Distribución de la muestra por marca vehicular



Elaboración Propia

## Referencias bibliográficas

- [ref. 2.1] GERENCIA DE TRANSPORTE URBANO GTU, Proyectos: Marco General [en línea], Disponible en: <http://www.gtu.munlima.gob.pe/proyectos/operativosmoviles.htm>
- [ref. 2.2] *Ibidem.*
- [ref. 2.3] *Ibidem.*
- [ref. 2.4] KREJCIE ROBERT V., MORGAN DARYLE W., *Determining simple size for research activities*, 1970, p. 607.
- [ref. 2.5] MUNICIPALIDAD METROPOLITANA DE LIMA, *Proyecto de ordenanza que aprueba cronograma para la convocatoria de licitación de rutas, limita incremento de flota, dispone especificaciones técnicas de vehículo padrón y regula otros aspectos en materia de transporte público de pasajeros en Lima metropolitana*, 2011, p. 21
- [ref. 2.6] *Idem*, p. 14.
- [ref. 2.7] AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE JAPÓN (JICA), CONSEJO DE TRANSPORTE DE LIMA Y CALLAO, MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DE LA REPÚBLICA DEL PERÚ, *Plan maestro de transporte urbano para el área metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú*, Volumen – I, 2005, p. 5-35.
- [ref. 2.8] CONCEJO METROPOLITANO DE LIMA, *Ordenanza N°1599 que regula la prestación del servicio de transporte público regular de personas en Lima Metropolitana*, 2012, p. 19.
- [ref. 2.9] *Ibidem.*
- [ref. 2.10] EUROPEAN UNION, *Commission Directive 2005/78/EC*, 2005
- [ref. 2.11] AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE JAPÓN (JICA), CONSEJO DE TRANSPORTE DE LIMA Y CALLAO, MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DE LA REPÚBLICA DEL PERÚ, *Plan maestro de transporte urbano para el área metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú*, Volumen – I, 2005, p. 5-37
- [ref. 2.12] *Ibidem.*
- [ref. 2.13] *Ibidem.*
- [ref. 2.14] CONGRESO DE LA REPUBLICA DEL PERU, *Derogación de todas las disposiciones que prohíben o restringen la importación de bienes usados Decreto de Ley N° 25789*, 1992

### Capítulo 3: Descripción de la metodología aplicada para el cálculo de emisiones a través de factores de emisión y factores de corrección

A lo largo de este trabajo ya se han descrito los mecanismos de formación de los contaminantes y las tecnologías de reducción de estos. Ahora se desarrollará la metodología que se aplicara para poder determinar las emisiones generadas por la flota vehicular de buses diesel en Lima y Callao.

La metodología que se utilizará para estimar el nivel de emisiones vehiculares en ruta consiste en asociar los niveles de actividad de las diferentes categorías vehiculares y asociar a cada una de ellas un factor de emisión como se puede apreciar en la siguiente fórmula [ref. 3.1]:

$$E_i = \sum_{kt} \text{Nivel de actividad}_k \times FE_{ikt} \quad (3.1)$$

$E_i$  = emisiones del contaminante considerado (g)

Nivel de actividad $_k$  = recorrido anual de una unidad (km)

$FE_{ikt}$  = Factor de emisión del contaminante  $i$  para la categoría  $k$ , para el tipo de descarga de emisión ( $\frac{g}{km}$ )

#### 3.1 Contaminantes Considerados

En esta metodología se van a considerar solamente los contaminantes que se encuentran listados a continuación y que además fueron mencionados en el capítulo 1.

- Material Particulado (PM<sub>10</sub>)
- Monóxido de Carbono (CO)

- Hidrocarburos Totales (HCT)
- Óxidos de Nitrógeno (NO<sub>x</sub>)
- Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>)

### 3.2 Tipos de emisiones que son consideradas en los cálculos (tipos de descarga)

Se puede encontrar que los vehículos, en este caso los buses tienen tres fuentes fundamentales de emisiones las cuales son [ref. 3.2]:

1. Las emisiones derivadas del motor cuando éste se encuentra en condiciones de operación estables es decir emisiones en caliente,
2. Aquellas provenientes del motor cuando éste se encuentra frío; emisiones por partidas en frío
3. Evaporativas, las cuales son emisiones de hidrocarburos evaporados.
4. Emisiones de polvo suspendido generadas por el paso de los vehículos.
5. El desgaste de los frenos y el desgaste de los neumáticos

### 3.3 Desagregación de las emisiones totales

$$E_{\text{total}} = E_{\text{caliente}} + E_{\text{partidas en frío}} + E_{\text{evaporativas}} + E_{\text{polvo}} + E_{\text{desgastes}} \quad (3.2)$$

Dónde:

- E<sub>total</sub>: Emisiones totales del contaminante considerado (ton/año)
- E<sub>caliente</sub>: Emisiones en caliente, fase estabilizada del motor (ton/año)
- E<sub>partidas en frío</sub>: Emisiones por partidas en frío (ton/año)

- $E_{\text{evaporativas}}$ : Emisiones por evaporación (ton/año)
- $E_{\text{polvo}}$ : Emisiones provenientes del polvo re suspendido por la circulación de vehículos sobre calles pavimentadas (ton/año)
- $E_{\text{desgastes}}$ : Emisiones por desgaste de frenos, neumáticos y superficie (ton/año)

Se considera que las emisiones evaporativas de fuentes móviles provienen de tres categorías primarias, las emisiones durante el día, emisiones por detenciones en caliente y pérdidas durante el recorrido. Las emisiones por partidas en frío se asocian a las emisiones producidas en aquella porción del viaje de un vehículo en la cual la conducción se realiza en condiciones de temperatura de motor inferiores a las normales de diseño. Estas emisiones se destacan aún más cuando se estiman emisiones en ciudades donde el largo del viaje promedio es corto y las temperaturas son bajas. [ref. 3.3]

Las emisiones evaporativas durante el día se asocian a las variaciones de temperatura naturales que se presentan durante el día. Las emisiones por detenciones en caliente se originan cuando el motor del vehículo es apagado (posterior a haber efectuado un recorrido), en donde el calor remanente calienta las líneas de combustible que ya no están fluyendo produciendo emisiones evaporativas. Estas emisiones pueden dividirse en “hot soak”, cuando la temperatura del agua de refrigeración del motor al ser apagado está por sobre los 70 °C, y en “warm soak”, cuando la temperatura es menor a 70 °C. Finalmente, se tienen las emisiones evaporativas generadas por pérdidas durante el recorrido (running losses) las cuales también se diferencian según el grado de temperatura del motor, es decir cuando la temperatura del agua refrigerante del motor se encuentra sobre los 70 °C y “warm running losses” cuando se encuentra por debajo de este valor. [ref. 3.4]

Para efecto de este trabajo y debido a que en la ciudad de Lima los tramos de ruta a estudiar son largos y los tiempos de viaje también, las emisiones que se calcularán serán en condiciones del motor en caliente, es decir cuando los vehículos ya se encuentran en su temperatura de diseño ideal. Los buses siempre están recorriendo sus rutas repetidas veces, es por esto

que el motor de cualquier vehículo se encuentra en su temperatura de trabajo.

### 3.4 Metodología de cálculo de emisiones en caliente por tubo de escape

La metodología general para este tipo de emisiones corresponde a [ref. 3.5]:

$$E_i = \frac{R_{\text{año}} \times FE \times FC_{Det} \times FC_{BD} \times FC_{Comb}}{1000000} \quad (3.3)$$

Dónde:

$E_i$ : Emisiones [g/km] del contaminante considerado “i”, para la categoría vehicular “k”.

$R_{\text{año}}$ : Recorrido anual promedio, (km)

$FE$ : Factor de emisión [g/km\*veh] del contaminante “i”, para la categoría vehicular “k”, en función de la velocidad [km/h]. En general la metodología no permite velocidades menor a 5 km/hr y mayor a 100 km/hr en el caso de rutas de la red urbana y mayor a 120 km/hr en el caso de rutas de la red interurbana. [ref. 3.6]

$FC_{Comb}$ : Factor de corrección por composición del combustible local para la categoría “k”, según las propiedades del combustible en el año de evaluación “a”, medido en [%]. En general este factor depende de las propiedades del combustible que utiliza la categoría “k” de vehículos disponible en el lugar de operación. [ref. 3.7]

$FC_{Det}$ : Factor de corrección por deterioro para la categoría “k” en el año de evaluación “a”, medido en [%] anual. En general este factor depende del kilometraje de los vehículos y debe ser determinado en función del kilometraje promedio de la categoría “k” en el año “a”. [ref. 3.8]

$FC_{BD}$ : Factor de corrección por contenido de biodiesel en el combustible para cada categoría “k” medido en [%]. Cada contaminante objeto de estudio tiene una variación distinta debido a la cantidad de biodiesel utilizado en el combustible. [ref. 3.9]

Cada parámetro será descrito a continuación a mayor detalle para poder comprender más a fondo la metodología utilizada.

#### 3.4.1 Recorrido anual promedio – $R_{año}$ y velocidad promedio de viaje

Se quiere obtener un valor final de emisión por unidad en toneladas por año, es por esto que se necesita el recorrido promedio anual. Se cuenta con los datos del “Plan nacional de cambio climático para el Perú” donde se establece que el recorrido anual para vehículos de transporte público en la ciudad de Lima es de aproximadamente 60,000 kilómetros por lo tanto:

$$R_{año} = 60,000 \frac{km}{año} \quad (3.4)$$

El año 2013 la Agencia de cooperación internacional del Japón (JICA) actualizó algunos criterios del trabajo desarrollado en el año 2004. De esta actualización se obtuvo que la velocidad promedio de viaje en la ciudad de Lima es de 16.8 km/hr por lo tanto [ref. 3.10]:

$$V_{prom} = 16.8 \frac{km}{hr} \quad (3.5)$$

### 3.4.2 Factores de emisión (*FE*)

Los factores de emisión se han seleccionado según el tipo de vehículos que se han obtenido en la muestra. Se utilizarán los mismos factores de emisión para vehículos de tipo “Bus” y “Minibus” debido a su tamaño de motor y dimensiones y se han seleccionado otros factores de emisión para vehículos de tipo “Microbus” debido a su tamaño y dimensiones (menores a 3.5 toneladas). Los factores de emisión utilizados en este trabajo se muestran al final de este capítulo [ref. 3.11].

Como podemos observar en las gráficas del Anexo VI, donde se graficaron los factores de emisión que serán utilizados en este trabajo. Todos son sensibles a velocidades bajas, menores a 20 km/hr, estabilizándose después de este valor a un ritmo de emisión constante del contaminante dado. Esto es más marcado para los FE de vehículos tipo Minibus y Bus. Si bien cada norma tiene un nivel de emisión diferente la tendencia se mantiene en todas las gráficas. Ya que se utilizará una velocidad promedio de 16.8 km/hr, estamos en la sección de alta emisión.

Cabe resaltar que para el consumo de combustible conforme aumenta la norma (SN, Euro I, Euro II a Euro III), es decir disminuye el límite máximo de emisiones permitidas, el consumo aumentando. Muchas de estas requieren de uso de combustible extra para por ejemplo regenerar o limpiar filtros y catalizadores. Si bien la tecnología en cuanto a eficiencia ha avanzado en el tiempo y los motores tienen mayores eficiencias al avanzar los años, estos factores de emisión se basan en pruebas realizadas a gran cantidad de vehículos para poder sacar tendencias.

Debido a que el consumo de combustible aumenta, impacta directamente en las emisiones de CO<sub>2</sub>. No se presentan curvas teóricas de CO<sub>2</sub> en el Anexo VI debido a que estas no solo dependen según la correlación del consumo de combustible, sino también de la generación del resto de emisiones, es decir que se tienen las emisiones con sus factores de corrección y luego se calcula las de CO<sub>2</sub>. Un vehículo que este diseñado con un control mayor de emisiones, catalizadores más potentes por ejemplo,

desarrollaría menores potencias de trabajo lo que se manifestaría también en un mayor consumo de combustible.

### 3.4.3 Emisiones de CO<sub>2</sub>

Estas emisiones están directamente relacionadas con los consumos de combustible, asumiéndose para el cálculo de CO<sub>2</sub>, que todo el carbono contenido en el combustible es oxidado. [ref. 3.12]

$$E_{CO_2} = 44.011 \times \frac{CC}{12.011 + 1.088 \times r_{HC}} - \frac{E_{CO}}{28.011} - \frac{E_{HCT}}{13.85} - \frac{E_{MP}}{12.011} \quad (3.6)$$

Donde,

CC = Consumo de Combustible (ton/año)

E<sub>CO</sub> = Emisiones de CO (ton/año)

E<sub>HCT</sub> = Emisiones de HCT (ton/año)

E<sub>PM10</sub> = Emisiones de Material Particulado (ton/año)

r<sub>H:C</sub> = Relación entre el hidrogeno y carbono existente en el combustible 1.8 para gasolina; 2.0 para diesel

### 3.4.4 Factor de corrección por deterioro (FC<sub>Det</sub>)

Ya que los factores de emisión generalmente expresados en gramos de contaminante arrojados por el tubo de escape por cada kilómetro recorrido por el vehículo, corresponden a aquellos tomados de la literatura europea y no necesariamente coinciden con nuestra realidad, ya que el parque automotriz europeo cuenta con una tecnología más avanzada, mejor

logística y regulaciones en cuanto a emisiones más rigurosos, las cuales son cumplidas, características que en nuestro país no se cumplen. Por esto existe una alta probabilidad de poder estar subestimando los resultados de emisiones. Debido a esto el factor de corrección por deterioro ha sido agregado a la fórmula general para compensar las diferentes características de cada realidad. Sin embargo las propuestas europeas del COPERT solo nos dan un deterioro para vehículos a gasolina y livianos en la cual se asume que a partir de los 120,000 km se estabiliza el aumento de las emisiones. [ref. 3.13]

Para poder agregar este factor de corrección a los resultados se utilizará el estudio chileno “DICTUC – 2007”, cuyo parque automotriz en la época de estudio era muy similar al nuestro y proponen porcentajes anuales de aumento de emisiones debido a la antigüedad de vehículos. [ref. 3.14]

Al respecto, dentro del estudio chileno “Evaluación de Nuevas Medidas de Control de Emisiones para el Sector Transporte en la Región Metropolitana” se estudió la manera de poder obtener los factores de deterioro mencionados. Se efectuó una revisión de estudios relacionados a factores de deterioro a nivel nacional e internacional, en donde dentro de esta última revisión se plantea, por ejemplo, utilizar un deterioro anual de vehículos con convertidor catalítico de 13% para  $\text{NO}_x$  y 16% para CO y HC.

Se ha concluido en el estudio mencionado anteriormente que haciendo un seguimiento a una muestra de vehículos registrados por los últimos 10 años (fines de los 90 a fines de los 2000) por los procedimientos seguidos en las plantas de revisión técnica de la Región Metropolitana de Chile, es decir, haciendo el seguimiento a las mediciones obtenidas en cada año para cada vehículo específico, se pueden obtener indicadores de la evolución del deterioro del vehículo desde el punto de vista de sus emisiones y obtener de esta forma porcentajes promedio de deterioro anual. Además de la información de las mediciones efectuadas en las plantas de revisión técnicas de Santiago de Chile, se utilizó información de mediciones hechas en el 3CV (Centro de Control y Certificación Vehicular de Chile). A partir de estas revisiones, dentro de dicho estudio se obtuvieron factores de deterioro para

vehículos gasolineros con y sin convertidor catalítico y vehículos diesel para emisiones de CO, NOX y HCT. Finalmente se obtuvo un factor de emisión corregido por deterioro para cada categoría de vehículo liviano considerado. De acuerdo a lo establecido por este estudio chileno los vehículos Diesel se deterioran a una tasa mayor en los años iniciales de uso, los primeros 9 años y luego esta tasa decrece hasta hacerse cero. En este estudio se consideró que los vehículos de más de nueve años de antigüedad fueron deteriorados los primeros nueve años a una tasa constante y los años posteriores la tasa se consideró como despreciable, es decir 0. [ref. 3.15]

La siguiente tabla resume los porcentajes de deterioro anual por contaminante asociados a cada categoría vehicular para vehículos en el estudio antes señalado. Estos valores indican el porcentaje de deterioro anual que experimentan en promedio los vehículos livianos según tecnología.

