ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA

ANÁLISIS DE LOS PARÁMETROS CONTROLADOS EN LA NORMA TÉCNICA ECUATORIANA INEN 2207:2002 APLICADA EN LA REVISIÓN TÉCNICA VEHICULAR PARA AUTOMOTORES DIÉSEL EN EL DISTRITO METROPOLITANO DE QUITO

PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE MAGÍSTER EN SISTEMAS AUTOMOTRICES

RICARDO ADRIÁN ROMÁN GÍA

ricardoroman1792@hotmail.com

DIRECTOR: Ing. WILSON MORAN FLORES, M.Sc.

wilson.moran@epn.edu.ec

Quito, Febrero 2020

CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por RICARDO ADRIÁN ROMÁN GÍA bajo mi supervisión.

Ing. Wilson Morán Flores. M.Sc.

DIRECTOR DE PROYECTO

DECLARACIÓN

Yo Ricardo Adrián Román Gía, declaro que el trabajo aquí descrito es de mi autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que he consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional, puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normatividad institucional vigente.

RICARDO ADRIÁN ROMÁN GÍA

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a las instituciones municipales y nacionales de las cuáles sea su competencia la salud de los ecuatorianos y el bienestar medioambiental. Tanto instituciones de control como aquellas que solventan los problemas que la contaminación produce pueden hacer uso de este trabajo en pos de articular su trabajo y mancomunadamente generar alternativas que mejoren la situación actual.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a todas las personas que han formado parte de mi vida en éstos últimos ocho años, desde aquellos amigos con los que empecé a transitar éste derrotero, y hoy no están. Hasta aquellas personas que he conocido recientemente y se han convertido en amigos valiosos.

A mi familia, que con su confianza, comprensión y paciencia han sabido convertirse en aquel refugio con el cual siempre he contado. Y han sido quienes me han recordado a cada paso, la importancia de mi formación y de mi éxito.

Un agradecimiento especial al ingeniero Wilson Morán, mi director, quien a lo largo de la tesis me ayudó y quien desde el comienzo de mi tesis me ayudó y confió en mi capacidad, algo que mantuvo hasta el final ayudándome ágil y oportunamente, a pesar de sus múltiples ocupaciones. Sin lugar a dudas, su aporte fue clave para concluir ésta etapa de mi vida. Le quedo muy agradecido.

A los profesores que se han constituido en un faro que me ha permitido vislumbrar el camino que deseo para mi vida. No sólo en el aspecto profesional, sino también en el ámbito moral y social. Sin lugar a dudas, he sido afortunado por conocer a profesionales de su nivel.

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICACIÓN I

DECLARACIÓN II

DEDICATORIA III

AGRADECIMIENTOS IV

ÍNDICE DE CONTENIDO V

ÍNDICE DE TABLAS VIII

ÍNDICE DE FIGURAS IX

RESUMEN XI

ABSTRACT XII

CAPÍTULO 1 INTRODUCCIÓN 1

FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA 2

1.1.1. Planteamiento del Problema 2

1.1.2. Justificación 3

1.1.2.1. Justificación Teórica 3

1.1.2.2. Justificación Metodológica 3

1.1.2.3. Justificación Práctica 4

1.1.3. Objetivos del proyecto 5

1.1.3.1. Objetivo general 5

1.1.3.2. Objetivos específicos 5

1.2. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO 6

1.2.1. Límites geográficos 6

1.2.2. Límites temporales 7

CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO 9

2.1. MARCO HISTÓRICO 9

2.1.1. Origen del Problema 9

2.1.2. Evolución del fenómeno de estudio 12

2.1.3. Situación actual del fenómeno 14

2.1.4. Características fundamentales del fenómeno 17

2.1.5. Otras investigaciones referentes al fenómeno 18
2.2. MARCO CONCEPTUAL 20
2.2.1. Motores de Combustión Interna (MCI) 20
2.2.1.1. Motores de Encendido por Compresión (MEC) 21
2.2.1.1.1. Inyección Directa 23
2.2.1.1.2. Inyección Indirecta 24
2.2.1.1.3. Comparación Inyección Directa e Indirecta 24
2.2.1.1.4. Combustión en los MEC 27
2.2.1.1.5. Emisiones en los MEC 31
2.2.1.1.6. Fuentes y Control de Emisiones en los MEC 33
CAPÍTULO 3 METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN 42
3.1. DESCRIPCIÓN DEL ESTUDIO 42
3.2. RECOLECCIÓN DE DATOS 42
3.2.1. Investigación Documental 42
3.2.1.1. Obtención de Datos históricos del CCICEV 42
3.2.1.1.1. Equipos Utilizados en las pruebas 43
3.2.1.1.1.1. Medidor de Material Particulado Fino $MP_{2.5}$ 43
3.2.1.1.1.2. Opacímetro 44
3.2.1.1.2. Ensayos para medición de emisiones 45
3.2.1.2. Datos de Investigaciones Previas 46
3.2.1.3. Legislación para emisiones contaminantes y entorno internacional 48
CAPÍTULO 4 ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS 49
4.1. RELACIÓN ENTRE LAS EMISIONES Y LAS CARACTERÍSTICAS DE LOS VEHÍCULOS .. 49
4.1.1. Potencia del vehículo 49
4.1.2. Años de uso del vehículo 50
4.1.3. Relación de compresión del vehículo 51
4.1.4. Kilometraje del vehículo 51
4.1.5. Cilindrada del vehículo 52
4.1.6. Distribución de vehículos por modelo 53
4.2. NIVEL DE CONFIANZA DE LA GENERALIZACIÓN DE LAS CONCLUSIONES 54
4.3. NORMATIVA LEGAL DE EMISIONES Y ENTORNO INTERNACIONAL 56

4.3.1. Evolución de la Normativa Legal Estadounidense 56
4.3.2. Evolución de la Normativa Legal Europea 57
4.3.3. Normativa Legal en el DMQ 60
4.3.4. Entorno Internacional 61
4.4. RELACIÓN ENTRE LA OPACIDAD Y PM 63
4.5. TECNOLOGÍAS DE REDUCCIÓN DE EMISIONES 63
CAPÍTULO 5 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES..... 65
5.1. CONCLUSIONES 65
5.2. RECOMENDACIONES 66
CAPÍTULO 6 BIBLIOGRAFÍA..... 67
GLOSARIO DE TÉRMINOS..... 72
ANEXOS .....**¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**
ANEXO 1: DATOS HISTÓRICOS DEL AÑO 2019 OBTENIDOS EN EL CCICEV ..... **¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.**

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Cronograma de Actividades del Proyecto de Investigación..... 7
Tabla 1.2 Cronograma de Actividades del Proyecto de Investigación (Continuación) 8
Tabla 1.3 Cronograma de Actividades del Proyecto de Investigación (Continuación) 8
Tabla 2.1 Valores de opacidad de los vehículos de prueba 19
Tabla 3.1 Especificaciones del equipo de medición de PM..... 43
Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del opacímetro utilizado en los ensayos. 44
Tabla 3.3 Especificaciones de distintos vehículos ensayados en la provincia de Imbabura. 46
Tabla 3.4 Especificaciones de distintos vehículos ensayados en la provincia de Imbabura. (Continuación)..... 47
Tabla 4.1 Relación entre el nivel de confianza y el Z-score 55
Tabla 4.2 Categorías de vehículos a diésel definidas en las normas Euro 57
Tabla 4.3 Categorías de vehículos a diésel definidas en las normas Euro (Continuación)..... 58
Tabla 4.4 Límites de emisiones para Automotores de las categorías M1, M2 y N1-I 58
Tabla 4.5 Límites de emisiones para automotores de la categoría N1-II 59
Tabla 4.6 Límites de emisiones para automotores de la categoría N1-III 59
Tabla 4.7 Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de diesel (prueba dinámica) a partir del año modelo 2000 (ciclos europeos)..... 60