Tabla 3.1: Factores de deterioro anuales [ref. 3.16]

Contaminante	Vehículo comercial Diesel	
	Catalítico	No catalítico
CO	8%	1%
PM	10%	4%
HC	6%	3%
NOx	9%	3%

Para la base de datos obtenida se trabajó con factores de deterioro “catalítico” solamente para vehículos sin norma de emisión, fabricados desde 1993 hacia atrás. El resto de vehículos han sido trabajados con factores de

deterioro “catalítico”. Se asumió lo anterior debido a que se tendría que confirmar físicamente cada vehículo para saber si fue fabricado con algún tipo de catalizador, es por esta razón que se asumió la disponibilidad de tecnología catalítica a partir del año 1993 en nuestro país dando como resultado un escenario de mayor deterioro.

#### 3.4.5 Corrección por combustible

En base a las metodologías de corrección de factores de emisión indicadas en COPERT, es factible hacer correcciones a los factores de material particulado, NOx y CO de acuerdo a la composición de los combustibles, mediante la siguiente ecuación:

$$FE_{Comb} = (FC_{Comb} + 1) \times FE \quad (3.7)$$

En donde,

$FE_{Comb}$  = Factor de emisión corregido por combustible

$FC_{Comb}$  = factor de corrección de vehículos diesel asociado a propiedades del combustible

$FE$  = factor de emisión original

Las ecuaciones de factores de corrección en base a los parámetros asociadas a las características de los combustibles se diferencian en vehículos pesados a diesel cuya ecuación se muestra a continuación [ref. 3.17]:

$$FC_{Comb} = [0,06959 + 0,00006 \times DEN + 0,00065 \times PAH - 0,00001 \times CN] \times [1 - 0,0086 \times \frac{450 - S}{100}] \quad (3.8)$$

Dónde:

DEN = Densidad del combustible diesel a 15°C [kg/m<sup>3</sup>]

S = Contenido de azufre en ppm

PAH = Contenido de aromáticos policíclicos en %

CN = Número de Cetano

En el caso de la ciudad de Lima los parámetros de la fórmula fueron los siguientes:

Tabla 3.2: Factor de corrección por combustible y propiedades del Diesel-2  
Peruano [ref. 3.18]

Factor de corrección por combustible		
Densidad	860	kg/m <sup>3</sup>
Azufre	50	ppm
PAH	35	%
Cn	51	
T95	360	°C
Fcorrec	0.07750842	

#### 3.4.6 Corrección por porcentaje de Biodiesel

La EPA ha determinado la variación porcentual de las emisiones en función del porcentaje en volumen de biodiesel. La expresión general se presenta en la siguiente ecuación cuyos coeficientes dependen del tipo de contaminante según se muestra en la siguiente tabla. La evolución de la variación porcentual de emisiones se presenta en la expresión siguiente [ref. 3.19]:

$$VPE = (e^{f \times vol_{BD}} - 1) \times 100 \quad (3.9)$$

Donde,

VPE: Variación porcentual de emisiones (%)

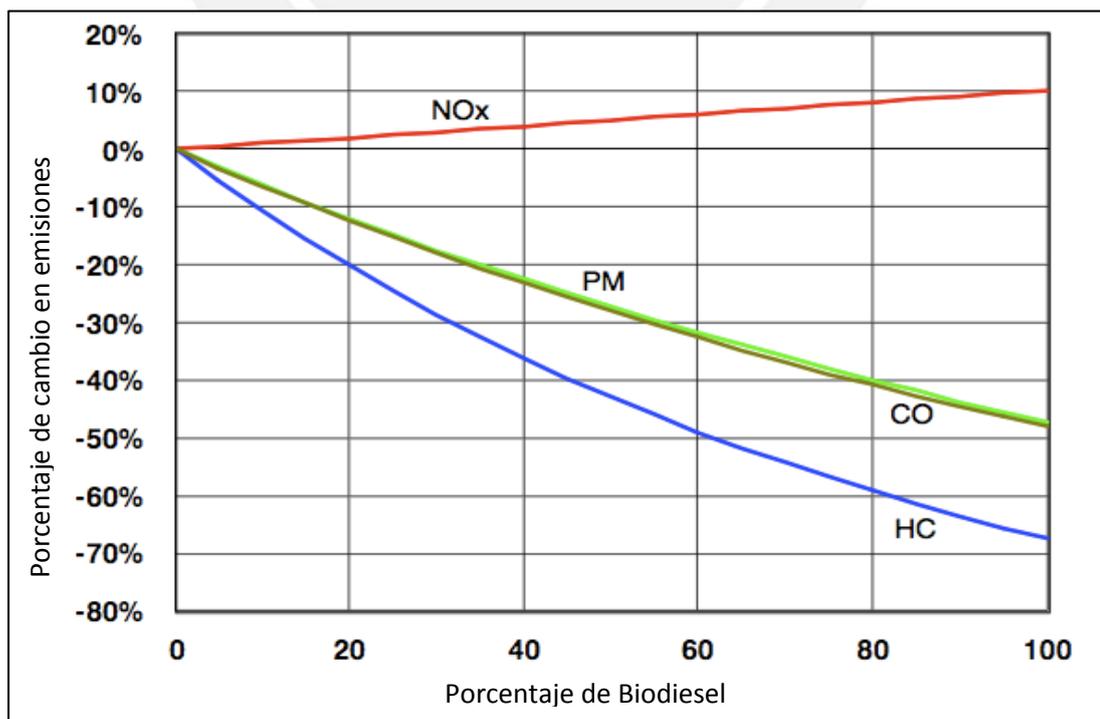
vol<sub>BD</sub> : Porcentaje en volumen de Biodiesel (%)

f: Coeficiente según tipo de contaminante

Tabla 3.3: Coeficiente según tipo de contaminante [ref. 3.20]

Listas de coeficientes para la ecuación	
Contaminante	Coeficiente f
NOX	0,0009794
MP	-0,006384
HC	-0,011195
CO	-0,006561

Figura 3.1: Evolución de las emisiones según porcentaje de biodiesel [ref. 3.21]



La imagen 3.1 muestra la variación de los contaminantes según la ecuación 3.9. Como se vió en el primer capítulo el único contaminante que aumenta debido al incremento de biodiesel como combustible en el Diesel-2 es el óxido nitroso, mientras que el resto de contaminantes disminuyen.

Ya que en nuestro país se comercializa BD5 los parámetros de corrección son los siguientes:

Tabla 3.4: Porcentaje de cambio en emisiones por 5% de biodiesel en el combustible

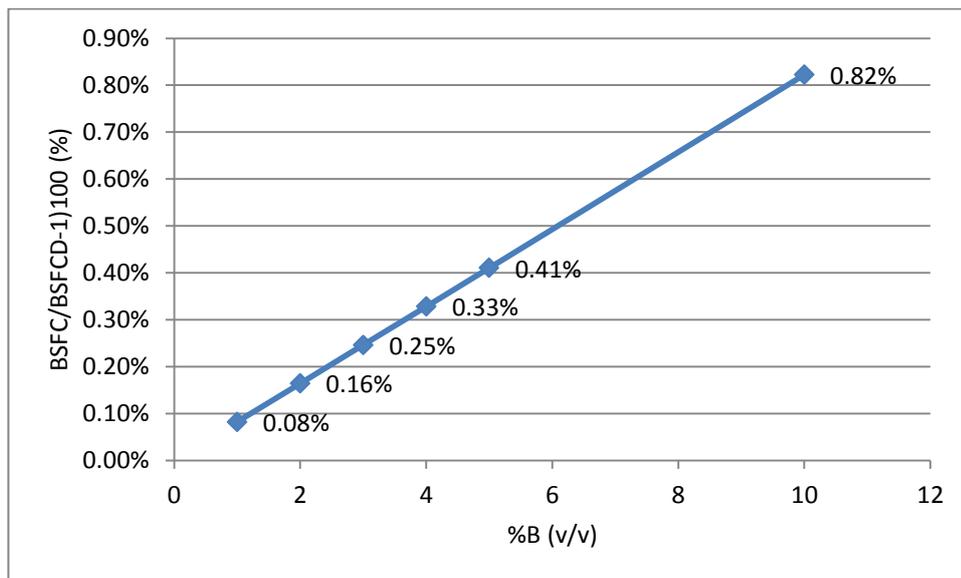
Contaminante	% de cambio en emisiones
PM	-3.14%
Nox	0.49%
HC	-5.44%
CO	-3.23%

En el caso consumo de combustible, el contenido de biodiesel en el combustible modifica este parámetro. Sin embargo se han realizado gran números de ensayos para poder llegar con sustento a saber en primer lugar si aumenta o disminuye el contenido de biodiesel y cuál es la magnitud del cambio. La mayor parte de la literatura sobre este tema confirma que el consumo de combustible aumenta en una proporción similar a la disminución del poder calorífico del Biodiesel en comparación al diesel puro. La siguiente ecuación expresa el cambio en el consumo específico de combustible ( $bsfc$ ) para diferentes porcentajes de biodiesel [ref. 3.22].

$$\frac{bsfc}{bsfc_D} = e^{0.00008189\%B}. \quad (3.10)$$

Para poder conocer según la ecuación 3.10 el efecto de un contenido de 5% de biodiesel se generó la figura 3.2 donde se muestra que para este porcentaje de biodiesel el aumento del consumo de combustible sería de 0.41% por lo cual se considera despreciable y no se corrige por porcentaje de biodiesel el consumo de combustible.

Figura 3.2: Incremento del consumo específico de combustible al aumentar el contenido de biodiesel [ref. 3.23]



### 3.5 Ejemplo de cálculo

Calcular el factor de emisión de CO para un vehículo dado de la base de datos.

Datos del vehículo:

Ruta:	IO52
Marca:	MUDAN
Modelo:	MD6703D2HZ
Clase:	MINIBUS
Placa:	A3Y-752
Año de Fabricación:	2005
Norma:	Euro III

Debido a que la clase de este vehículo es “Minibus” bajo la norma Euro III, se selecciona el FE correspondiente que se detallan al final de este capítulo.

$$FE_{CO} = 16.5208447V_{prom}^{-0.7447} \quad (3.11)$$

$$V_{prom} = 16.8 \text{ km/hr} \quad (3.12)$$

$$FE_{CO} = 2.021 \text{ g/km} \quad (3.13)$$

$$FE_{CO_{comb}} = (FC_{comb} + 1) \times FE_{PM} \quad (3.14)$$

$$FC_{comb} = 0.077508417 \quad (3.15)$$

$$FE_{CO_{comb}} = 2.178 \text{ g/km} \quad (3.16)$$

$$FE_{CO_{comb}/BD} = FE_{CO_{comb}} \times (1 + FC_{BD_{CO}}) \quad (3.17)$$

$$FC_{BD_{CO}} = -0.0323 \quad (3.18)$$

$$FE_{CO_{comb}/BD} = 2.108 \text{ g/km} \quad (3.19)$$

Para este vehículo el año de fabricación es 2005, es decir tiene una edad de 8 años además la norma de emisiones es Euro III por lo tanto el factor de deterioro sería de 10% anual generando el siguiente factor de corrección:

$$FC_{Det} = 1.08^8 = 1.851 \quad (3.20)$$

$$FE_{CO_{comb}/BD/Det} = FE_{CO_{comb}/BD} \times FC_{Det} \quad (3.21)$$

$$FE_{CO_{comb}/BD/Det} = 3.901 \text{ g/km} \quad (3.22)$$

$$FE_{CO_{comb}/BD/Det} = 3.901 \frac{\text{g}}{\text{km}} \times 60000 \frac{\text{km}}{\text{año}} \times 1000000 \frac{\text{g}}{\text{ton}} = 0.234 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \quad (3.23)$$

Este proceso se repite con las emisiones HCT, CO y NOx seleccionando el FE correspondiente a cada una y los factores de corrección que les aplique, obteniendo lo siguiente:

$$FE_{HCT_{BD/Det}} = 0.106 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \quad (3.24)$$

$$FE_{PM_{10_{BD/Det}}} = 0.038 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \quad (3.25)$$

$$FE_{NOx_{comb}/BD/Det} = 0.936 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \quad (3.26)$$

Calculando las emisiones de CO<sub>2</sub> primero se obtiene el consumo de combustible ingresando a la misma tabla del factor de emisión seleccionado para las emisiones anteriores:

$$CC = 1645.0V_{prom}^{-0.4318} \quad (3.27)$$

$$V_{prom} = 16.8 \text{ km/hr} \quad (3.28)$$

$$CC = 486.76 \frac{\text{g}}{\text{km}} = 29.21 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \quad (3.29)$$

$$E_{CO_2} = 44.011 \times \frac{CC}{12.011 + 1.088 \times r_{HC}} - \frac{E_{CO}}{28.011} - \frac{E_{HCT}}{13.85} - \frac{E_{PM_{10}}}{12.011} \quad (3.30)$$

$$E_{CO_2} = 91.62 \frac{\text{ton}}{\text{año}} \quad (3.31)$$

A continuación se muestra un diagrama de flujo ilustrando como es el proceso de cálculo que se debe realizar según el método que se utilizó en este trabajo.

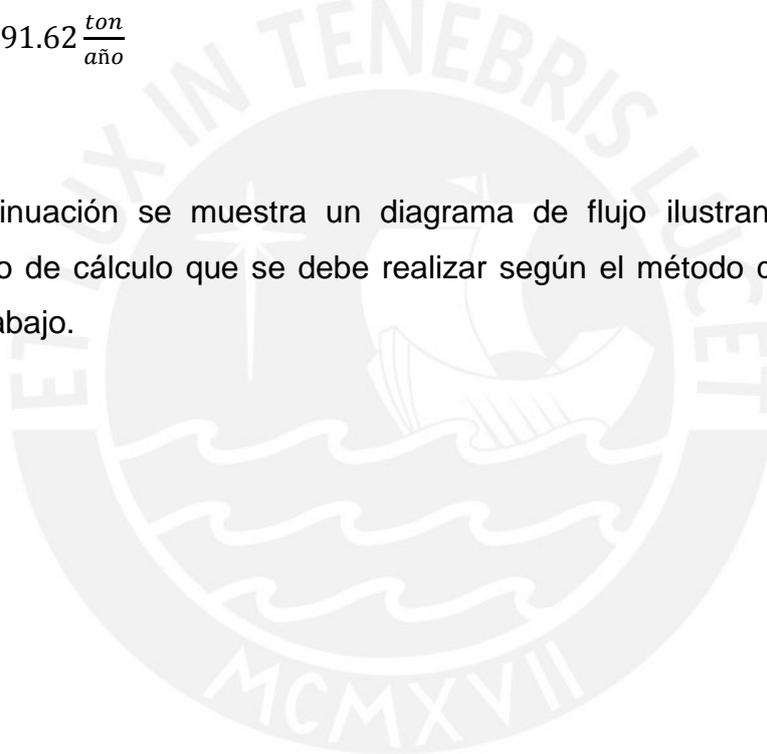
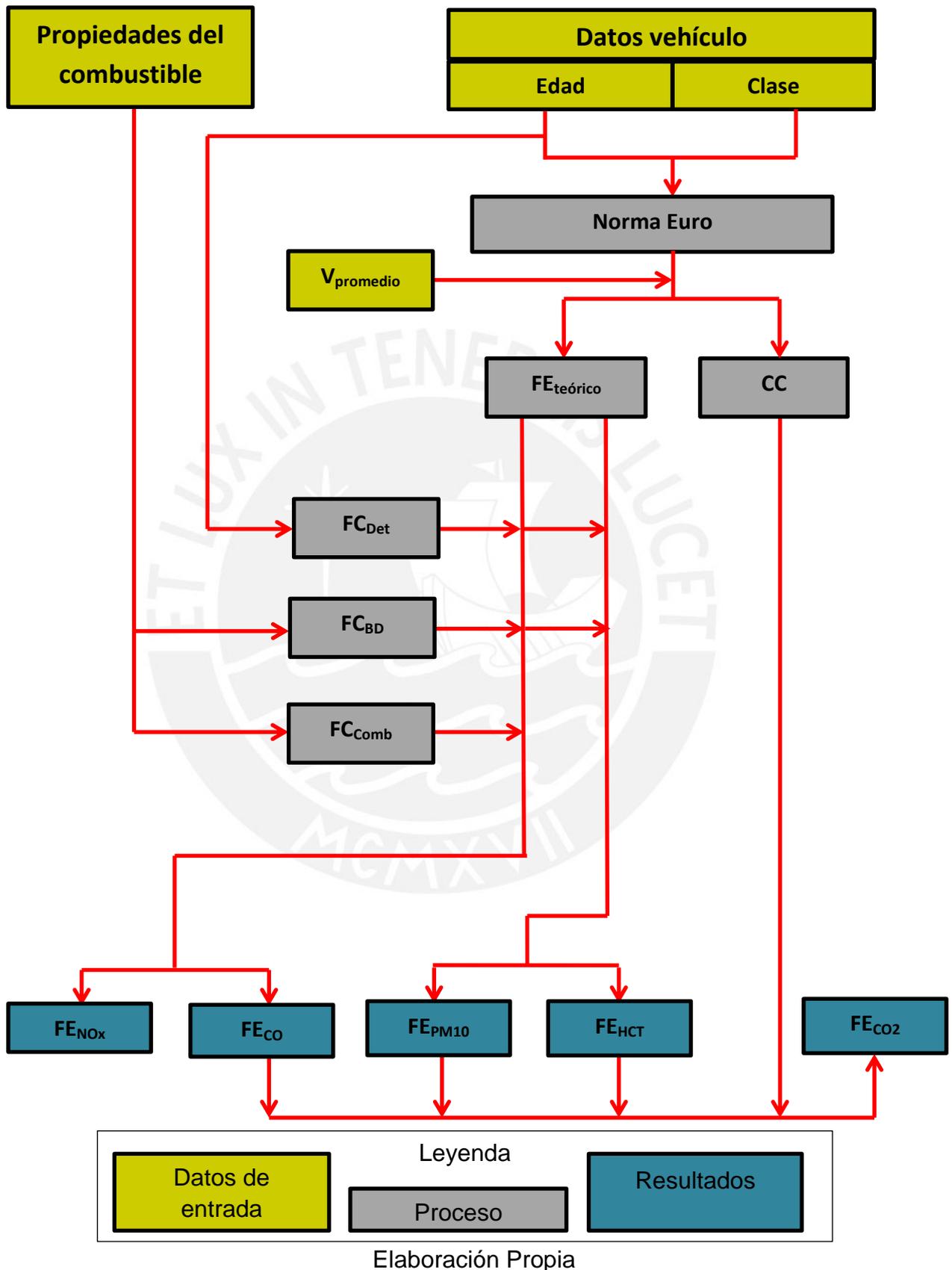