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1.1 Gases de Escape de un articulado del Sistema de Transporte Urbano de Pasajeros 4
Fig. 1.2 Nube gris en las mañanas, en el DMQ..... 5
Fig. 1.3 Administraciones zonales del DMQ..... 7
Fig. 2.1 Vista del Centro de la ciudad de Quito. 9
Fig. 2.2 Imagen Satelital de la ciudad de Quito. 10
Fig. 2.3 Principales vías en sentido sur – norte en el DMQ..... 11
Fig. 2.4 Antiguo autobus de la ruta Colón – Camal (año 1985)..... 12
Fig. 2.5 Crecimiento del Parque automotor en Pichincha entre 2008 y 2020..... 13
Fig. 2.6 Crecimiento poblacional de la ciudad de Quito 2008 – 2020..... 13
Fig. 2.7 Número de vehículos por cada 1000 hab. 2008 – 2020. 14
Fig. 2.8 Nube negra sobre el DMQ en horas de la mañana. 15
Fig. 2.9 Smog saliendo de un bus urbano en el centro de la ciudad. 16
Fig. 2.10 Hollín en las paredes de una casa de la calle Necochea 17
Fig. 2.11 Clasificación Básica de los Motores de Combustión Interna. 20
Fig. 2.12 Bomba Lineal. 22
Fig. 2.13 Bomba Rotativa. 23
Fig. 2.14 Ilustración de la diferencia entre Inyección Directa e Indirecta..... 24
Fig. 2.15 Desempeño típico para un motor con inyección directa. 25
Fig. 2.16 Desempeño típico de un motor con inyección indirecta. 26
Fig. 2.17 Ilustración de la atomización del combustible. 28
Fig. 2.18 Chorro de combustible de un MEC. Se ilustra las zonas de mezcla aire-combustible alrededor del núcleo líquido. El núcleo líquido está rodeado de mezclas sucesivas de vapor que son (A) muy rica para combustionarse, (B) rica en combustible, (C) estequiométrica, (D) pobre en combustible, (E) muy pobre para quemarse. La auto-combustion empieza primordialmente en la zona B. El hollín se genera principalmente en la zona A y B. 30
Fig. 2.19 Emisiones para un MEP en función de la razón combustible – aire. 32

Fig. 2.20 Eficiencia del Catalizador en Función de la relación Combustible – Aire para un MEC. 33
Fig. 2.21 Relación entre Ruido, Humo, NOx y consume específico de combustible. A diferentes velocidades de inyección y con diferentes tiempos de inyección. 35
Fig. 2.22 Comparación, de emisiones de Hidrocarburos y NOx, de dos motores atmosféricos con inyección directa (DI) e indirecta (IDI), a diferentes cargas y con diferentes ángulos de adelanto en el tiempo de inyección. 38
Fig. 2.23 Tamaños relativos de material particulado 10 (PM 10)y 2.5 (PM 2.5) .. 40
Fig. 3.1 Ilustración del equipo..... 43
Fig. 3.2 Fotografía ilustrativa del equipo de medición de opacidad. 45
Fig. 4.1 Relación entre la Potencia y la opacidad del vehículo..... 49
Fig. 4.2 Relación entre los años de uso del vehículo y la opacidad. 50
Fig. 4.3 Relación entre los años de uso del vehículo y la opacidad. Datos CCICEV 50
Fig. 4.5 Relación entre la relación de compresión del vehículo y la opacidad 51
Fig. 4.6 Relación entre el kilometraje y la opacidad. 51
Fig. 4.7 Relación entre la cilindrada y la opacidad. 52
Fig. 4.8 Relación entre la cilindrada y la opacidad. Datos CCICEV. 52
Fig. 4.9 Distribución de vehículos por modelos 53
Fig. 4.10 Distribución de vehículos por modelos 54
Fig. 4.11 Reducción de NOx y PM anual en las normas Estadounidenses..... 56
Fig. 4.12 Reducción de NOx y PM en las normativas a lo largo de los años 57
Fig. 4.13 Evolución de las normas aplicadas en varios países y proyecciones hasta 2030 62
Fig. 4.14 Evolución de las normas de emisiones en Latinoamérica 63
Fig. 4.15 Tecnologías de control de emisiones implementadas por norma europea. 64

RESUMEN

La investigación presentada a continuación ha sido motivada por el perceptible incremento de afecciones respiratorias en los ciudadanos de Quito, la presencia de nubes oscuras a primeras horas de la mañana en el centro de la ciudad, y la contaminación manifiesta en sectores donde es frecuente la circulación de automotores con tecnología diésel.

Estos hechos condujeron al interés de analizar la norma actual vigente y determinar si los límites presentes en la misma son adecuados para garantizar la calidad del aire. Además, se tuvo en consideración las condiciones tecnológicas de los automotores y la calidad del combustible empleado que permitan o impidan la entrada en vigencia de normas ambientales menos laxas.

La cantidad de datos analizados en esta investigación proporcionaron un nivel de confianza adecuado para la generalización de las conclusiones obtenidas. Y una vez concluida la investigación se pudo determinar que existe un estancamiento en la evolución de la norma para emisiones vigente en la ciudad y que la correlación entre la contaminación existente en los gases de escape y la opacidad de esos gases no es estrecha. De igual forma se evidenció la existencia de un parque automotor apto para cumplir normas más estrictas, y una calidad de combustible suficiente para dicho efecto.

ABSTRACT

The following research has been motivated due to the evident increase in respiratory conditions in citizens from Quito, the presence of dark clouds early in the morning around the center of the city, and the noticeable pollution in streets where diesel engine vehicles circulation is frequent.

These events woke the interest in analyze current standard for emissions and determine if the limits defined are suitable to warrant good air quality. In addition, vehicles' technological conditions and fuel quality than allows or inhibit the establishment of stricter standards, have been taken into account.

The quantity of analyzed data in the current research provide a suitable level of confidence to generalize research conclusions. Once these research was concluded it was determined that there is a stagnation in the process of evolution for pollutant emissions standard valid in the city and that the correlation between pollution in exhaust gases and opacity of those gases is not close. Moreover, the existence of a vehicle population and a fuel quality adequate to comply to stricter standards was also evidenced.

Capítulo 1

INTRODUCCIÓN

El tema que se desarrollará en esta tesis de maestría es la definición de nuevos límites en los parámetros, para opacidad y material particulado, contemplados en la norma técnica ecuatoriana INEN 2207:2002. La razón de esta investigación es que se ha observado que en la ciudad los automotores a diésel, transporte de carga y pasajeros principalmente, emanan gases de escape cuyo color y opacidad pueden implicar un excesivo nivel de contaminación. Al comparar estas emisiones con las de vehículos diésel más pequeños, pero de similar antigüedad, queda en entredicho la efectividad y precisión técnica con la que se ha definido los límites de la norma.

El trabajo está pensado como una base para una eventual corrección de la norma vigente. Dicha corrección ha de sostenerse en estudios técnicos y datos fieles a la realidad. Es así que definir con claridad la variación que existe en la opacidad de los gases de escape, de los vehículos diésel, es un dato clave para posibles correcciones.

Para la obtención de datos se estudiará vehículos diésel de diferente tecnología, modelo y año. Los mismos que serán sometidos a pruebas de opacidad en laboratorios que cuenten con las facilidades necesarias para dicho efecto. La investigación será tanto documental como experimental, en pos de que las conclusiones finales se ajusten a la realidad.

Como principales limitantes se tiene la disponibilidad de vehículos diésel por el ajustado presupuesto, complica las posibilidades de acceder a más de una decena de muestras. Es en este sentido que la investigación documental será clave para sortear la complicación mencionada.