Figura 3.3: Diagrama de flujo para el proceso de cálculo de emisiones



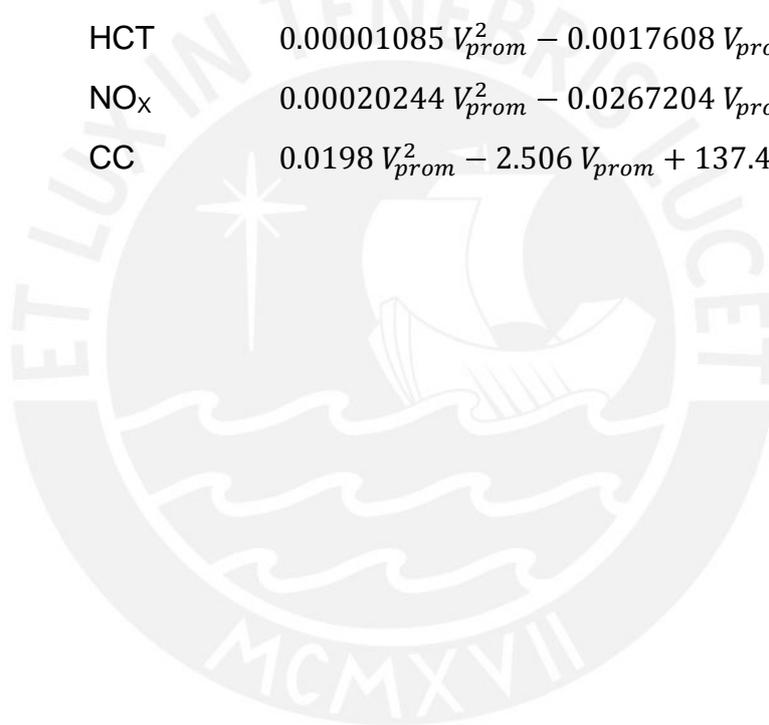
A continuación se muestran los FE utilizados en este trabajo, clasificados por tipo de vehículo y por norma de emisión.

Para la categoría Buses y Minibuses [ref. 3.24]:

Sin Norma	PM <sub>10</sub>	12.099253 $V_{prom}^{-0.7360}$
	CO	59.003 $V_{prom}^{-0.7447}$
	HCT	43.647 $V_{prom}^{-1.0301}$
	NO <sub>x</sub>	89.174 $V_{prom}^{-0.5185}$
	CC	864.1 $V_{prom}^{-0.4318}$
Euro I	PM <sub>10</sub>	5.109585 $V_{prom}^{-0.7360}$
	CO	29.5015 $V_{prom}^{-0.7447}$
	HCT	32.73525 $V_{prom}^{-1.0301}$
	NO <sub>x</sub>	862.4218 $V_{prom}^{-0.5185}$
	CC	1001.3 $V_{prom}^{-0.4318}$
Euro II	PM <sub>10</sub>	3.14436 $V_{prom}^{-0.7360}$
	CO	23.6012 $V_{prom}^{-0.7447}$
	HCT	30.5529 $V_{prom}^{-1.0301}$
	NO <sub>x</sub>	44.587 $V_{prom}^{-0.5185}$
	CC	1645.9 $V_{prom}^{-0.4318}$
Euro III	PM <sub>10</sub>	2.201052 $V_{prom}^{-0.7360}$
	CO	16.52084 $V_{prom}^{-0.7447}$
	HCT	21.38703 $V_{prom}^{-1.0301}$
	NO <sub>x</sub>	31.2109 $V_{prom}^{-0.5185}$
	CC	1645.9 $V_{prom}^{-0.4318}$

Para la categoría Microbuses [ref. 3.25]:

Sin Norma	PM <sub>10</sub>	$0.000045 V_{prom}^2 - 0.004885 V_{prom} + 0.1932$
	CO	$0.000223 V_{prom}^2 - 0.026 V_{prom} + 1.076$
	HCT	$0.0000175 V_{prom}^2 - 0.00284 V_{prom} + 0.2162$
	NO <sub>x</sub>	$0.000241 V_{prom}^2 - 0.03181 V_{prom} + 2.0247$
	CC	$0.0198 V_{prom}^2 - 2.506 V_{prom} + 137.42$
Euro I	PM <sub>10</sub>	$0.00003015 V_{prom}^2 - 0.00327295 V_{prom} + 0.12944$
	CO	$0.00018286 V_{prom}^2 - 0.02132 V_{prom} + 0.88232$
	HCT	$0.00001085 V_{prom}^2 - 0.0017608 V_{prom} + 0.134044$
	NO <sub>x</sub>	$0.00020244 V_{prom}^2 - 0.0267204 V_{prom} + 1.660254$
	CC	$0.0198 V_{prom}^2 - 2.506 V_{prom} + 137.42$



## Referencias bibliográficas

- [ref. 3.1] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE DE CHILE, *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*, 2009, p. 81.
- [ref. 3.2] Idem, p. 82.
- [ref. 3.3] Ibídem.
- [ref. 3.4] Idem, p. 83.
- [ref. 3.5] Idem, p. 87.
- [ref. 3.6] Idem, p. 88.
- [ref. 3.7] Idem, p. 94.
- [ref. 3.8] Idem, p. 95.
- [ref. 3.9] SISTEMAS SUSTENTABLES LTDA., *Determinación de factores de emisión para el parque vehicular asociados al uso de biocombustibles*, p. 27.
- [ref. 3.10] AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE JAPÓN (JICA), MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DE LA REPÚBLICA DEL PERÚ, *Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao – Informe Final*, 2013, p. 7-5.
- [ref. 3.11] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE DE CHILE, *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*, 2009, pp. 127-131.
- [ref. 3.12] Idem, p. 89.
- [ref. 3.13] Idem, p. 96.
- [ref. 3.14] INGENIERÍA DICTUC S.A., DIVISIÓN DE MEDIO AMBIENTE CHILE, *Evaluación de Nuevas Medidas de Control de Emisiones para el Sector Transporte en la Región Metropolitana – Informe Final*, 2007, p. 152.
- [ref. 3.15] Ibídem.
- [ref. 3.16] Idem, p. 22.
- [ref. 3.17] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE DE CHILE, *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*, 2009, pp. 94.
- [ref. 3.18] SWISSCONTACT Julián E. Soriano, DURSBECK Frank, *Límites Máximos Permisibles para Vehículos Nuevos y Usados, Importados o Fabricados para Circular en el Perú*, 2001, p. 65.
- [ref. 3.19] SISTEMAS SUSTENTABLES LTDA., *Determinación de factores de emisión para el parque vehicular asociados al uso de biocombustibles*, p. 27.
- [ref. 3.20] Ibídem.
- [ref. 3.21] Idem, p. 28.
- [ref. 3.22] LAPUERTA Pedro, ARMAS Octavio, RODRIGUEZ-FERNANDEZ Jose. Effect of Biodiesel fuels on diesel engine emissions, 2007. p. 203.
- [ref. 3.23] Ibídem.
- [ref. 3.24] COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE DE CHILE, *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*, 2009, pp. 131.
- [ref. 3.25] Idem, p. 127.

## Capítulo 4: Determinación del nivel de emisiones en Lima y Callao

Los resultados generados, según la metodología planteada, se pueden encontrar en el Anexo digital VII y no se presentan en a continuación debido a la extensión que resulta haber obtenido datos para 4490 vehículos. En la siguiente tabla vemos la contribución en ton/año de cada contaminante.

Tabla 4.1: Contribución de emisiones por intervalos años de fabricación en ton/año

	Anterior a 1982	1982 - 1987	1988 - 1992	1993 - 1997	Posterior a 1997	Total
PM10	4.77	137.99	169.98	47.98	15.80	377
CO	28.27	772.40	836.15	286.67	110.16	2034
HCT	7.88	222.08	258.62	104.79	49.24	643
NO <sub>x</sub>	95.27	2609.82	2852.94	1254.98	437.08	7250
CO <sub>2</sub>	2085.69	61251.54	75500.90	39831.18	41688.58	220358

Elaboración Propia

Estos resultados muestran para cada uno de los cinco tipos de emisiones estudiados en este trabajo, el nivel de contaminación por año de la muestra y como la cantidad de vehículos por año de fabricación de chasis contribuye en cada una de las emisiones. En los cuatro casos de emisiones de PM<sub>10</sub>, CO, HCT y NO<sub>x</sub>, se puede apreciar que los vehículos de los años ochenta hasta mediados de los noventa son las principales fuentes emisoras. En cambio después de mediados de los noventa, la curva acumulada tiene una pendiente muy baja, es decir que estas unidades son responsables por una mínima contaminación en comparación con los vehículos más antiguas que constituyen el grueso del parque automotor. En la siguiente tabla podemos observar cual es la contribución en porcentaje de emisiones de los vehículos fabricados en el intervalo planteado.

Tabla 4.2: Contribución de emisiones por intervalos años de fabricación %

	Anterior a 1982	1982 - 1987	1988 - 1992	1993 - 1997	Posterior a 1997
PM <sub>10</sub>	1.27%	36.65%	45.14%	12.74%	4.20%
CO	1.39%	37.98%	41.12%	14.10%	5.42%
HCT	1.24%	34.96%	40.71%	16.13%	6.95%
NO <sub>x</sub>	1.33%	35.97%	39.11%	17.49%	6.11%
CO <sub>2</sub>	0.94%	27.71%	34.18%	18.14%	19.03%

Elaboración Propia

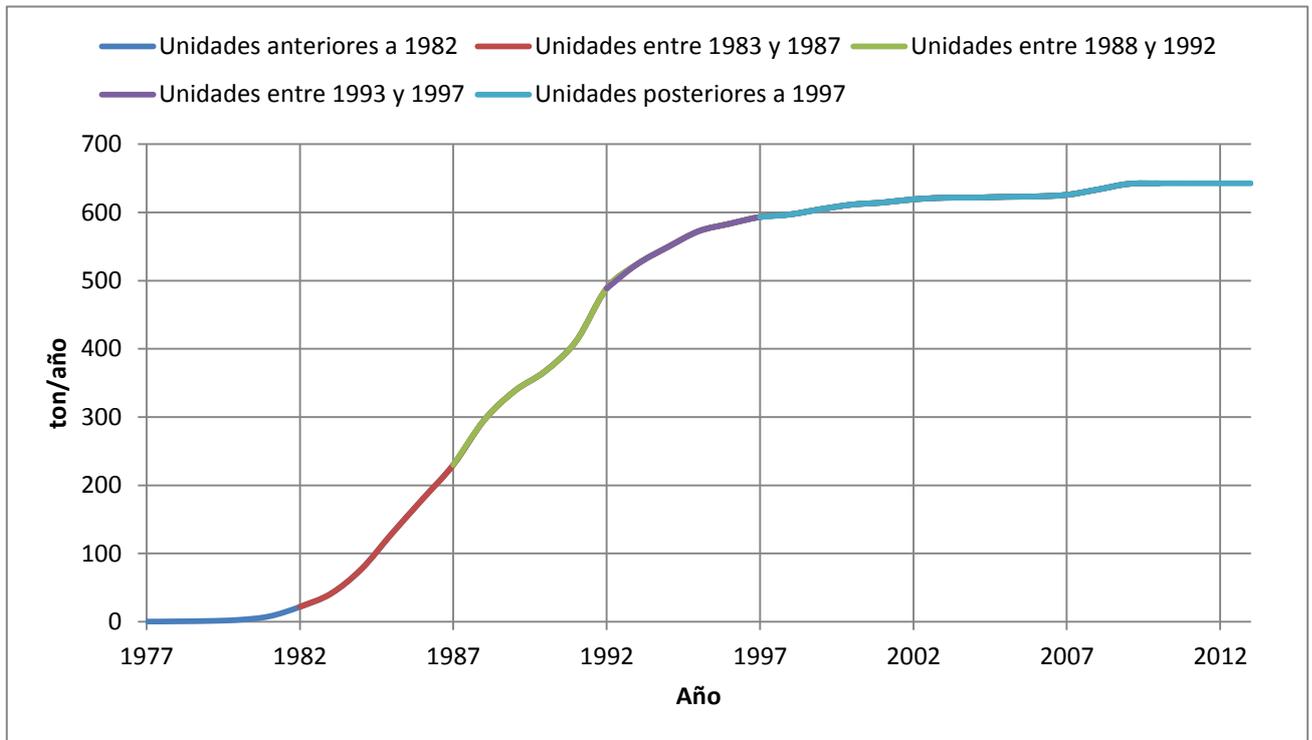
Para los cuatro tipos de emisiones contaminantes, PM<sub>10</sub>, CO, HCT y NO<sub>x</sub>, los vehículos fabricados antes de 1992 generan más del 75% de contaminación. Este es el rango crítico de la flota actual que debería ser retirado para poder obtener la mayor reducción de contaminación en nuestra ciudad. Esto por dos razones fundamentales, la primera es que la mayor cantidad de vehículos fueron fabricados dentro de estos rangos de años y segundo porque la cantidad de emisión de estos vehículos debido a una tecnología antigua en control de emisiones genera que sean los focos de mayor contaminación. Desde el año 97 ya se encuentra una gama más variada de vehículos con distintas normas de emisión mientras que antes del 97 la mayoría de vehículos, 72.16% no fueron fabricados bajo ninguna norma por lo tanto denominados “Sin norma”.

Lo más resaltante es que a pesar que la cantidad de vehículos fabricados posterior al año 1997 (10.22%) son responsables de un mayor porcentaje que los vehículos fabricados entre 1993 y 1997 a pesar que la flota es mayor en este rango de edad(17.62%). Es claro como cuando los vehículos tienen tecnologías de control de emisiones la combustión se vuelve más completa ya sea dentro de las cámaras de combustión o en el sistema de escape (controles de emisiones) lo que resulta en que se produzca mayor cantidad de CO<sub>2</sub>.

Ante el planteamiento de la MML de querer restringir la flota actual solo para buses con cierta edad, podemos ver que si tal medida tiene como finalidad solo eliminar unidades con más de 30 años, sería inútil e innecesario puesto que la reducción de emisiones contaminantes es despreciable. De plantearse restringir la circulación de vehículos de más de 25 años de edad, se reduciría la contaminación para  $PM_{10}$ , HCT, CO,  $NO_x$  y  $CO_2$  en 49.65%, 45.9%, 49.33%, 46.66% y 37.39% respectivamente y si se restringe unidades de más de 20 años, la reducción para los cuatro contaminantes  $PM_{10}$ , HCT, CO y  $NO_x$  estaría por encima de un 80% y la reducción en  $CO_2$  sería 68.77%.