FUNDAMENTACIÓN DEL PROBLEMA

1.1.1. Planteamiento del Problema

Desde el año 2004, en la ciudad de Quito, se ha desarrollado la revisión técnica vehicular a los automotores que utilizan combustible fósil. Sin embargo, los parámetros técnicos para la aprobación de la revisión, para los automotores que utilizan diésel, es demasiado permisiva. La ordenanza municipal 213 indica que "para vehículos nuevos modelo 2019 en adelante, el límite de opacidad será del 30%, lo que reducirá las emisiones vehiculares. El límite anterior de opacidad era del 50%, exigiendo que los vehículos en circulación a diésel de transporte público y comercial sean Euro III. Además, se aprobó que Quito será la primera ciudad en el país en medir PM 2.5, en la revisión técnica vehicular obligatoria, que es una de las principales causas de afecciones respiratorias" [63]

La ordenanza aprobada en su momento (a inicios de 2018) resulta casi tan ineficaz como la anterior. Pues establece límites de opacidad menores (30 %) pero sólo para vehículos a diésel comprados a partir de ese año. En este sentido es mínima la mejora en el control de emisiones contaminantes en vista de que los automotores a diésel que circulan en la ciudad, en su mayoría, son de años anteriores al 2018. Y teniendo en cuenta que los niños que habitan en zonas de alto flujo vehicular como el Centro Histórico presentan valores de Carboxihemoglobina en niveles superiores a los recomendados como normales, mismos que presentan incidencias mayores de infecciones respiratorias altas que los niños con valores bajos. [1]

En segundo lugar, es un paso importante la medición de PM (material particulado) por parte de la AMT. Sin embargo, si no se incluyen controles para estos contaminantes, se pone en riesgo la salud de la población como se demostró en 2018 que la reducción en los valores promedio anuales de las concentraciones de PM2.5 se ven asociados con mejora en la salud global de las personas, y mejora en marcadores estadísticos de salud pública. [1]

En la actualidad la norma INEN 2207:2002, en vigencia, no diferencia el tipo de material particulado. Establece límites para PM en general, sin embargo, es el PM 2.5 mucho más dañino que el PM 10, y es necesario que se estipulen valores máximos. Así mismo la opacidad, cuyo valor máximo está establecido en 50% y 60%. Estos valores no implican ningún control pues automotores con más de 5 años de uso no sobrepasan una opacidad del 15% (5) e incluso un vehículo diésel con 150 000 km de recorrido (alrededor de 10 años de uso) y con una cilindrada de 3000 cc, no supera el valor de 50% de opacidad. [64]

Es así que desconocer el comportamiento de la opacidad con el transcurso del tiempo es un problema, pues los valores definidos en la norma no garantizan ser los adecuados o responder a las necesidades medioambientales del distrito metropolitano.

1.1.2. Justificación

1.1.2.1. Justificación Teórica

Los aspectos teóricos que se tendrán en cuenta para este estudio son:

- Los niveles de contaminación nocivos para humanos (y otros animales).
- Las sustancias tóxicas para la salud que emana un motor a Diésel.
- El número de automotores que utilizan éste combustible en la ciudad.
- El volumen de sustancias tóxicas generado por los automotores.

Es posible por lo tanto determinar métodos teóricos como el nivel de PM 2.5 permitido en normas internacionales que den el parámetro adecuado a aplicar en la revisión vehicular de la ciudad.

1.1.2.2. Justificación Metodológica

Los pasos a seguir, para desarrollar una nueva normativa de examinación para los automotores a diésel, son los siguientes:

- Definir los niveles para los cuáles los gases de escape son dañinos para la salud de las personas.
- Establecer los parámetros que normativas internacionales comparables indican para estos contaminantes.
- Definir los límites técnicos tales como calidad del combustible, tecnología de los motores en la ciudad, uso de aditivos por parte de los propietarios, tecnología de tratamiento de emisiones incluida en los vehículos.
- Plantear los nuevos parámetros que las condiciones tecnológicas nacionales pueden alcanzar en las revisiones vehiculares en la ciudad.
- Estipular los nuevos límites a respetar en la normativa.

1.1.2.3. Justificación Práctica

En la ciudad, actualmente es posible ver en funcionamiento automotores cuyas emisiones son notablemente tóxicas. No obstante, los vehículos siguen en funcionamiento. El grave riesgo para la salud que esto implica se evidencia en la cantidad de enfermedades respiratorias que los ciudadanos de la ciudad han venido desarrollando en años cercanos.

Fig. 1.1 Gases de Escape de un articulado del Sistema de Transporte Urbano de Pasajeros

Fuente: Diario “El Comercio” (2016) [12]
Elaboración: Diario “El Comercio” (2016)

La contaminación por estos gases es perceptible a tempranas horas de la mañana. Pues sobre la ciudad reposa una espesa nube negra. Esta situación afecta

drásticamente a aves y otros animales de pequeño tamaño. Lo que explica la reducción considerable de la fauna en la ciudad.

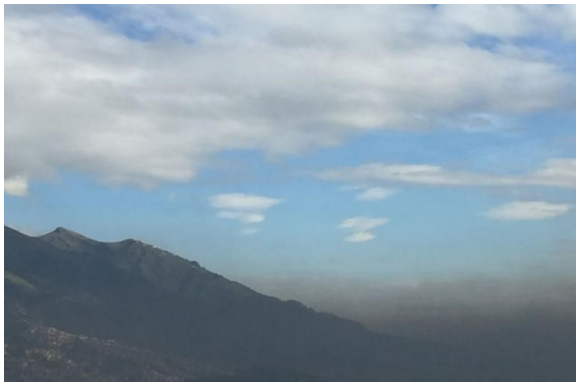

Fig. 1.2 Nube gris en las mañanas, en el DMQ

Fuente: Diario El Comercio (2016) [11]
Elaboración: Diario El Comercio (2016)

Es por esto que este trabajo contribuirá a la disminución de la contaminación en la ciudad, que está muy relacionada con enfermedades oculares, respiratorias y alérgicas. Además de disminuir la extinción de la fauna citadina.

1.1.3. Objetivos del proyecto

1.1.3.1. Objetivo general

Analizar los parámetros controlados en la norma INEN 2207:2002 para la aprobación de la revisión técnica vehicular para automotores a diésel que circulen en la ciudad de Quito.

1.1.3.2. Objetivos específicos

- Establecer la relación entre la opacidad de un motor diésel y sus años de uso.
- Establecer la relación entre la opacidad de un motor diésel y la tecnología del motor.
- Determinar si el nivel de opacidad con el que actualmente se aprueba un vehículo a diésel es el adecuado.

- Definir nuevos límites de opacidad para la aprobación de la revisión técnica vehicular.
- Establecer límites para la emanación de material particulado 2.5 (PM 2.5), para motores a diésel que circulen en el DMQ.

1.2. DELIMITACIÓN DEL PROYECTO

1.2.1. Límites geográficos

El estudio está enfocado en el distrito metropolitano de Quito. Pues es la ciudad en el Ecuador con índices más altos de contaminación. Dicha contaminación tiene tres factores fundamentales [1], a saber:

La altura de la ciudad. Los 2850 msnm a los que se sitúa el DMQ condicionan el correcto funcionamiento de los motores de combustión interna; presentes en vehículos, generadores eléctricos, entre otros útiles industriales; reduciendo la calidad de combustión y, en consecuencia, aumentando los niveles de contaminantes de sus emisiones de escape.

La geografía. La ciudad de Quito se encuentra rodeada de montañas, este hecho convierte a la ciudad en una suerte de olla terrestre en la cual el aire no circula con facilidad. Las partículas emanadas por los vehículos son más pesadas que el aire, por lo tanto, este efecto las mantiene encapsuladas dentro de la ciudad. Este efecto es apreciable en las mañanas, entre las 7:00 am y las 10:00 am, cuando una nube negra se manifiesta en el centro de la ciudad.

El crecimiento del parque automotor. Desde hace varios años Quito se ha ido constituyendo en la ciudad con el parque automotor más grande del país, llegando, en la actualidad, a 540 827 vehículos matriculados en Pichincha. (INEC, 2019). Esta enorme cantidad de vehículos implica un alto grado de contaminación ambiental.

Fig. 1.3 Administraciones zonales del DMQ.
Fuente: Sitio Web DMQ [2]
Elaboración: Sitio Web DMQ

1.2.2. Límites temporales

El proyecto se desarrolló entre agosto de 2019 y febrero de 2020. En la siguiente tabla se indica el cronograma que guio el proyecto.

Tabla 1.1 Cronograma de Actividades del Proyecto de Investigación

ACTIVIDADES	**2019**											
	Julio				**Agosto**				**Septiembre**			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Definir temas y subtemas del trabajo												
Diseñar la herramienta para recolección de información de las pruebas												
Conseguir vehículos a diésel para la etapa de pruebas												
Obtener la documentación necesaria (normas europea, americanas y locales)												
Conseguir datos de investigaciones anteriores												
Identificar vacíos técnicos en la norma actual												

Fuente: Ricardo Román [3]
Elaboración: Ricardo Román

Tabla 1.2 Cronograma de Actividades del Proyecto de Investigación (Continuación)

ACTIVIDADES	**2019**											
	Octubre				**Noviembre**				**Diciembre**			
	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4
Conseguir datos de investigaciones anteriores												
Identificar vacíos técnicos en la norma actual												
Comparación de la normativa actual y las normativas europeas y estadounidenses												
Establecer los niveles nocivos para la salud humana y medioambiental de las emisiones de los motores a diésel												

Fuente: Ricardo Román [3]
Elaboración: Ricardo Román

Tabla 1.3 Cronograma de Actividades del Proyecto de Investigación (Continuación)

ACTIVIDADES	**2020**							
	Enero				**Julio**			
	1	2	3	4	1	2	3	4
Definir la relación entre opacidad y kilometraje								
Establecer los puntos a corregir en la normativa								
Redactar la propuesta final para nuevos límites en la normativa para la ciudad								

Fuente: Ricardo Román [3]
Elaboración: Ricardo Román

Capítulo 2

MARCO TEÓRICO

2.1. MARCO HISTÓRICO

2.1.1. Origen del Problema

El Distrito Metropolitano de Quito se establece como tal en el 2008 como parte de las reformas implementadas por la Constitución aprobada en dicho año. Si bien el proceso aún no está concluso por la ausencia del estatuto de autonomía y su consecuente aprobación a través de consulta popular [4], el DMQ es considerado establecido por la población en su generalidad.

Históricamente el, hoy, DMQ tuvo como núcleo principal la ciudad de Quito. Fundada en torno al año 1030 a.C. aunque se utiliza la fecha de conquista española, 6 de diciembre de 1534, como su nacimiento y fundación. En la figura 2.1 se aprecia el centro de la ciudad a las faldas del volcán Guagua Pichincha.

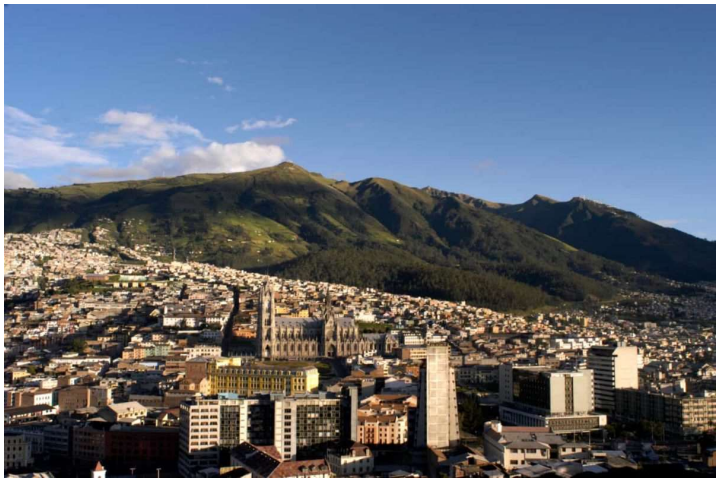

Fig. 2.1 Vista del Centro de la ciudad de Quito.
Fuente: casagangotena.com [5]
Elaboración: casagangotena.com

La ubicación de la ciudad condiciona su desarrollo urbano. Las elevaciones que la rodean impiden su expansión hacia el este y oeste. Condicionando a la ciudad a desarrollarse en forma longitudinal principalmente. Este fenómeno de desarrollo longitudinal, a su vez, tiene un efecto determinante en la duración de los desplazamientos dentro de la ciudad. Como ejemplo barrios como Guamaní o Calderón, ubicados en los extremos sur y norte de la ciudad, de poder ubicarse en los costados de la ciudad se encontrarían a una distancia de no más de 20 km. Lo que significaría una reducción, en la duración de sus desplazamientos, del 50% o más. La figura 2.2 ilustra la situación descrita en las líneas previas.

Fig. 2.2 Imagen Satelital de la ciudad de Quito.

Fuente: maps.google.com (2020) [6]
Elaboración: Ricardo Román

La esbeltez de la ciudad ha tenido como efecto una limitada cantidad de vías en sentido sur – norte. Las vías principales que permiten completar el periplo en el

sentido mencionado son la Av. Mariscal Sucre, Av. América, Av. 10 de agosto, Av. 6 de diciembre y Av. Simón Bolívar. Ésta limitada cantidad de alternativas propicia la formación de “cuellos de botella” cotidianamente. [69]

Dichos “cuellos de botella”, aunados a la longitud de la ciudad, provocan que la duración de un trayecto, de extremo a extremo de la ciudad, llegue a tomar 4 horas aproximadamente.

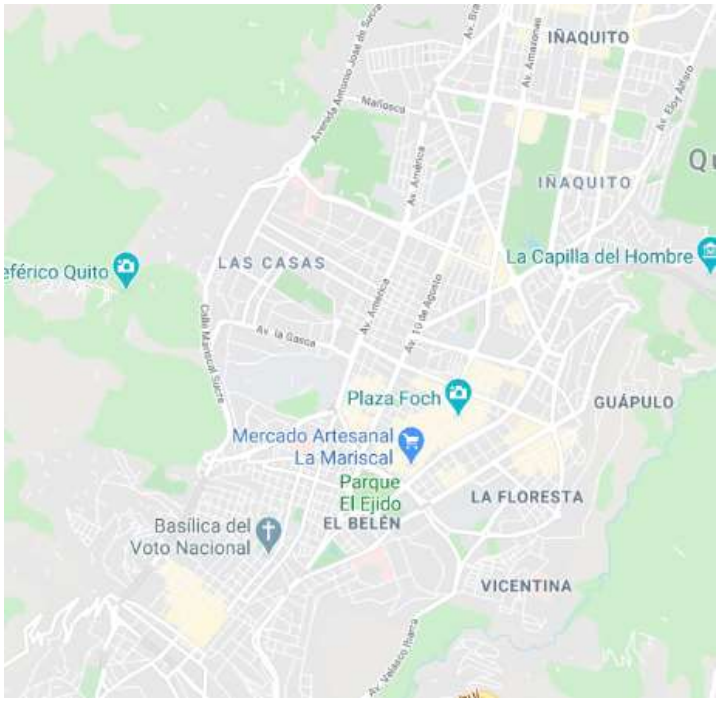

Fig. 2.3 Principales vías en sentido sur – norte en el DMQ.