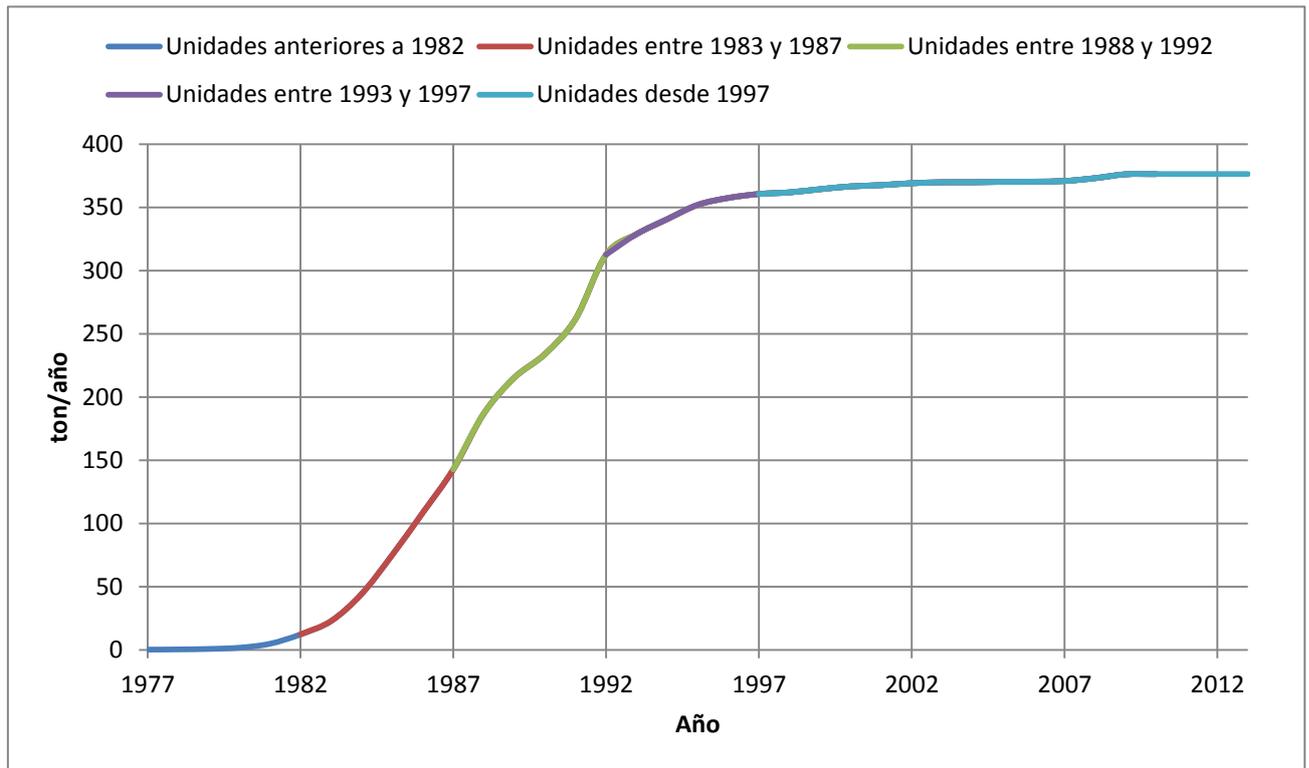
En los siguientes gráficos se muestra el acumulado de emisiones para la muestra obtenida. A partir del año 1993 hay una inflexión en la curva y la cantidad de emisiones se va volviendo constante hasta llegar al año 2011. Esto es debido a que a partir del año 2010 ya no se permitió el ingreso de vehículo y no se registraron vehículos con año de fabricación posterior al 2010. Esta tendencia se aprecia en las emisiones de  $PM_{10}$ , HCT, CO y  $NO_x$  sin embargo para  $CO_2$  a lo largo de toda la curva acumulada se ve la misma tendencia de incremento descrita anteriormente con una perturbación a partir del año 2007. Esto se debe, como se puede apreciar en la figura número 2.3, a la pequeña renovación vehicular que ocurrió pero se detuvo con el congelamiento de la flota y la no existencia de vehículos con año de fabricación posterior al 2010.

Figura 4.1: Acumulado de emisiones de HCT para muestra obtenida



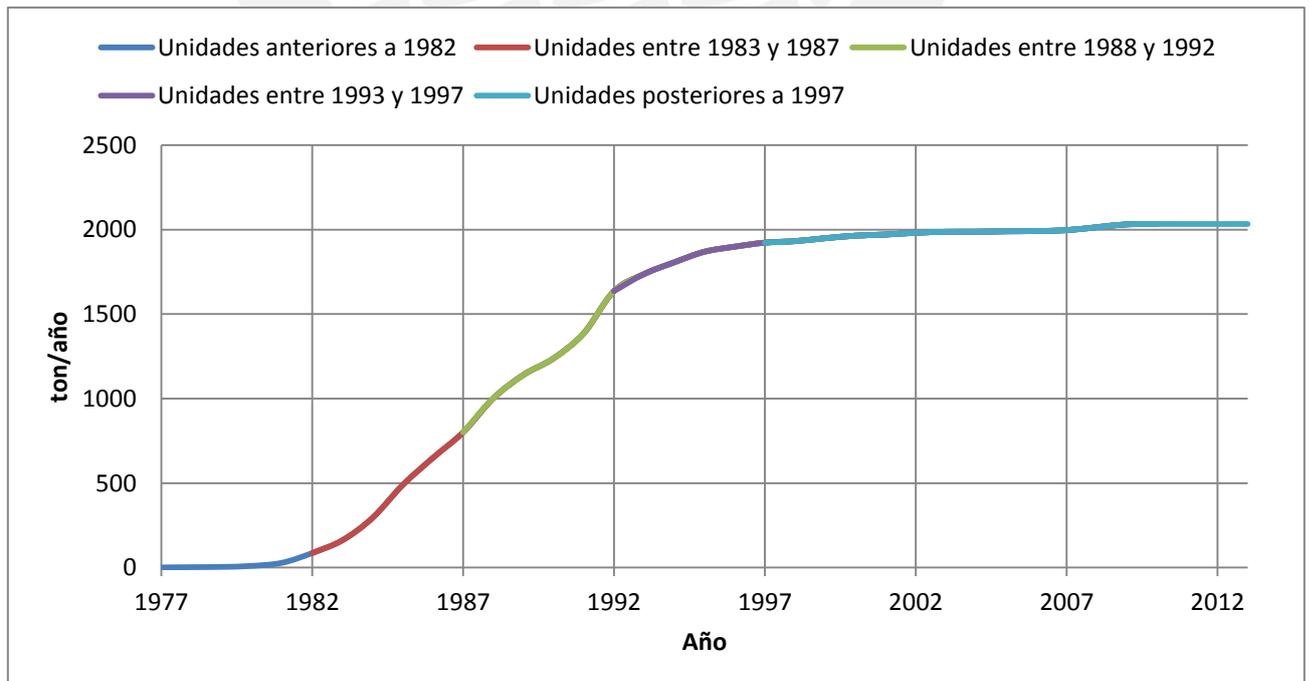
Elaboración Propia

Figura 4.2: Acumulado de emisiones de PM<sub>10</sub> para muestra obtenida



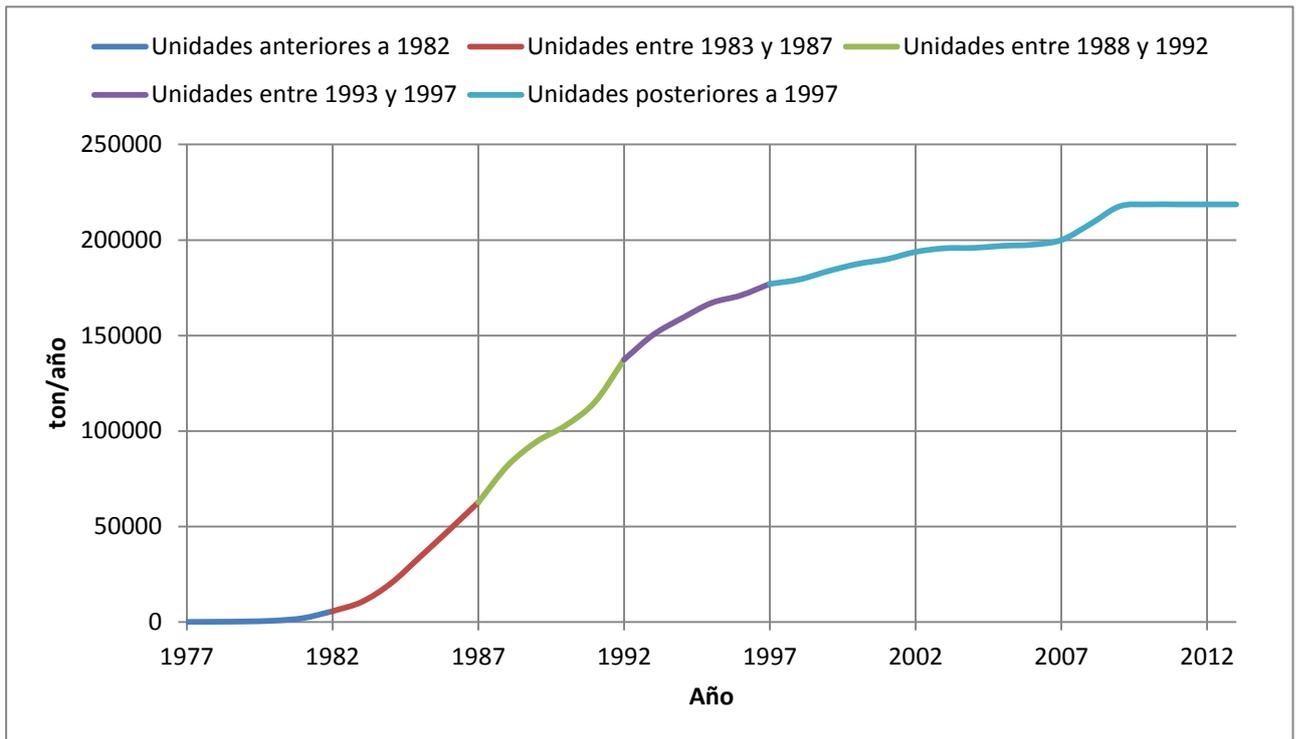
Elaboración Propia

Figura 4.3: Acumulado de emisiones de CO para muestra obtenida



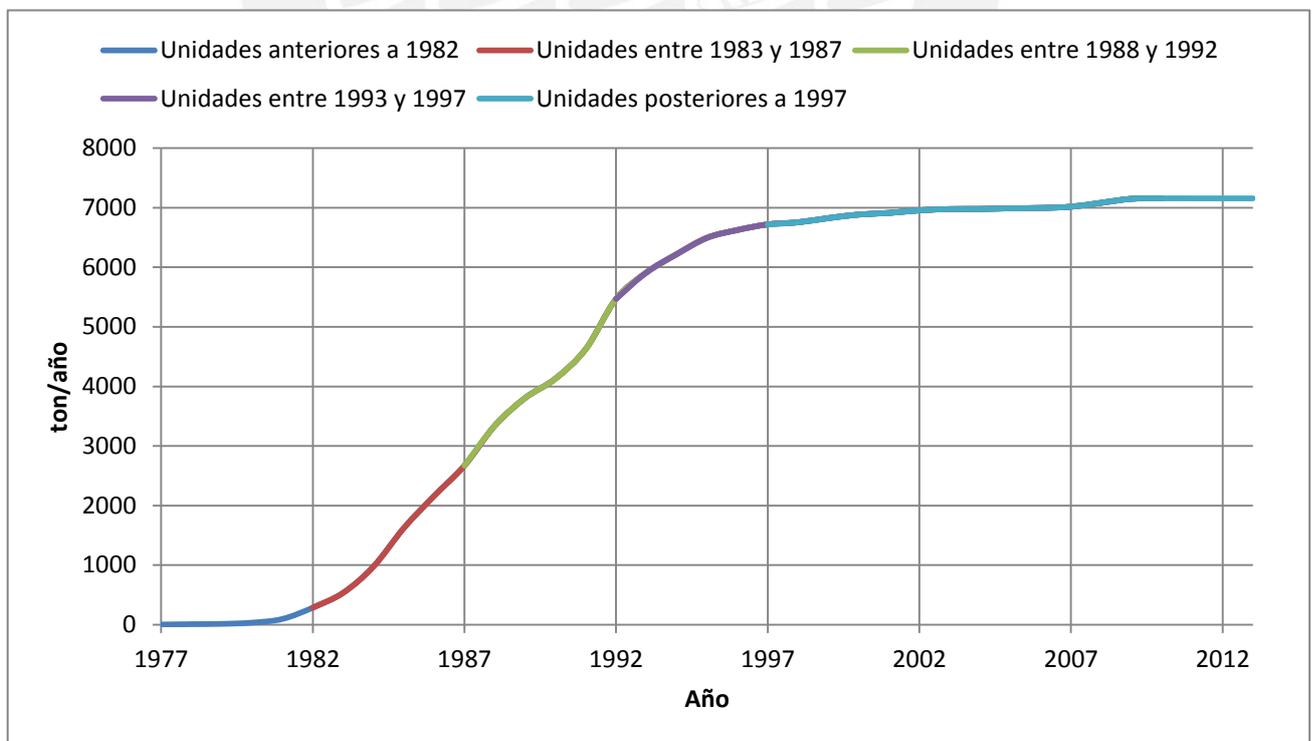
Elaboración Propia

Figura 4.4: Acumulado de emisiones de CO<sub>2</sub> para muestra obtenida



Elaboración Propia

Figura 4.5: Acumulado de emisiones de NO<sub>x</sub> para muestra obtenida

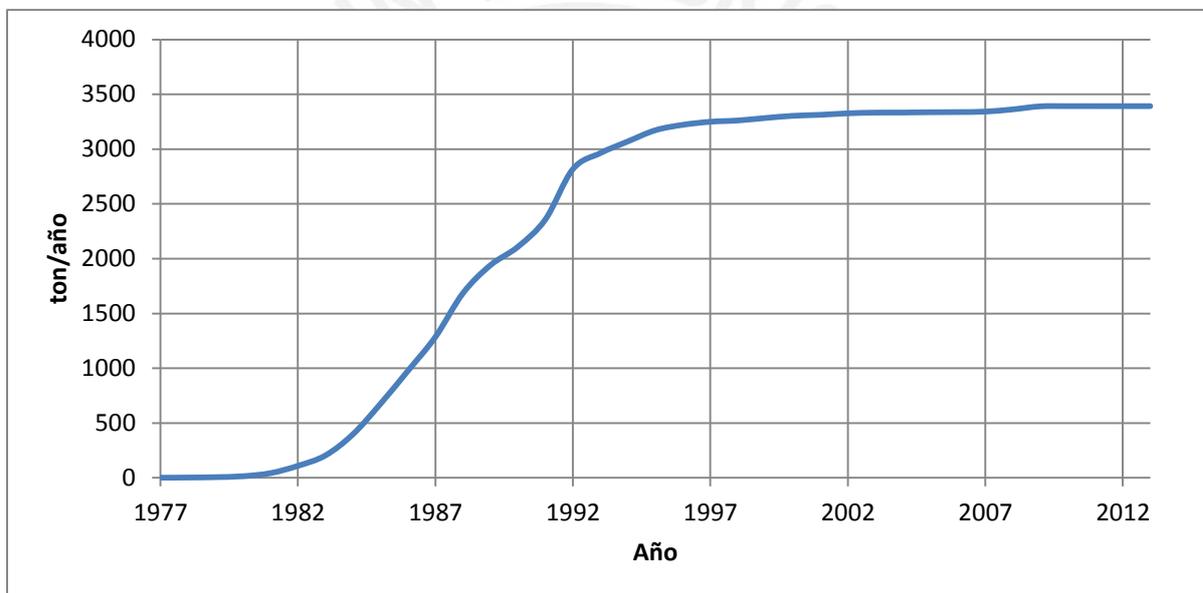


Elaboración Propia

Teniendo la imagen actual de la ciudad en cuanto a flota y a su generación de emisiones se planteará algunos escenarios hipotéticos, para ver la variación de las emisiones. Es importante denotar que debido a la naturaleza hipotética de estos escenarios solo tienen por fin querer mostrar cómo se reduciría el nivel de contaminación del parque automotriz.