Fuente: maps.google.com [6]
Elaboración: Ricardo Román

Además de la geografía complicada de la ciudad, el sistema de transporte urbano ha tenido históricamente una mala calidad. Se tiene registros, desde hace más de 50 años, de paralizaciones y movilizaciones exigiendo mejoras en la calidad del servicio urbano. Las quejas de los usuarios se han centrado en la insuficiente capacidad de las unidades, el maltrato de los conductores a pasajeros y la mala conducción. La figura 2.4 ilustra las unidades empleadas en la ciudad en la década de los 80.

Fig. 2.4 Antiguo autobus de la ruta Colón – Camal (año 1985)

Fuente: https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Autobuses_de_Quito [7]
Elaboración: Wikimedia, 2016

Asimismo, las rutas del transporte urbano no abastecen adecuadamente a todos los barrios de la ciudad. Debido a que las rutas están concentradas en la zona central de la ciudad, dejando a las poblaciones periféricas desatendidas.

2.1.2. Evolución del fenómeno de estudio

La suma de los factores mencionados previamente ha llevado al aumento desmesurado de la cantidad de vehículos en la ciudad. Como se indica en la figura 2.5 desde el año 2008 el número de vehículos ha venido creciendo. Por su parte la figura 2.6 ilustra el crecimiento poblacional de la provincia. [9]

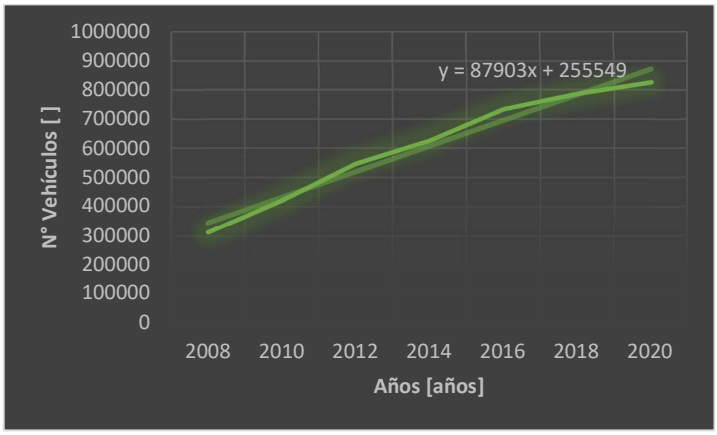

Fig. 2.5 Crecimiento del Parque automotor en Pichincha entre 2008 y 2020

Fuente: AEADE, 2020. Sistema Nacional de Información, 2018 [8] [9]
Elaboración: Ricardo Román

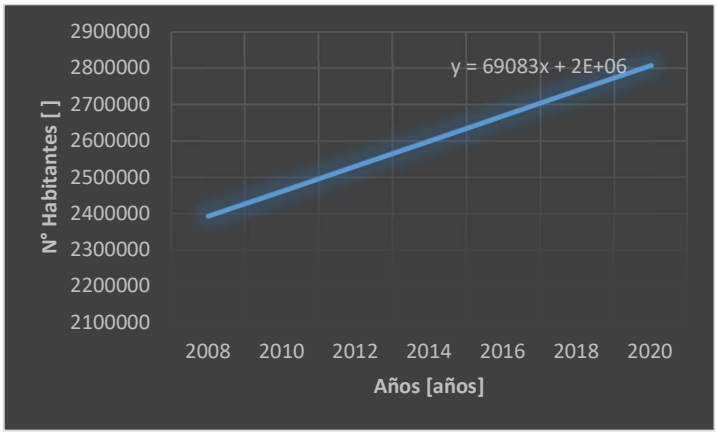

Fig. 2.6 Crecimiento poblacional de la ciudad de Quito 2008 – 2020

Fuente: INEC, 2020 [10]
Elaboración: Ricardo Román

A partir de las figuras 2.5 y 2.6 es posible determinar el parámetro de “Número de vehículos por cada 1000 habitantes”. Este indicador relaciona el crecimiento poblacional de la ciudad con el crecimiento del parque automotor, y permite conocer si el crecimiento de este último ha sido racional, obedeciendo al creciente número de habitantes o si ha sido excesivo aumentando el número de vehículos por ciudadano.

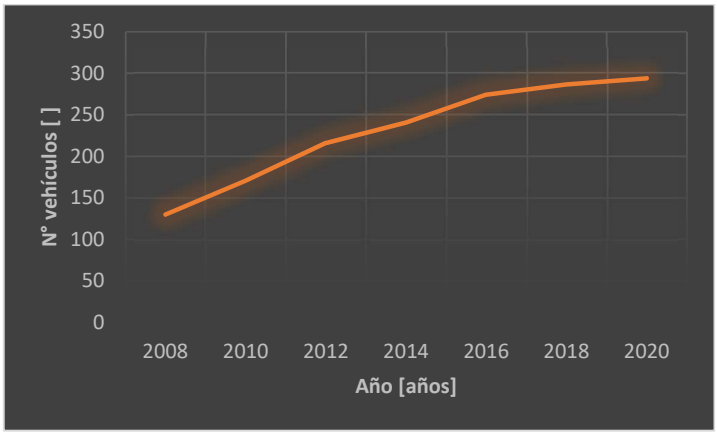

Fig. 2.7 Número de vehículos por cada 1000 hab. 2008 – 2020.

Fuente: AEADE, 2020. SIN, 2018. INEC, 2020 [8] [9] [10]
Elaboración: Ricardo Román

Como se puede dilucidar de la figura 2.7 el número de vehículos en la ciudad va en aumento. Y éste crecimiento no es proporcional al de la expansión demográfica. Consecuentemente las tasas de número de vehículos por cada 1000 habitantes son cada vez más altas. Esta alta tasa de vehículos respecto al número de habitantes no advierte que vaya a disminuir, como se puede observar en la figura 2.7. Y por el contrario es previsible que el número de vehículos, en la ciudad, siga aumentando.

2.1.3. Situación actual del fenómeno

En la actualidad el número de vehículos en la ciudad asciende a 530 000 (alrededor del 70% del total de la provincia) [13] [14] lo que implica casi un vehículo por cada 4 personas. La congestión vehicular y los tiempos de traslado en la ciudad se han vuelto excesivos durante las horas pico. Como medida paliativa el municipio de la ciudad dispuso, en mayo de 2010, la aplicación de el “Pico y Placa” [15]. Una medida que restringía la circulación de automotores, en función del número en el cual terminase su placa, en ciertos momentos del día. Lejos de aliviar el problema dicha medida provocó un boom de compra de vehículos, en aquellos sectores de la sociedad que disponían de los recursos para hacerlo, para sortear esta restricción.

En septiembre de 2019, como una de las primeras medidas tomadas por la administración del Dr. Jorge Yunda, se modificó el “Pico y Placa” por el “Hoy no

circula”. Buscando restringir aún más la circulación de vehículos en la ciudad. La medida ha surtido un efecto positivo, pero no se ha observado un cambio favorable a la reducción de compra de vehículos. Pues el problema base sigue siendo la mala calidad del transporte público en la ciudad. La figura 2.8 muestra la nube negra que se puede apreciar, en horas de la mañana, sobre la ciudad. Como evidencia de la mala calidad del aire, fruto de la excesiva cantidad de vehículos.

Fig. 2.8 Nube negra sobre el DMQ en horas de la mañana.

Fuente: Diario El Comercio (2016) [11]
Elaboración: Diario El Comercio (2016)

Además de las históricas demandas de la ciudadanía en contra del servicio de transporte metropolitano como la limpieza de las unidades, el buen trato de los señores conductores o la buena conducción. Otro aspecto que condiciona la calidad de aire de la ciudad es la contaminación emitida por los buses de transporte urbano. En vista de que a pesar de existir una normativa que regula las emisiones que los mencionados vehículos pueden emanar. Esta normativa no ha tenido en cuenta valores técnicos precisos para definir sus límites.

En varias zonas de la ciudad es posible apreciar espesas nubes de smog saliendo de los escapes de los buses de transporte urbano. Esta situación genera preocupación en la ciudadanía, pues en comparación, la opacidad del humo de un vehículo diésel, de una década de uso o menos, no llega a verse como el emanado por algunas unidades de transporte. La figura 2.9 ilustra este fenómeno con una unidad de transporte que circula en una concurrida calle del centro de la ciudad.

Fig. 2.9 Smog saliendo de un bus urbano en el centro de la ciudad.

Fuente: http://contaminacioonquito.blogspot.com/2015/06/contaminacion-en-quito_12.html [16]
Elaboración: Contaminación Ambiental en Quito, 2015

Uno de los sectores, donde queda evidenciado el efecto dañino de las opacas emisiones vehiculares, es la calle Necochea en el centro – sur de la ciudad. Donde los moradores se han organizado y han venido solicitando medidas para evitar la contaminación. Ya en 2006 los vecinos cerraron la vía [18] para exigir que se limite el paso de buses y camiones, pues ponen en riesgo la salud de quienes viven allí.

Lastimosamente el panorama no ha cambiado para quienes allí residen, pues además de los efectos dañinos para la salud de los habitantes, las fachadas de las residencias muestran un color oscurecido por el constante transitar de unidades de transporte de pasajeros. La figura 2.10 revela que dicho oscurecimiento es ocasionado por la acumulación de hollín.

Fig. 2.10 Hollín en las paredes de una casa de la calle Necochea

Fuente: Diario “La Hora” (2020) [17]
Elaboración: Diario “La Hora” (2020)

2.1.4. Características fundamentales del fenómeno

- Pueden verse con facilidad unidades de transporte de pasajeros cuyas emisiones son muy opacas, bastante más que emisiones de vehículos con similares tecnologías.

- Los límites para las emisiones contaminantes, fijados por el municipio de la ciudad no han tenido en cuenta factores técnicos, sino más bien es un valor arbitrario. En su arbitrariedad, dicho valor no es garantía de un control adecuado. Existe la posibilidad de que el límite sea muy laxo.

- Hay zonas de la ciudad que evidencian que las emisiones, de los vehículos del sistema de transporte de pasajeros, afectan nocivamente a la ciudad.

- Existe evidencia de manifestaciones y peticiones de los ciudadanos de la ciudad que indica que las emisiones de los automotores de transporte y carga pesada, son nocivos para la salud de los ciudadanos.

- El estado a través del subsidio al diésel gasta cerca de 1200 millones anuales. Del total del diésel subsidiado el 63% es usado por el transporte terrestre. (Diario La Hora, 2019) [48]

- El parque automotor en el país tiene un promedio de 16 años de antigüedad, y más del 60% de ese parque no tiene más de 10 años. (Diario digital primicias, 2020) [45]

2.1.5. Otras investigaciones referentes al fenómeno

En 2014 en la provincia de Imbabura se desarrolló la tesis "Medición y evaluación de los niveles de opacidad generados por los vehículos con motor de combustible diésel". Como conclusiones principales se determinó que:

- En la provincia de Imbabura la opacidad de los vehículos varía desde el 11,8% hasta un 59,3%; siendo 32,24% el porcentaje promedio. Además, se pudo observar que los vehículos con un mantenimiento adecuado presentan menores niveles de opacidad. [46]

- El kilometraje es una variable clave para determinar el nivel de opacidad. Existe una relación directamente proporcional considerable (0,76), que determina que a mayor kilometraje recorrido por el vehículo mayor será el porcentaje de opacidad. [46]

En 2017, en la ciudad de Quito, tuvo lugar el proyecto de investigación "Estudio de emisiones de gases de un motor diésel utilizando el combustible ecuatoriano y el colombiano en un dinamómetro". Los resultados de la investigación permitieron conocer que:

- Las propiedades físicas y químicas más importantes que se compararon que inciden en la combustión y opacidad del vehículo, son el contenido de azufre

que en el combustible ecuatoriano es de 0,05%, colombiano 0,005%, la viscosidad de 6 cSt y en el colombiano de 5 cSt. [20]

En 2017, en la ciudad de Quito, en la EPN se desarrolló el proyecto “Medición y evaluación de las emisiones de material particulado y opacidad en una flota de vehículos con motor ciclo diésel, utilizando una mezcla de diésel con 20% de queroseno”. En la tabla 2.1 se puede conocer los valores de opacidad encontrados por este estudio.

Tabla 2.1 Valores de opacidad de los vehículos de prueba

Placa	Opacidad (%)	Año	Cilindraje (cm^3)
PMA-1102	69,7	2009	7684
PMA-1091	69,3	2009	7684
PMA-7605	66,4	2016	7684
EEI-1274	45,0	2015	4009
PPC-2147	4,4	2010	2500

Fuente: Gómez, Vargas (2017) [57]
Elaboración: Ricardo Román

En 2018 se desarrolló en Quito la investigación “Correlación entre la opacidad y el material particulado PM 2.5, en vehículos diésel en la ciudad de Quito utilizando como muestra un motor de prueba” que determinó que un vehículo diésel modelo 1998 puede llegar a un porcentaje de opacidad del 66,7%. (Espinosa, Salazar, 2018). En 2019, en la ciudad de Cuenca, como proyecto previo a la obtención del título de Ingeniero Mecánico Automotriz de la Universidad Politécnica Salesiana de Cuenca. Edwin Cabrera y Carlos Carpio desarrollaron el proyecto “Análisis de la Opacidad del parque automotor diésel mediante una comparación con las redes de monitoreo de la calidad del aire en el centro histórico del cantón cuenca”. Dicho estudio concluyó que:

- La cantidad de azufre dentro del combustible es un factor que influye sobre las emisiones de SO_2, es así que desde el año 2011 hasta el 2014 se estimó

que las emisiones de dióxido de azufre del parque automotor diésel disminuyeron en 85.36%, esto se generó ya que desde el 2012 se distribuyó diésel Premium el cual contiene un máximo de 500 ppm de azufre, en cambio a finales del 2011 se distribuía diésel 2 con registros de hasta 7000 ppm. (Cabrera, Carpio, 2019)

2.2. MARCO CONCEPTUAL

2.2.1. Motores de Combustión Interna (MCI)

Los MCI son máquinas térmicas que recurren a la quema de un combustible, dentro de una cámara aislada del medio externo, y convertir esta energía química, de la combustión, en energía mecánica. Tuvieron su origen como una alternativa a las máquinas de vapor. Y aunque en un principio sus reducidas eficiencias les significaron el rechazo de la sociedad, son hoy en día una tecnología omnipresente. Que puede encontrarse desde los campos más especializados de la industria (minería, petróleo, navíos militares) hasta en elementos tan cotidianos como podadoras o motocicletas. Pueden dividirse en 3 grupos principales como indica la figura 2.11.