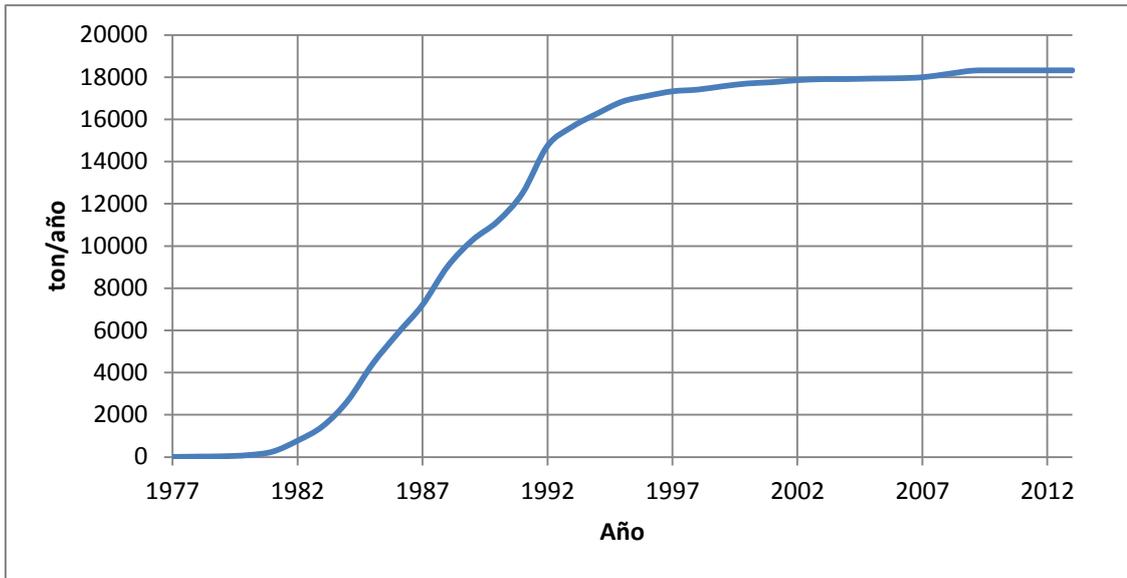
La muestra obtenida representa el 11.1% de la flota total, extrapolar los datos se generan resultados para toda la flota.

Figura 4.6: Acumulado de emisiones de PM<sub>10</sub> para flota total



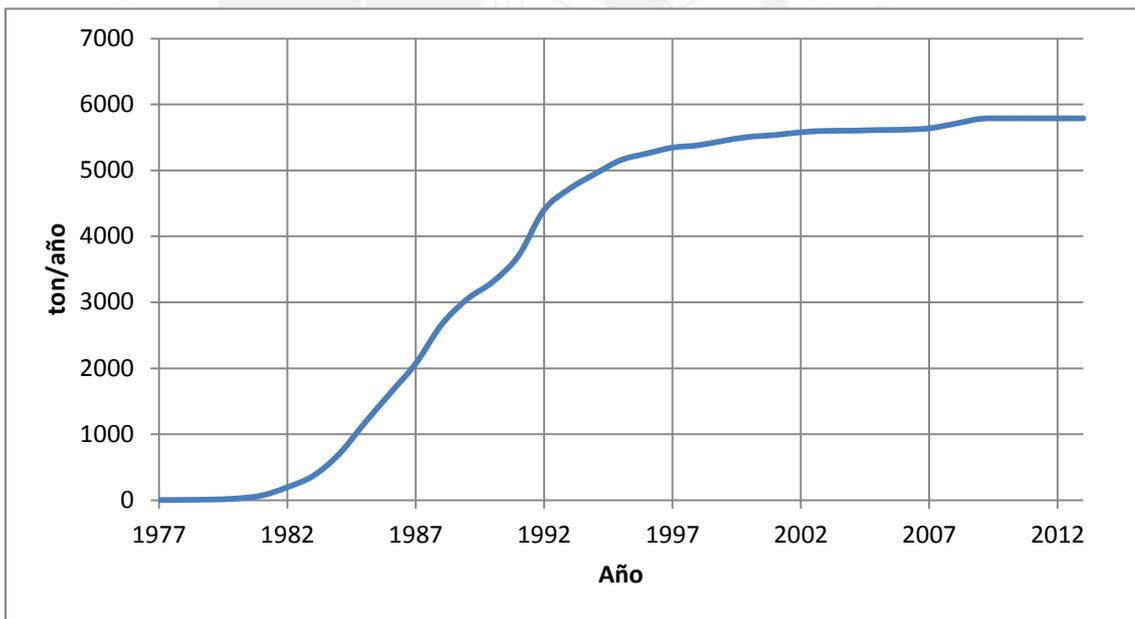
Elaboración Propia

Figura 4.7: Acumulado de emisiones de CO para flota total



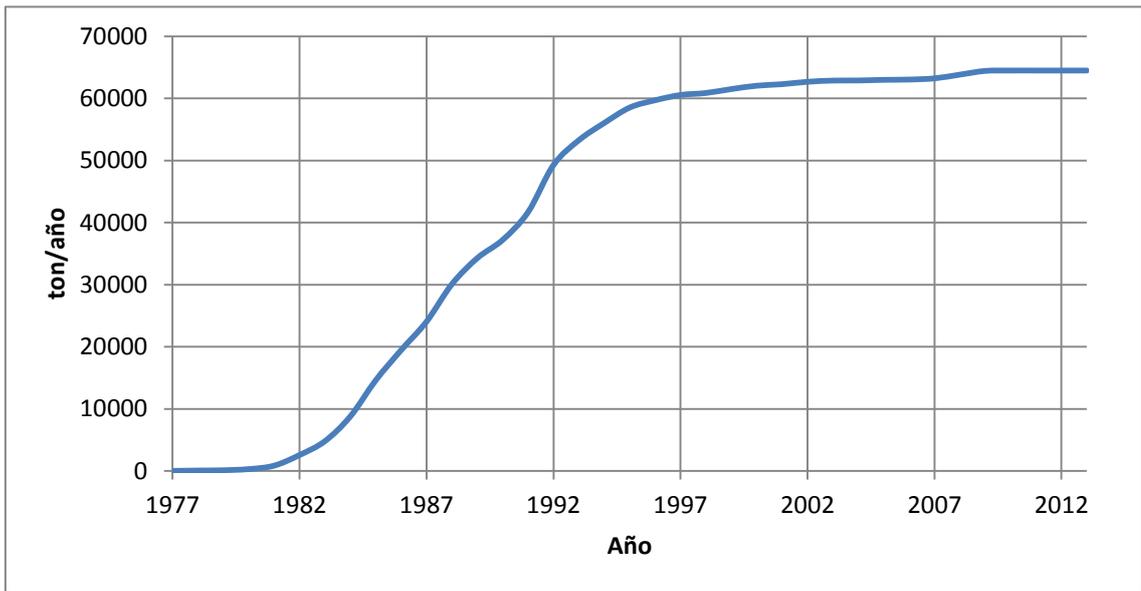
Elaboración Propia

Figura 4.8: Acumulado de emisiones de HCT para flota total



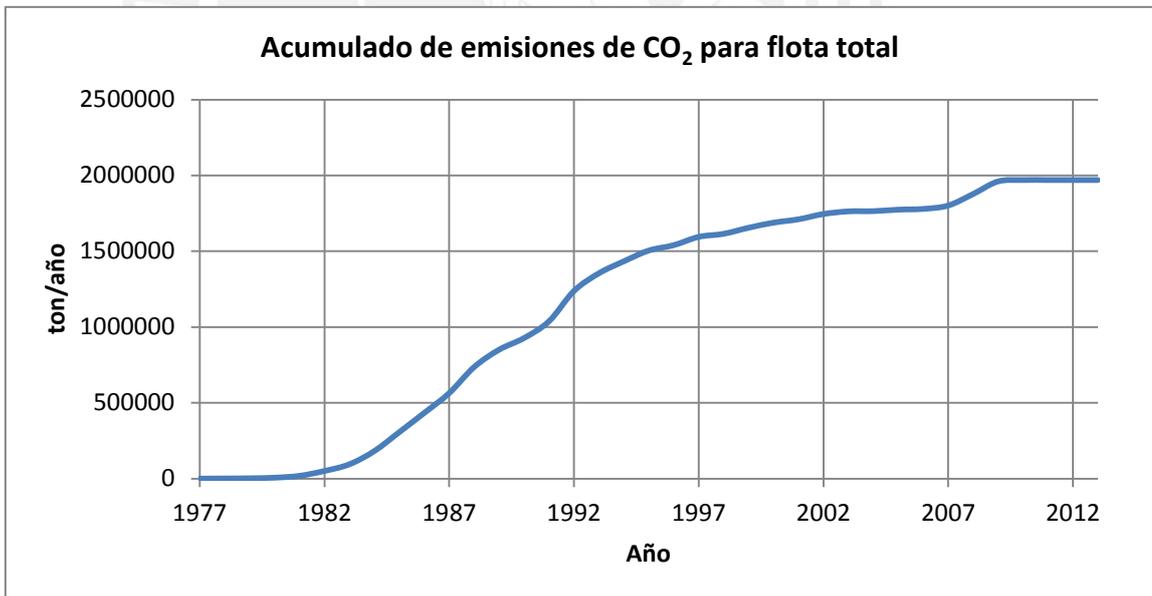
Elaboración Propia

Figura 4.9: Acumulado de emisiones de NO<sub>x</sub> para flota total



Elaboración Propia

Figura 4.10: Acumulado de emisiones de CO<sub>2</sub> para flota total



Elaboración Propia

#### 4.1 Caso 1: Retiro de exceso de flota

El primer escenario que se plantea es eliminar hoy mismo el exceso de flota que existe. Esto quiere decir que se retiraría el 45.7%, en números para la flota total de la ciudad de Lima serían 18500 vehículos.

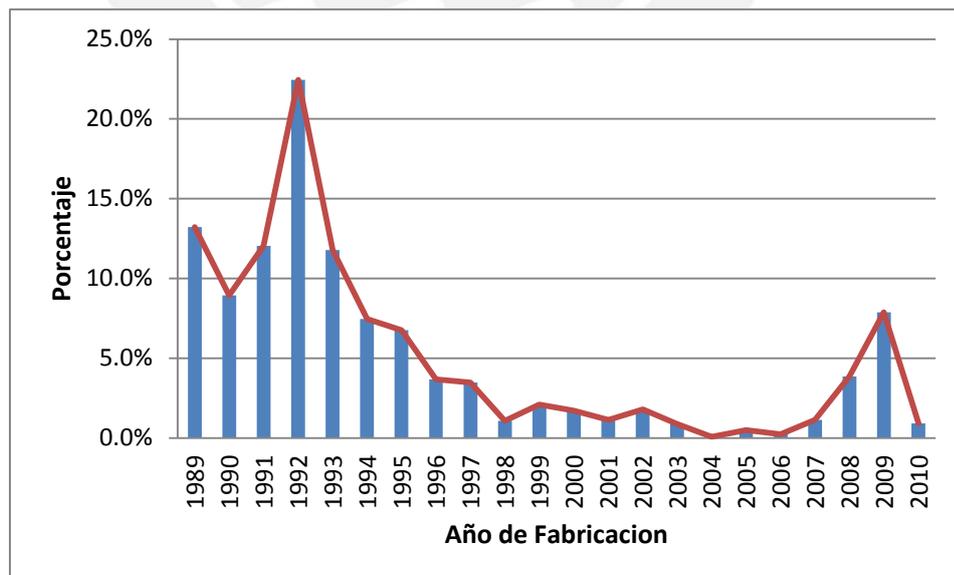
Para ilustrar este caso se redujo la muestra obtenida en 45.7% con la siguiente prioridad de retiro:

1. Antigüedad
2. Microbuses
3. Minibuses
4. Buses

Y luego se proyectó a la flota total de la ciudad de Lima lo cual deja solo en circulación como fue visto en el capítulo 2 de este trabajo 22000 vehículos. Este caso solo dejó vehículos fabricados desde 1989.

En la siguiente figura se ilustra en porcentajes como queda la flota de vehículos.

Figura 4.11: Distribución de la flota total según año de fabricación al retirar exceso de flota

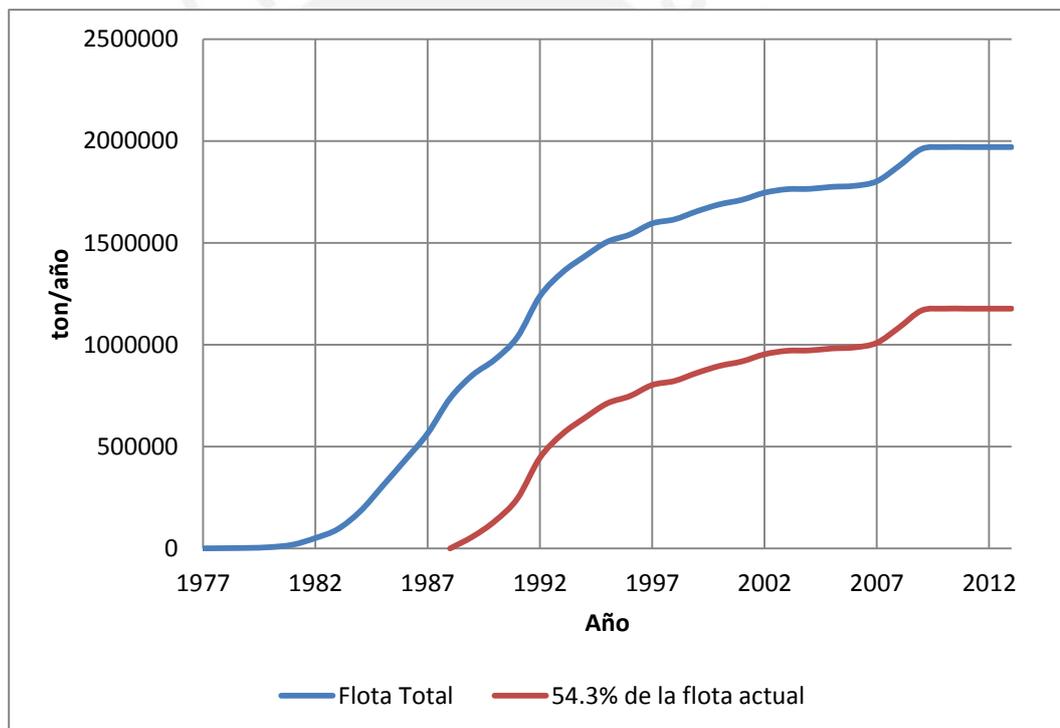


Elaboración Propia

Este caso hipotético resultaría en una reducción del 40.25%, 53.34%, 52.49%, 49.16% y 49.66% de las emisiones de CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, HCT, NO<sub>x</sub> respectivamente.

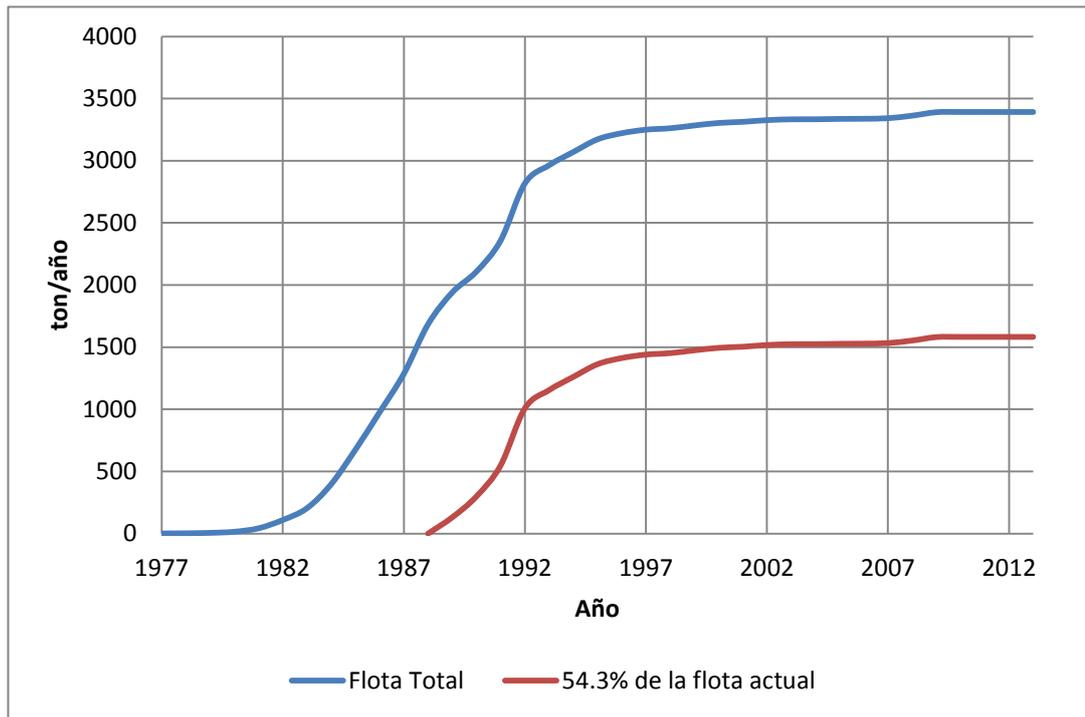
En las cinco emisiones las reducciones sobrepasan el 40%. Es decir tenemos una flota en exceso del 47.08% que contribuye en el caso más leve al 40.25%% de la contaminación actual (para CO<sub>2</sub>) y 53.34%, de reducción para PM<sub>10</sub>. En los siguientes gráficos se puede apreciar este efecto más claramente.