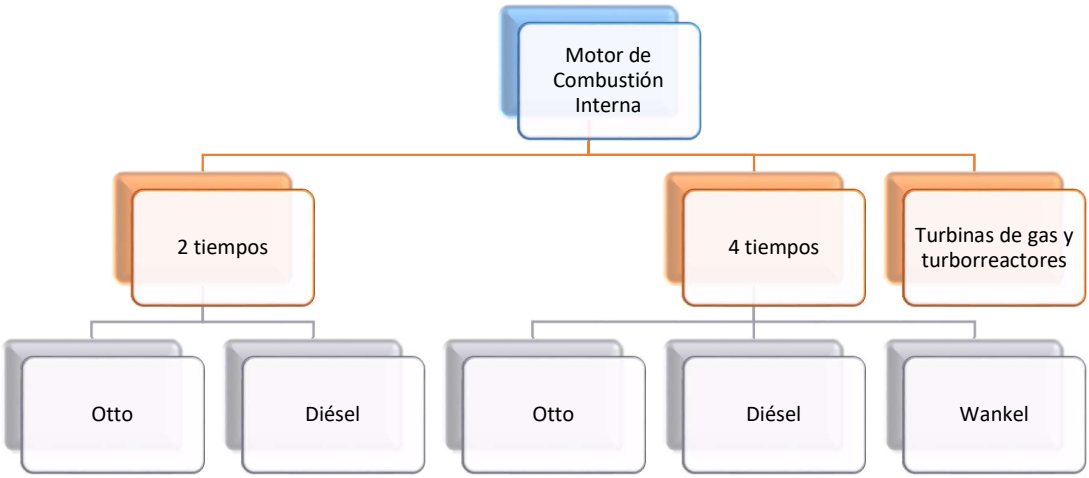

Fig. 2.11 Clasificación Básica de los Motores de Combustión Interna.

Fuente: Martínez (2007) [23]
Elaborado por: Ricardo Román

Para este proyecto son de interés únicamente los motores de combustión interna de ciclo Diésel. Estos motores también son conocidos como Motores de Encendido por Compresión (Payri, 2011). Esto se debe a diferencia de los motores de ciclo Otto en los cuales se inyecta una mezcla aire – combustible en el cilindro, a la que posteriormente se le provocará la ignición a través de una chispa eléctrica (generada por la bujía). En la otra mano, se tiene a los motores de ciclo Diésel en los cuales no se inyecta una mezcla aire – combustible, sino que se inyecta aire, solamente, y fruto de una alta compresión se produce el aumento de temperatura y presión del aire. Y en el momento en el que se inyecta el combustible, son tales las condiciones de presión y temperatura que la ignición del combustible se da casi inmediatamente.

2.2.1.1. Motores de Encendido por Compresión (MEC)

Son motores que provocan la ignición del combustible por la altísima temperatura y presión a la que llega el aire en la cámara de combustión. Dentro del cilindro sólo se introduce aire. El combustible es inyectado directamente en el cilindro justo antes de necesitar la ignición del combustible. Normalmente en el cilindro siempre habrá más del aire necesario para una combustión estequiométrica, y el control del par motor viene dado únicamente por la cantidad de combustible inyectada en el cilindro. El flujo de aire permanece relativamente constante.

La relación de compresión en los motores diésel es mucho mayor a la de los motores de encendido provocado. Está en un rango de 12:1 a 24:1, dependiendo del diseño del motor y si es atmosférico o cuenta con turbocompresor. El aire, bajo una presión cercana a la atmosférica, entra en el cilindro y se comprime hasta los 4 MPa y 800 K durante la carrera de compresión. Alrededor de 20° antes del PMS empieza la inyección de combustible. El inyector de combustible atomiza el líquido que se mezcla con el aire. El líquido se evapora rápidamente y se mezcla en la proporción necesaria para combustionar, y después de un instante zonas aleatorias de la mezcla empiezan a combustionar espontáneamente (auto ignición) y la presión en el cilindro crece por sobre el nivel de no ignición. Mientras el tiempo de explosión continúa, los gases de combustión se mezclan con el aire acompañados

de combustiones continuadas. A máxima carga el porcentaje de combustible inyectado puede llegar a un 5% de la masa de aire. Cuando no existe un buen escape y quedan altos niveles de humo en el cilindro, se limita la cantidad de combustible que puede ser quemada eficientemente.

El sistema de inyección diésel consiste en una bomba de inyección, tuberías de inyección y boquillas de inyección. Distintos tipos de bombas y boquillas de inyección son empleadas. En una bomba de combustible común un grupo de pistones (uno por cada cilindro) controlados por el árbol de levas operan dentro de cilindros de montaje. Al inicio de la carrera, el puerto de entrada está cerrado y el combustible atrapado sobre el pistón es forzado a través de una válvula dentro de la línea de inyección.

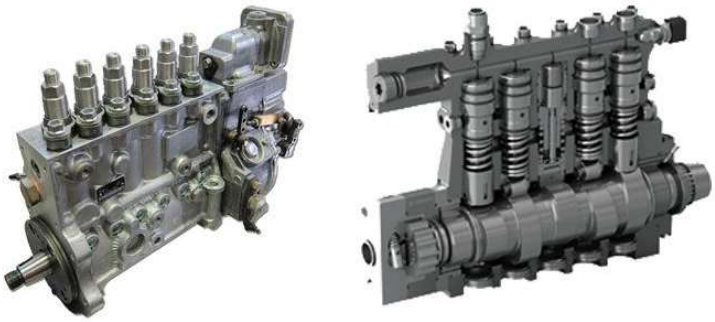

Fig. 2.12 Bomba Lineal.

Fuente: https://www.conservatucoche.com/ [24]
Elaborado por: https://www.conservatucoche.com/

Las bombas del tipo distribuidor sólo tienen un pistón y un cilindro, que miden y distribuyen el combustible a todas las boquillas de inyección. Estas bombas contienen una bomba de combustible de baja presión, una bomba de inyección de alta presión, un gobernador y un temporizador. La alta presión es generada por el pistón que está hecho para describir un movimiento giratorio y alternativo por el disco excéntrico giratorio o la leva del árbol de levas; el movimiento giratorio distribuye el combustible a las boquillas de inyección individuales.

Las bombas con distribuidor son las más comunes en los motores pues pueden operar a mayores velocidades y ocupan menos espacio que las bombas lineales. Son usadas comúnmente en motores diésel pequeños. Las bombas lineales son

empleadas en motores medianos y grandes. En los motores más grandes, normalmente son usadas bombas de inyección individuales de un solo cilindro, montadas cerca una de otra con un control externo. (Heywood, 1988)

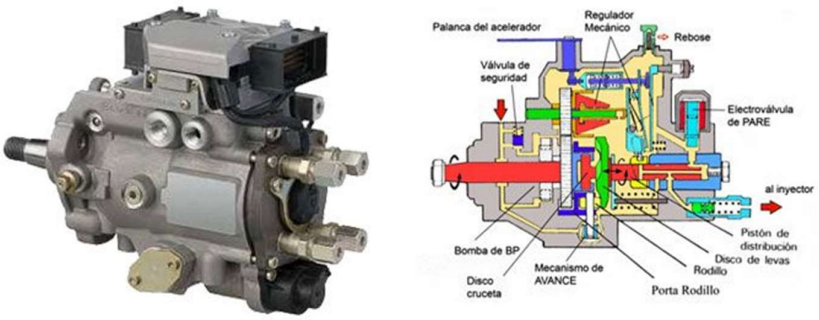

Fig. 2.13 Bomba Rotativa.

Fuente: https://www.conservatucoche.com/es/motor/bomba-de-inyeccion-diesel-que-es-y-como-funciona-17.html [27]
Elaboración: https://www.conservatucoche.com/

Una operación satisfactoria, en los motores de encendido por compresión, depende de un control adecuado del flujo de aire y de la inyección de combustible. El sistema de combustión ideal debe tener una alta potencia (pmef), alta eficiencia, rápida combustión, un escape limpio y ser silencioso. Hasta cierto punto estos aspectos no pueden conseguirse simultáneamente, por ejemplo, la potencia del motor está limitada directamente por los niveles de humo. Hay dos tipos fundamentales de cámaras de combustión: Aquellas con inyección directa (DI) dentro de la cámara principal, y aquellos con inyección indirecta (IDI) en algún tipo de cámara dividida. (Stone, 1992)

2.2.1.1.1. Inyección Directa

En este tipo de motores, el contenido del cilindro es un único sistema abierto. Los únicos flujos de masa dentro de las fronteras del sistema (mientras las válvulas de admisión y escape están cerradas) son el combustible y el flujo de grieta. Es decir que sólo existe una cámara en donde se inyecta el combustible y donde posteriormente se desarrolla la combustión.