Figura 4.12: Comparativo de acumulado de emisiones de CO<sub>2</sub> para Caso 1



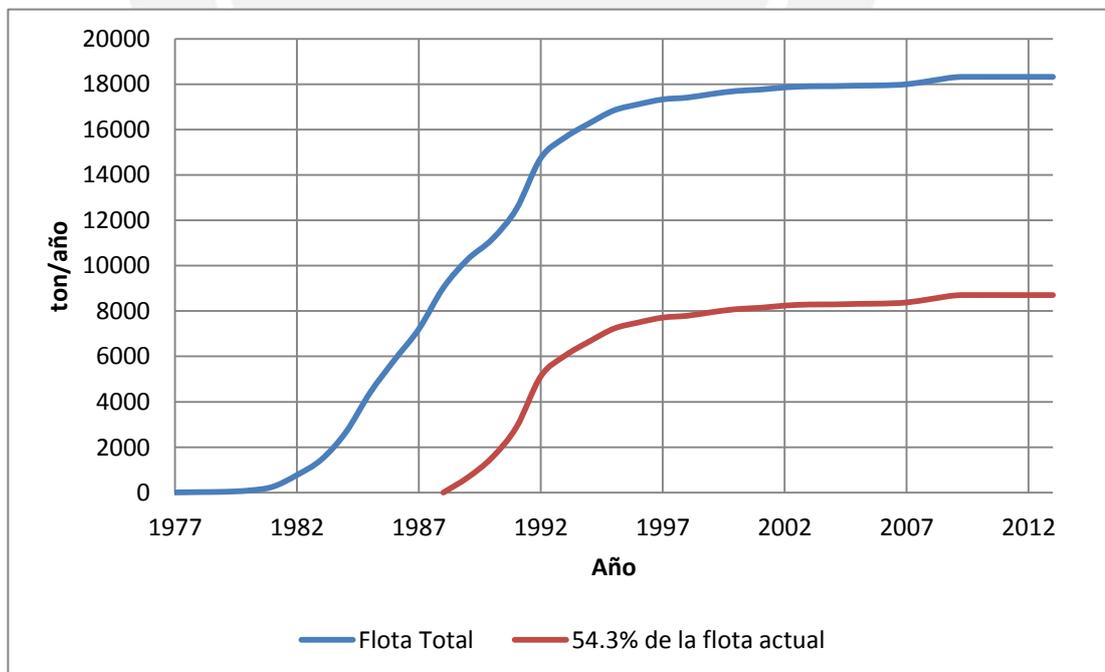
Elaboración Propia

Figura 4.13: Comparativo de acumulado de emisiones de PM<sub>10</sub> para Caso 1



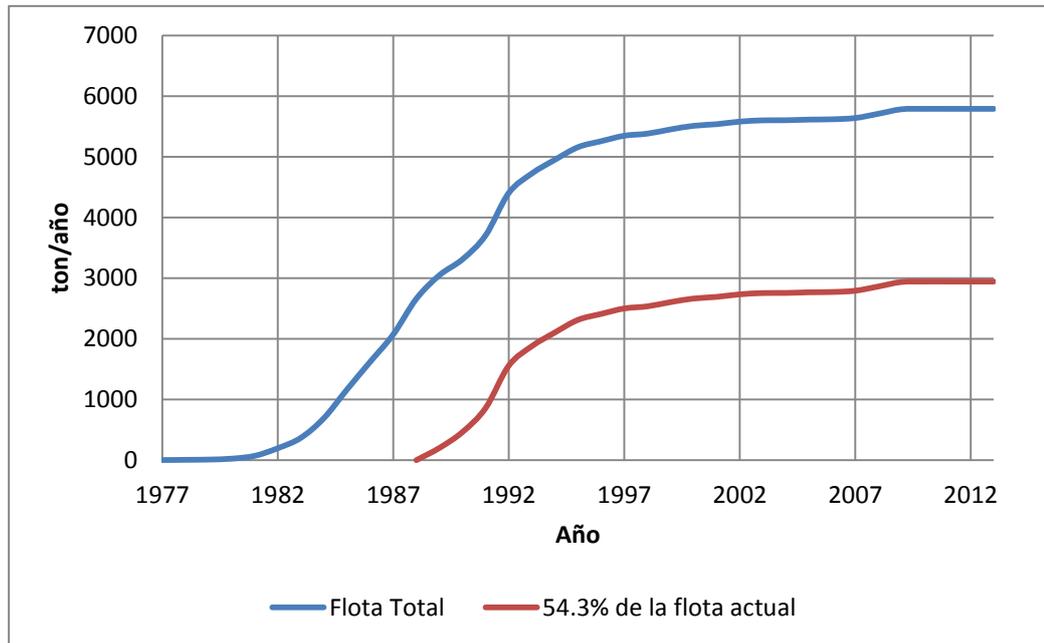
Elaboración Propia

Figura 4.14: Comparativo de acumulado de emisiones de CO para Caso 1



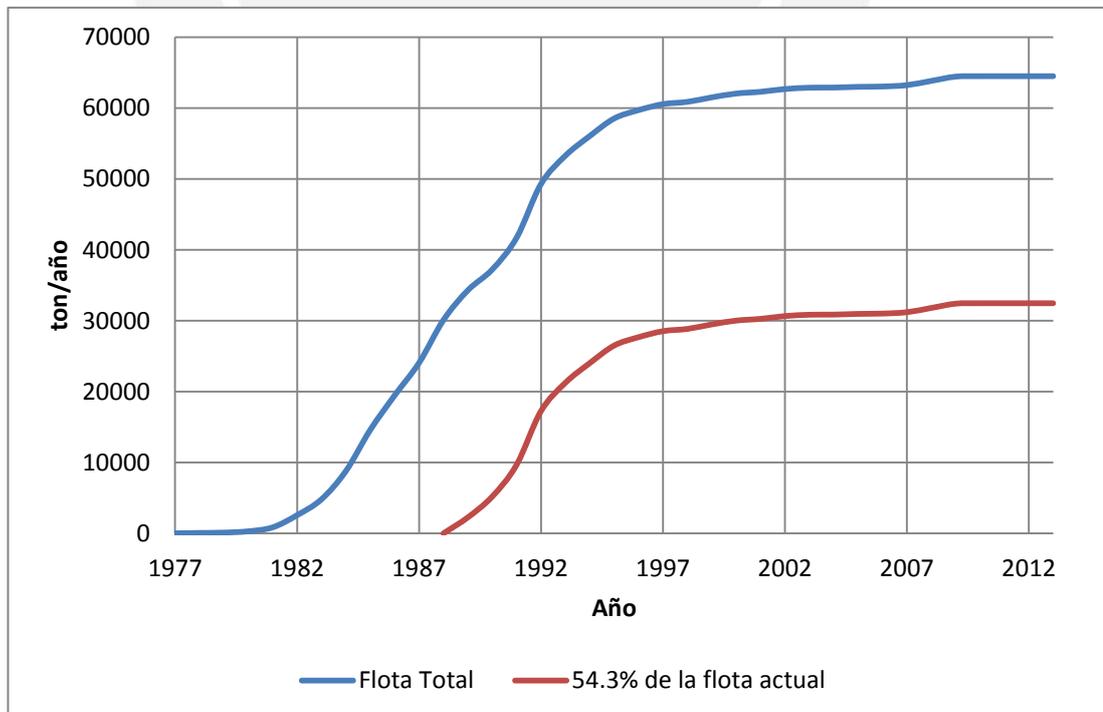
Elaboración Propia

Figura 4.15: Comparativo de acumulado de emisiones de HCT para Caso 1



Elaboración Propia

Figura 4.16: Comparativo de acumulado de emisiones de NO<sub>x</sub> para Caso 1



Elaboración Propia

#### 4.2 Caso 2: Reemplazo de vehículos mayores a 15 años por buses Euro III

El segundo caso que se presenta es la ejecución del plan de la municipalidad de Lima para reemplazar vehículos antiguos. En este escenario lo que se hizo fue retirar todas los vehículos con más de 15 años de fabricación y reemplazarlos por buses nuevos con tecnología Euro III para ver la evolución de las emisiones. Es importante explicar que para hacer este reemplazo de vehículos se tomó en cuenta la equivalencia de la Municipalidad Metropolitana de Lima por la cual un Bus vendría a ser el parámetro de equivalencia, un mini bus equivaldría a dos buses y un microbús a 3. De esta manera se realizó el cálculo encontrando que las unidades de exceso de flota son como se muestran a continuación. Hay que recordar que se están realizando los cálculos para la flota total de la ciudad. [ref. 4.1]

Tabla4.3: Equivalencias entre bus Patrón y flota vehicular actual con más de 15 años de edad

	Cantidad	Equivalencia [ref. 4.2]	Equivalencia en Buses
Microbuses	6811	3	2270
Minibuses	22748	2	11374
Buses	6748	1	6748
<b>Totales</b>	<b>36306</b>	<b>-</b>	<b>20392</b>

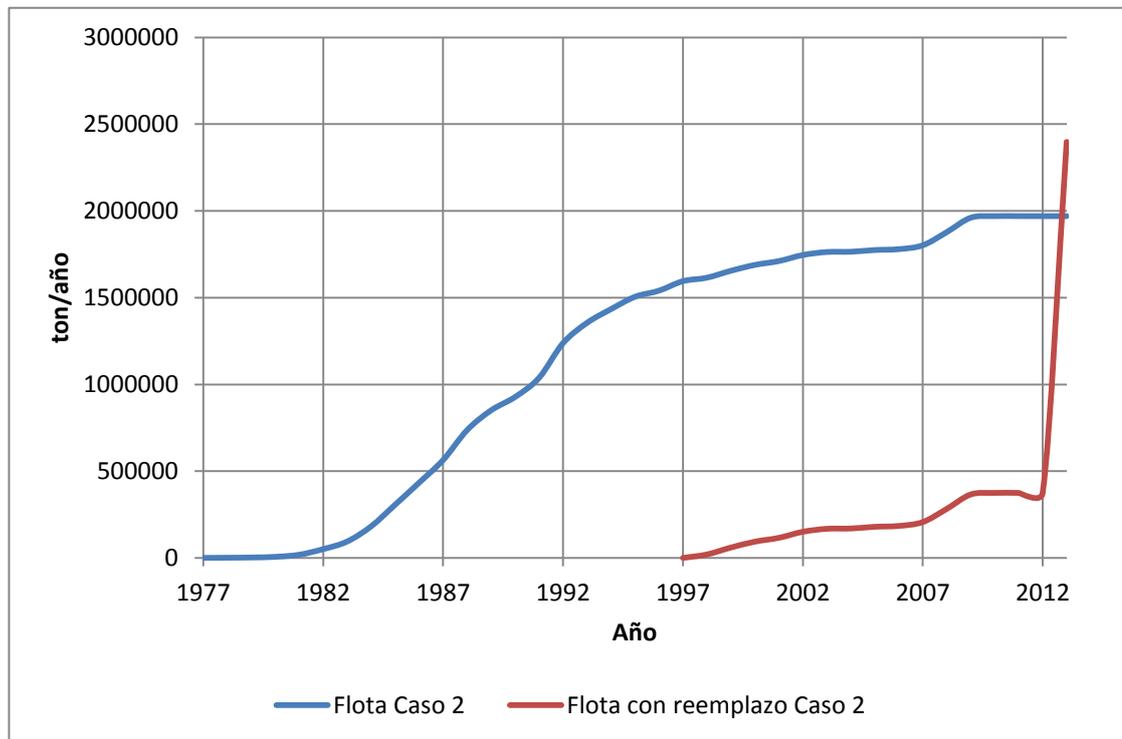
Elaboración Propia

Como se muestra en la tabla anterior, la flota con más de 15 años de fabricación consta de 36306 vehículos entre microbuses, minibuses y buses, esto representa el 89.64% de la flota total actual. Aplicando los factores de reemplazo en unidades se reduciría de 36306 a 20392 es decir la reducción de la flota total de número de vehículos sería de 39.29%.

Estos nuevos 20392 buses Euro III que ingresarían en reemplazo del antiguo parque automotriz se le aplicó un factor de emisión correspondiente a un bus

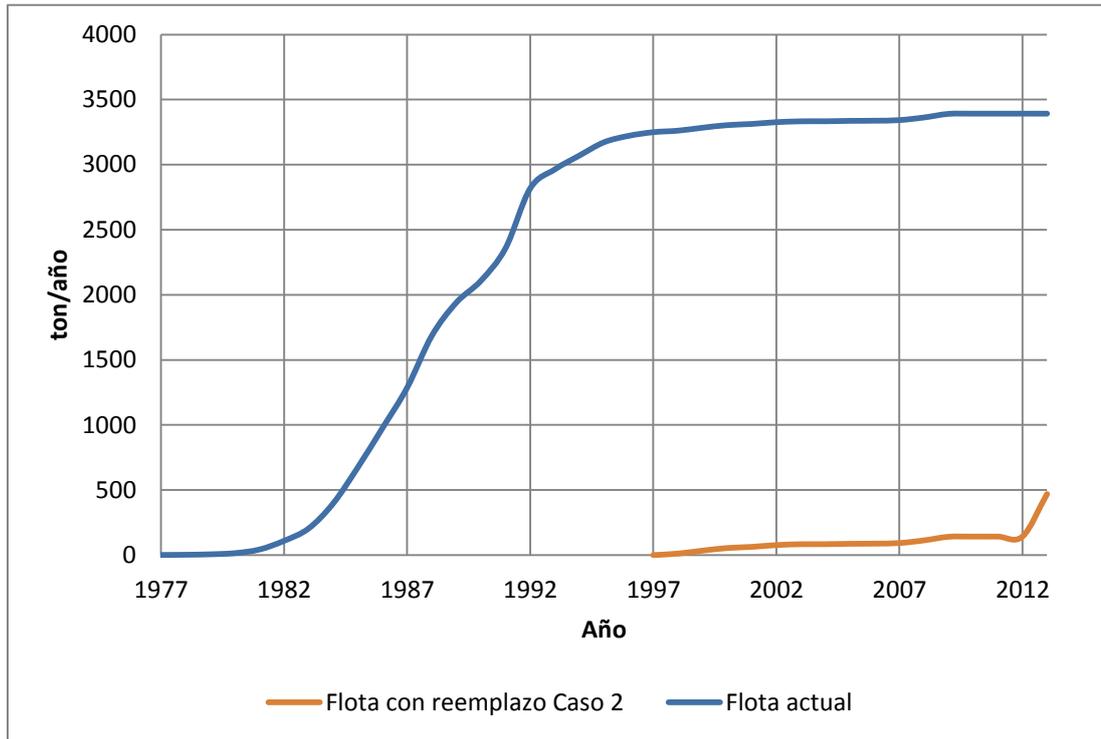
tipo Euro III, además de agregarle los factores de corrección por combustible y de biodiesel, mas no de los factores de deterioro ya que ingresarían este año y no habrían sufrido aun algún tipo de deterioro tecnológico. Sé generaron las siguientes curvas:

Figura 4.17: Comparativo de acumulado de emisiones de CO<sub>2</sub> para Caso 2



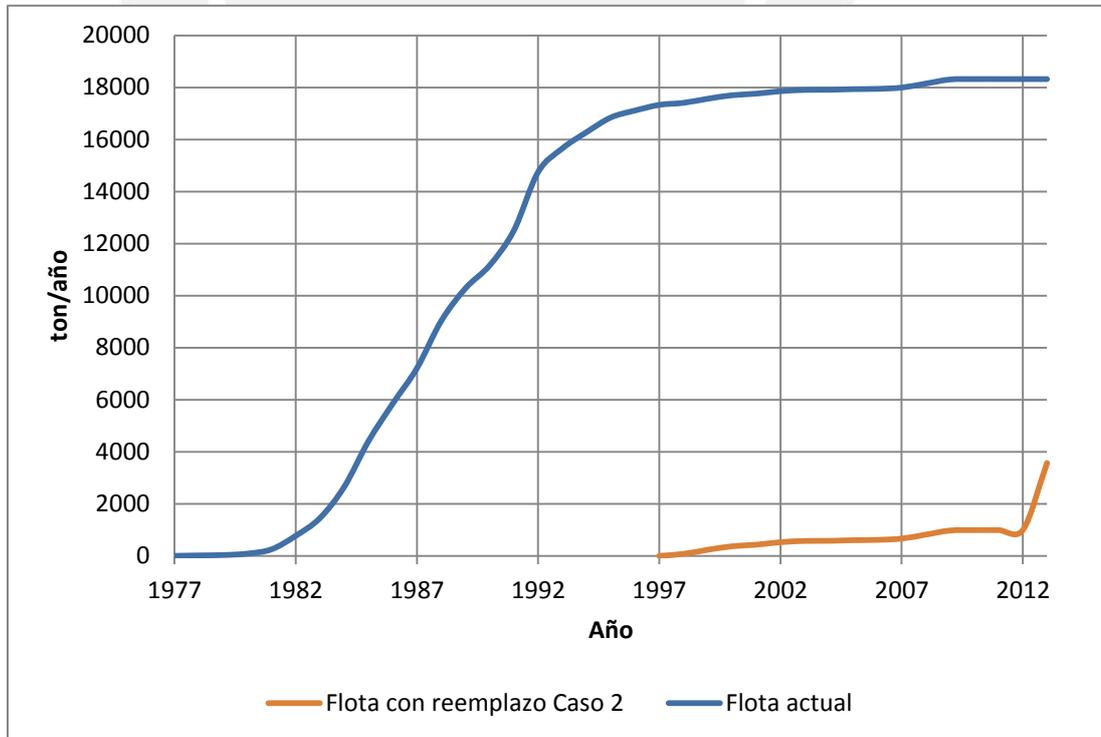
Elaboración Propia

Figura 4.18: Comparativo de acumulado de emisiones de PM<sub>10</sub> para Caso 2



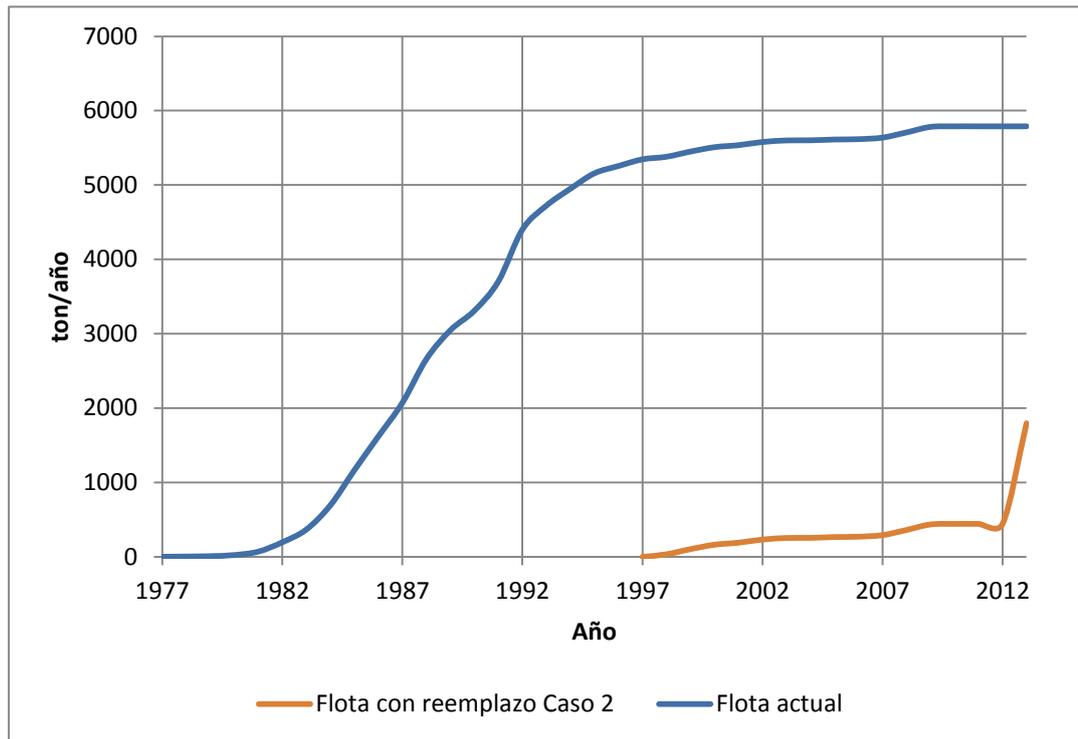
Elaboración Propia

Figura 4.19: Comparativo de acumulado de emisiones de CO para Caso 2



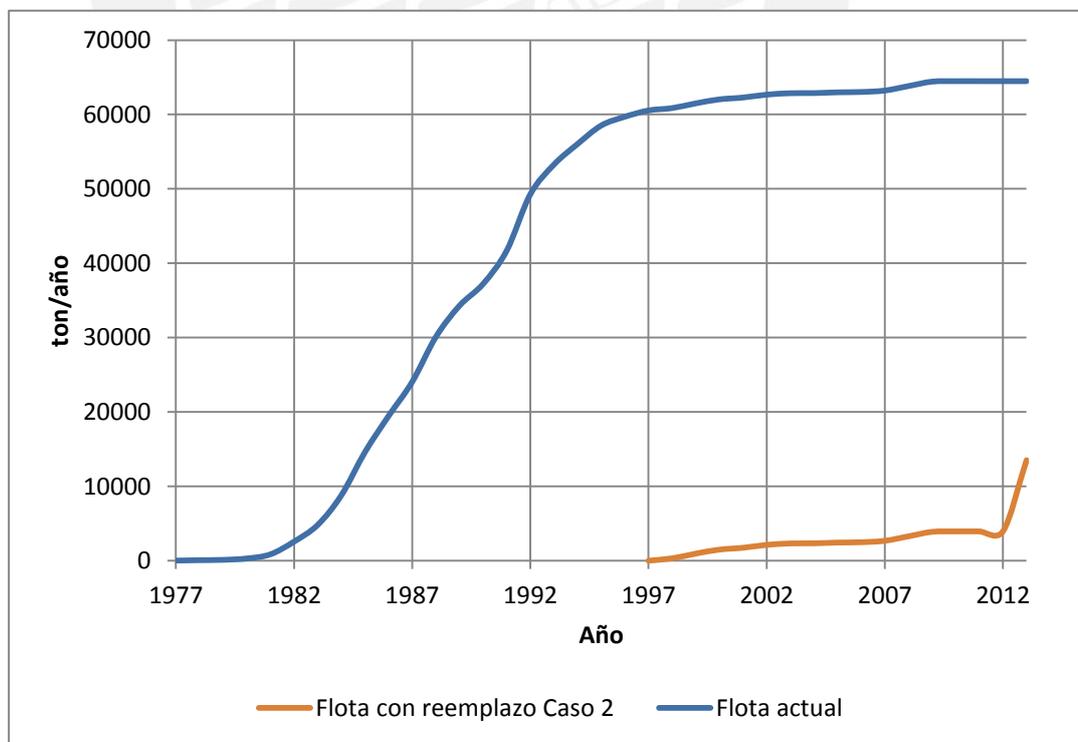
Elaboración Propia

Figura 4.20: Comparativo de acumulado de emisiones de HCT para Caso 2



Elaboración Propia

Figura 4.21: Comparativo de acumulado de emisiones de NO<sub>x</sub> para Caso 2



Elaboración Propia

En estas gráficas se puede observar que al final de cada una de ellas se aprecia un ligero aumento en los cuatro tipos de emisiones brusco pero no significativo. Entonces si se lograra este reemplazo de unidades con las equivalencias ya planteadas, se lograría reducir emisiones en el orden de 86.16%, 80.51%, 68.97% y 79.04% para las emisiones de PM<sub>10</sub>, CO, HCT y NO<sub>x</sub> respectivamente. Son reducciones grandes manteniendo la capacidad actual de la flota. Sin embargo para el caso de CO<sub>2</sub>, se ve un aumento del 21.73% de emisiones. Esto se explica ya que el consumo de combustible va a aumentar, aumenta la eficiencia en la combustión, y el aumento de la potencia.

Aunque empíricamente debiese pensarse que las emisiones de CO<sub>2</sub> en este tipo de buses debieran ser menores, hay que considerar que son buses con una mayor cilindrada que todos los de la categoría “microbús” reemplazados, y que poseen una mejor combustión del combustible dentro del motor, es decir una combustión más eficiente, lo que conlleva la disminución en la aparición de otros contaminantes en desmedro de las emisiones de CO<sub>2</sub>. Además que debido a los sistemas de control de emisiones los cuales utilizan parte del combustible en forma líquida o en forma de energía el consumo también aumenta.

#### 4.3 Caso 3: Retiro de exceso de flota y reemplazo por Buses Euro III de los vehículos restantes con más de 15 años de antigüedad

En este caso, se plantea retirar la flota en exceso según el mismo criterio que para el caso 1,

1. Antigüedad
2. Microbuses
3. Minibuses
4. Buses

De la flota restante se reemplazarán todos aquellos vehículos que tenga más de 15 años de antigüedad. El resumen de reemplazo se puede apreciar en la siguiente tabla.

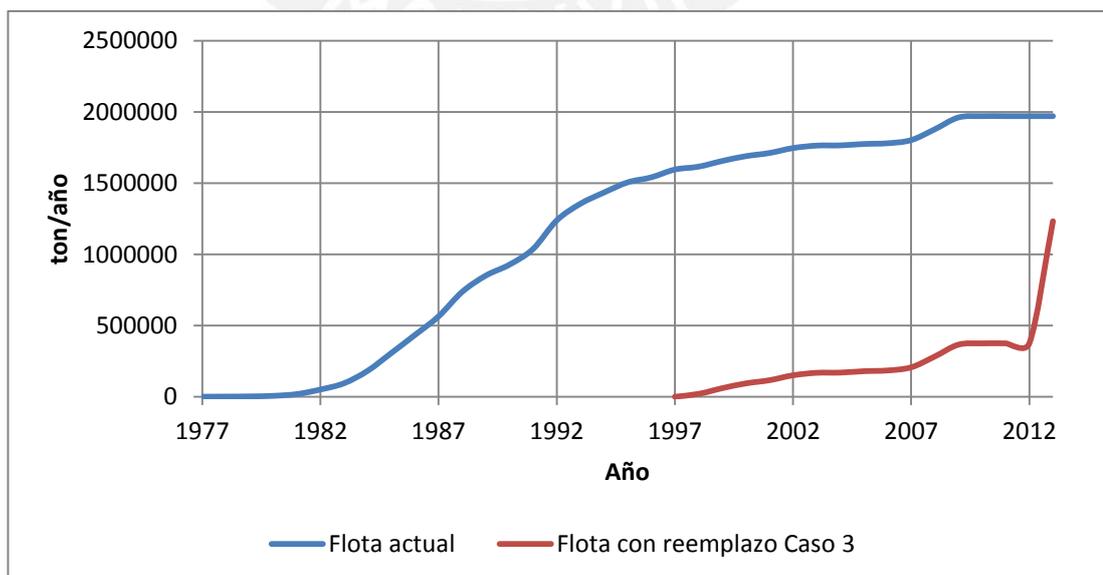
Tabla4.4: Equivalencias entre bus Patrón y flota vehicular actual con más de 15 años de edad y exceso de flota.

		Unidades	Equivalencia	Unidades equivalentes
Vehículos con edad de 15 o menor		4772	-	-
Vehículos retirados por exceso		18500	-	-
Vehículos reemplazados	Buses	2589	1	2589
	Microbuses	3545	3	1182
	Minibuses	11095	2	5546
<b>Total</b>		<b>40500</b>	-	<b>9317</b>

Elaboración Propia

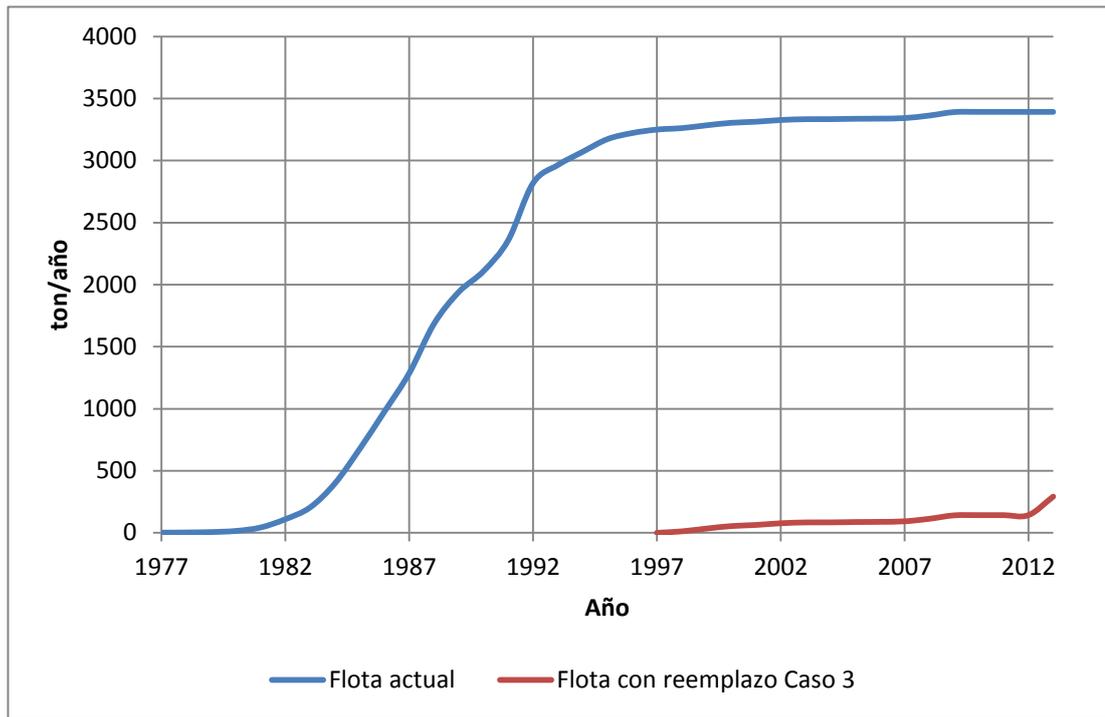
Los resultados se muestran a continuación.

Figura 4.22: Comparativo de acumulado de emisiones de CO<sub>2</sub> para Caso 3



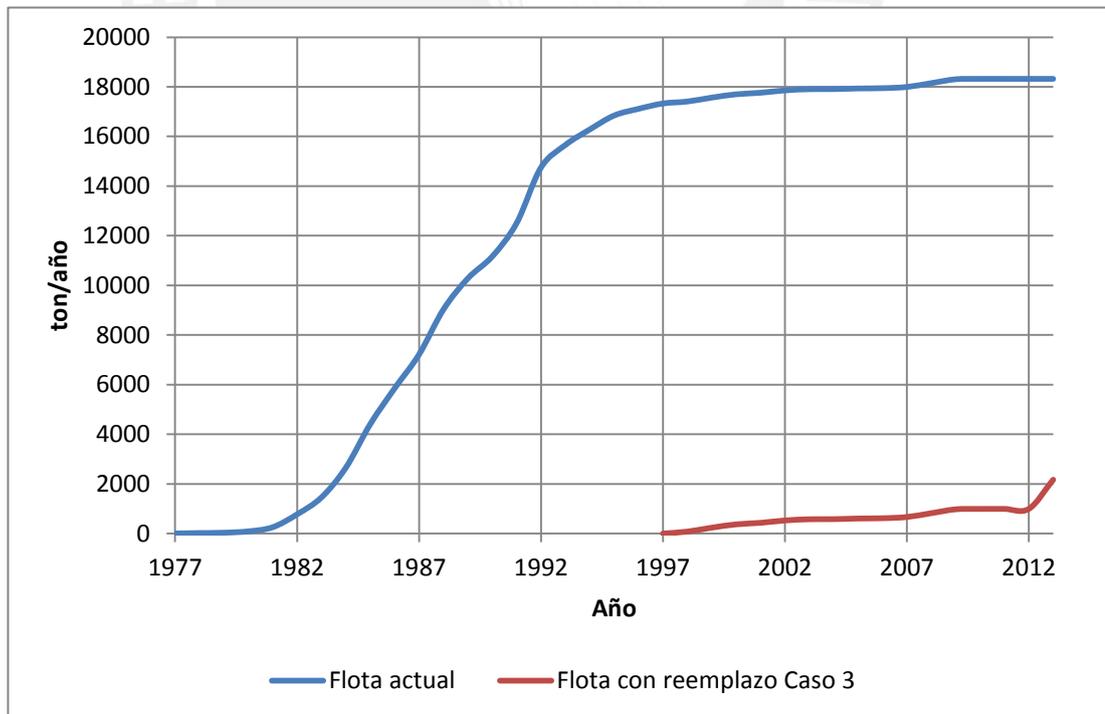
Elaboración Propia

Figura 4.23: Comparativo de acumulado de emisiones de PM<sub>10</sub> para Caso 3



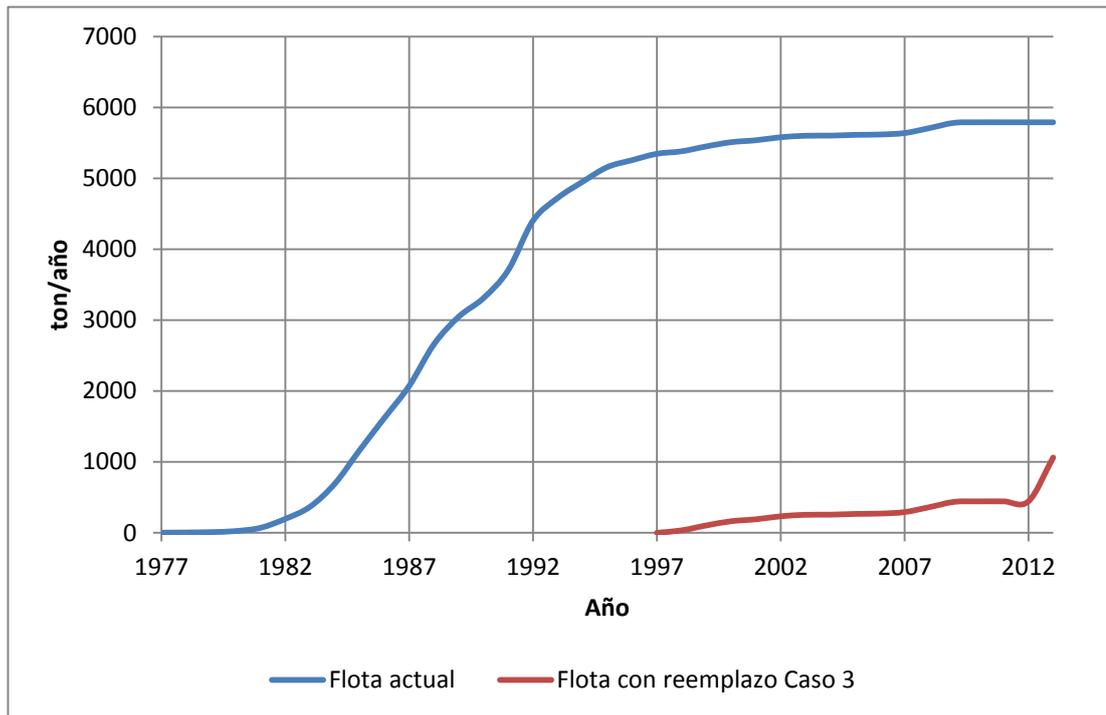
Elaboración Propia

Figura 4.24: Comparativo de acumulado de emisiones de CO para Caso 2



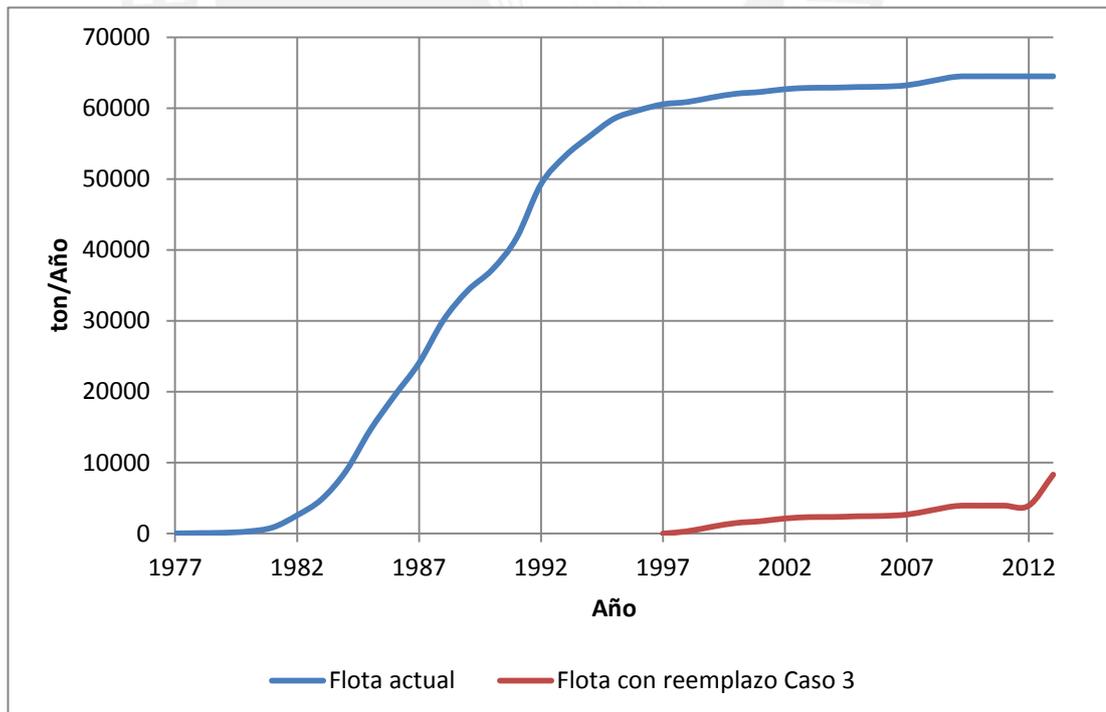
Elaboración Propia

Figura 4.25: Comparativo de acumulado de emisiones de HCT para Caso 2



Elaboración Propia

Figura 4.26: Comparativo de acumulado de emisiones de NO<sub>x</sub> para Caso 2



Elaboración Propia

En este tercer caso las reducciones serían del orden del 37.44%, 91.06%, 88.15%, 80.83% y 87.11% para las emisiones de CO<sub>2</sub>, PM<sub>10</sub>, CO, HCT y NO<sub>x</sub> respectivamente. Este Caso arroja el mayor número de reducciones para un reemplazo de vehículos dando la magnitud del nivel elevado de emisiones contaminantes que un parque vehicular antiguo genera y a que magnitud se podría llegar de ejecutarse alguna normatividad de renovación en la ciudad.



## Referencias bibliográficas

- [ref. 4.1] INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA, 2013, Noticias, [en línea], Disponible en: <http://www.protransporte.gob.pe/index.php/centro-de-noticias/18-noticias/2013/511-municipalidad-de-lima-reitera-que-el-19-de-setiembre-es-la-fecha-de-entrega-de-los-sobres-de-precalificacion-de-los-cinco-corredores-complementarios>
- [ref. 4.2] Ibídem.



## Conclusiones

1. La edad promedió del parque de vehículos con motores diesel de transporte público de la ciudad de Lima y Callao es de 22.26 años. Además el 68% de vehículos ingresó a prestar servicio de transporte público con más de 10 años de antigüedad debido a la ley N° 25789.
2. Los resultados obtenidos en niveles de emisiones muestran un gran deterioro del parque automotriz de la ciudad debido a tecnologías obsoletas, 72.2% de vehículos sin norma de emisión, vehículos con sistemas deteriorados por el tiempo y su recorrido. Los sistemas de control de emisiones aplicados a vehículos modernos fabricados bajo normas de emisiones más severas tienen un impacto importante en los niveles de emisiones generados. En el caso que se reemplace todas las unidades de más de 15 años por buses Euro III, es decir manteniendo la misma capacidad de transporte, las emisiones disminuyen hasta un 86%.
3. La ciudad de Lima requiere un cambio drástico en su flota de transporte público de buses con motor diesel para mejorar la calidad del aire en la ciudad ya que en los tres casos planteados las reducciones son del 40% a más dependiendo del contaminante considerado.
4. El efecto del combustible disponible genera un 7.7% de elevación de las emisiones de CO y NO<sub>x</sub>. Esto implica que la calidad del combustible diesel tiene repercusión en la generación de emisiones dentro del motor del vehículo
5. Las tecnologías aplicadas a buses modernos fabricados bajo normas de emisión más estrictas reducen emisiones tóxicas pero por otro lado aumentan el consumo de combustible produciendo más dióxido de carbono. En el caso 2 el aumento de CO<sub>2</sub> es de 21.73% a pesar que la flota se reemplazan buses de más de 15 años de edad.

## Recomendaciones

A continuación se plantean las siguientes observaciones y recomendaciones a ser tomadas en cuenta en estudios similares de estimación de emisiones  $\text{CO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{CO}$ , HCT,  $\text{NO}_x$  o interpretación de los resultados de este trabajo en los escenarios planteado para la ciudad de Lima y Callao.

Alcances del trabajo:

Este trabajo se basa en obtener una herramienta técnica para conocer la variación en los niveles de emisiones para casos hipotéticos de renovación o reemplazo de la flota de transporte público con motor diesel en la ciudad de Lima y Callao por lo que las recomendaciones son:

- Utilizar el presente trabajo como una herramienta técnica para la toma de decisiones técnicas y evaluaciones para planteamientos de la MML en el proyecto de la reforma del transporte.
- No se recomienda utilizar este estudio para la estimación de factores de emisión de buses que utilizan como combustible “GNV” o “GLP”.
- Este estudio puede ser útil como fuente bibliográfica para futuras investigaciones que se pretendan realizar acerca de la cantidad de emisiones de  $\text{CO}_2$ ,  $\text{PM}_{10}$ ,  $\text{CO}$ , HCT,  $\text{NO}_x$  en alguna ciudad o país.

Desarrollo del trabajo:

- Los FE y FC en este trabajo han sido obtenidos de la bibliografía existente hasta la fecha, sin embargo estudios acerca de emisiones en países como Chile, España o en la UE se realizan constantemente lo que se deberá tomar en cuenta futuras actualizaciones en los factores de emisión así como también en los de deterioro.
- Se debe tomar en consideración que los factores de emisión son sensibles a la velocidad promedio por lo que siempre se debe verificar este dato para futuras consultas que se hagan sobre este trabajo.

- Se asumió en este trabajo que cada vehículo pertenece a una norma euro si su año de fabricación es un año después de la fecha de promulgación de dicha norma. Dentro de todos los escenarios posibles esto nos da el escenario menos crítico en cuanto a la generación de emisiones por avance tecnológico.
- Los tres casos planteados han sido trabajados de manera estática, es decir que al generar las reducciones o reemplazos de flota fueron abruptamente sin embargo existen cronogramas de reposición de flota para la ciudad de Lima y Callao así como también un proyecto en el tiempo de reducción del exceso de flota. Estas características generan que los cambios en la flota vehicular sean dinámicos.



## Bibliografía

- MAGDI K. Khair, HANNU Jääskeläinen, Revision 2008.11b, *Emission Formation in Diesel Engines*, 2008.
- ROJANO Roberto E., ANGULO Luis C., RESTREPO Gloria, *Niveles de Partículas Suspendidas Totales (PST), PM10 y PM2.5 y su Relación en Lugares Públicos de la Ciudad Riohacha, Caribe Colombiano*, Vol. 24, 2013.
- ACEVEDO HERRERA, Cristian Ignacio, *Determinación experimental de factores de emisión en vehículos pesados de transporte público*, Memoria para optar al título de ingeniero civil mecánico, Santiago de Chile : Universidad de Chile, Facultad de Ciencias físicas y matemáticas departamento de ingeniería mecánica, Enero 2007.
- MANUFACTURERS OF EMISSION CONTROLS ASSOCIATION, *Emission Control Technologies for Diesel-Powered Vehicles*, 2007.
- RINCÓN J., ASECIO I., CAMARILLO R., MARTÍN A., *Tratamiento de Residuos: reciclado de catalizadores de automóviles*, España, Universidad de Castilla-La Mancha, 2008.
- MARTÍN Karl Castillo, BARBERÁN Freddy Cevallos, *Análisis y desgaste en motores de combustión interna a diesel*, 1998.
- EUROPEAN UNION, *Commission Directive 2005/78/EC*, 2005.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, *Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors, 2011*, [en línea]. Disponible en: <http://www.epa.gov/ttnchie1/ap42/>
- FRANCO Vicente, KOUSOULIDOU Marina, MUNTEAN Marilena, NTZIACHRISTOS Leonidas, HAUSBERGER Stefan, DILARA Panagiota, *Road vehicle emission factors development: A review*, 2013.
- INDECOPI. NTP 321.125:2008, *BIOCOMBUSTIBLES Biodiesel: Especificaciones*, 2008.
- INDECOPI. NTP 321.1003:2005, *PETROLEOS Y DERIVADOS. Diesel. Especificaciones*, 2005.

- MINISTERIO DE ENERGÍA Y MINAS DEL PERÚ, Decreto Supremo 092-2009-EM. 31 de diciembre 2009.
- LAPUERTA Pedro, ARMAS Octavio, RODRIGUEZ-FERNANDEZ Jose. Effect of Biodiesel fuels on diesel engine emissions, 2007.
- AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE JAPÓN (JICA), CONSEJO DE TRANSPORTE DE LIMA Y CALLAO, MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DE LA REPÚBLICA DEL PERÚ, *Plan maestro de transporte urbano para el área metropolitana de Lima y Callao en la República del Perú*, Volumen – I, 2005.
- GERENCIA DE TRANSPORTE URBANO GTU, Proyectos: Marco General [en línea], Disponible en: <http://www.gtu.munlima.gob.pe/proyectos/operativosmoviles.htm>.
- KREJCIE ROBERT V., MORGAN DARYLE W., *Determining simple size for research activities*, 1970.
- MUNICIPALIDAD METROPOLITANA DE LIMA, *Proyecto de ordenanza que aprueba cronograma para la convocatoria de licitación de rutas, limita incremento de flota, dispone especificaciones técnicas de vehículo padrón y regula otros aspectos en materia de transporte público de pasajeros en Lima metropolitana*, 2011.
- CONCEJO METROPOLITANO DE LIMA, *Ordenanza N°1599 que regula la prestación del servicio de transporte público regular de personas en Lima Metropolitana*, 2012.
- CONGRESO DE LA REPUBLICA DEL PERU, *Derogación de todas las disposiciones que prohíben o restringen la importación de bienes usados Decreto de Ley N° 25789*, 1992.
- COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE DE CHILE, *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*, 2009.
- SISTEMAS SUSTENTABLES LTDA., *Determinación de factores de emisión para el parque vehicular asociados al uso de biocombustibles*.
- AGENCIA DE COOPERACIÓN INTERNACIONAL DE JAPÓN (JICA), MINISTERIO DE TRANSPORTES Y COMUNICACIONES DE LA

REPÚBLICA DEL PERÚ, *Encuesta de recolección de información básica del transporte urbano en el área metropolitana de Lima y Callao – Informe Final*, 2013.

- COMISIÓN NACIONAL DEL MEDIO AMBIENTE DE CHILE, *Guía metodológica para la estimación de emisiones atmosféricas de fuentes fijas y móviles en el registro de emisiones y transferencia de contaminantes*, 2009.
- INGENIERÍA DICTUC S.A., DIVISIÓN DE MEDIO AMBIENTE CHILE, *Evaluación de Nuevas Medidas de Control de Emisiones para el Sector Transporte en la Región Metropolitana – Informe Final*, 2007.
- SWISSCONTACT Julián E. Soriano, DURSBECK Frank, *Límites Máximos Permisibles para Vehículos Nuevos y Usados, Importados o Fabricados para Circular en el Perú*, 2001.
- INSTITUTO METROPOLITANO PROTRANSPORTE DE LIMA, 2013, Noticias, [en línea], Disponible en: <http://www.protransporte.gob.pe/index.php/centro-de-noticias/18-noticias/2013/511-municipalidad-de-lima-reitera-que-el-19-de-setiembre-es-la-fecha-de-entrega-de-los-sobres-de-precalificacion-de-los-cinco-corredores-complementarios>