2.2.1.1.2. Inyección Indirecta

Estos motores cuentan con una cámara adicional para llevar a cabo la mezcla del aire y el combustible. Esta cámara cuenta además con una bujía de precalentamiento que eleva la temperatura de la mezcla. Las presiones en cada una de las dos cámaras, principal y auxiliar, no son iguales durante el proceso de combustión. Debido a que la combustión empieza en la cámara auxiliar o precámara, la emisión de energía del combustible en la precámara provoca que la presión, en ésta, sea mayor que la de la cámara principal. Dependiendo del diseño de la cámara de combustión y de las condiciones de operación, la presión en la precámara puede ser 0.5 a 5 atm superior a la existente en la cámara principal. Esta diferencia de presiones genera un flujo de combustible, aire, y gases combustionando y combustionados dentro de la cámara principal, donde se genera una nueva transferencia de energía. El análisis de los motores con inyección directa en la sección previa se realizó a presión uniforme dentro de la cámara de combustión. Para los motores con inyección indirecta el efecto de la diferencia de presión entre las cámaras debe normalmente considerarse.

2.2.1.1.3. Comparación Inyección Directa e Indirecta

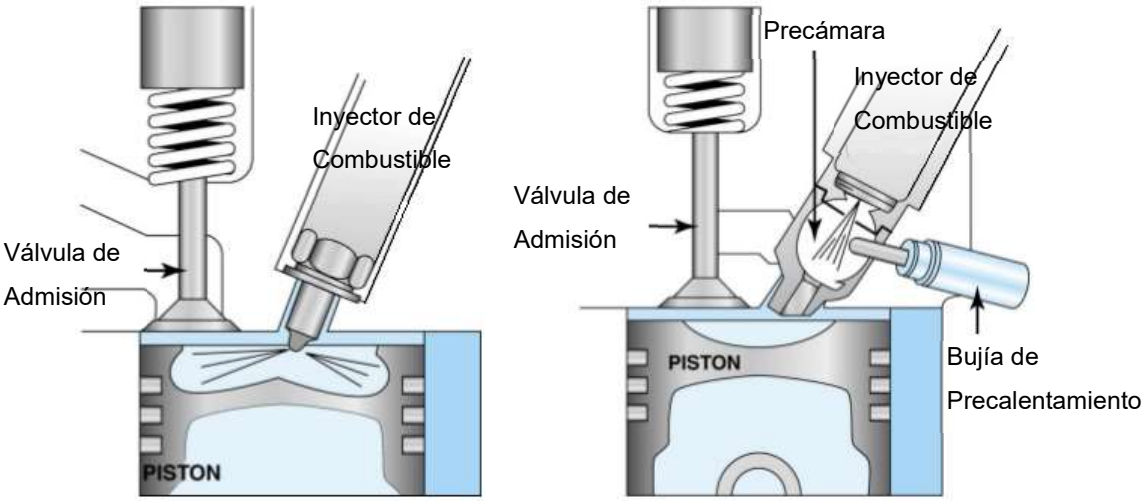

Fig. 2.14 Ilustración de la diferencia entre Inyección Directa e Indirecta.

Fuente: https://www.slideshare.net/Protagonistsoldier/diesel-engine-power-plant-syed-anser-hussain-naqvi [32]
Elaborado por: Ricardo Román

Respecto al desempeño de los motores con inyección directa e indirecta, algunos autores han investigado al respecto. En general, en cualquier tipo de motor de encendido por compresión es esencial que se ajuste adecuadamente la inyección de combustible y el movimiento del aire. Estos requerimientos pueden ser satisfechos con mayor facilidad en el caso de los motores con inyección indirecta, en vista de que la pre-cámara o cámara de arremolinamiento produce una buena mezcla del aire y el combustible. En virtud de que el rango de velocidad y la utilización de aire son ambas mayores en el motor de inyección indirecta, la potencia es mayor que en los motores con inyección directa. Sin embargo, con cámaras de combustión divididas es inevitable una caída de presión y una mayor transferencia de calor, y consecuentemente la eficiencia de los motores con inyección indirecta es menor que la de los motores de inyección directa. De esta forma el desarrollo de motores con inyección directa de alta velocidad ha aumentado.

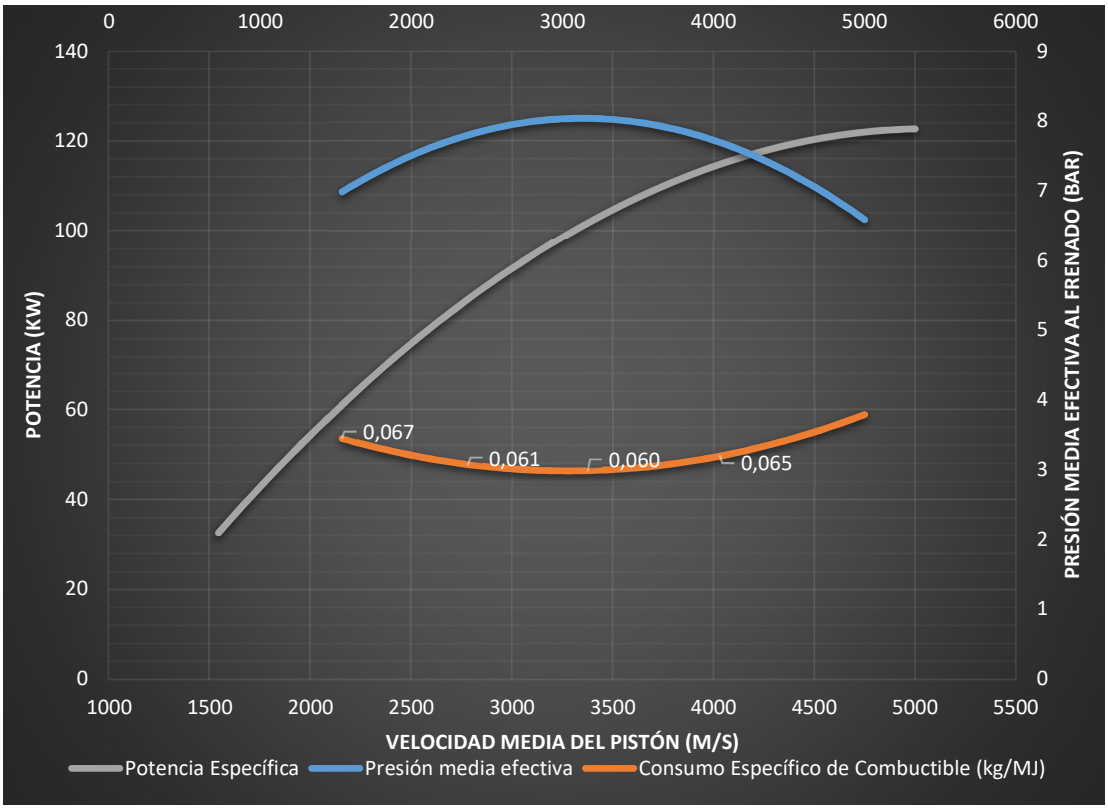

Fig. 2.15 Desempeño típico para un motor con inyección directa. (4 cilindros en línea, 3000 cm^3 de cilindrada, turbo)

Fuente: Howarth, 1966 [33]

Elaboración: Ricardo Román

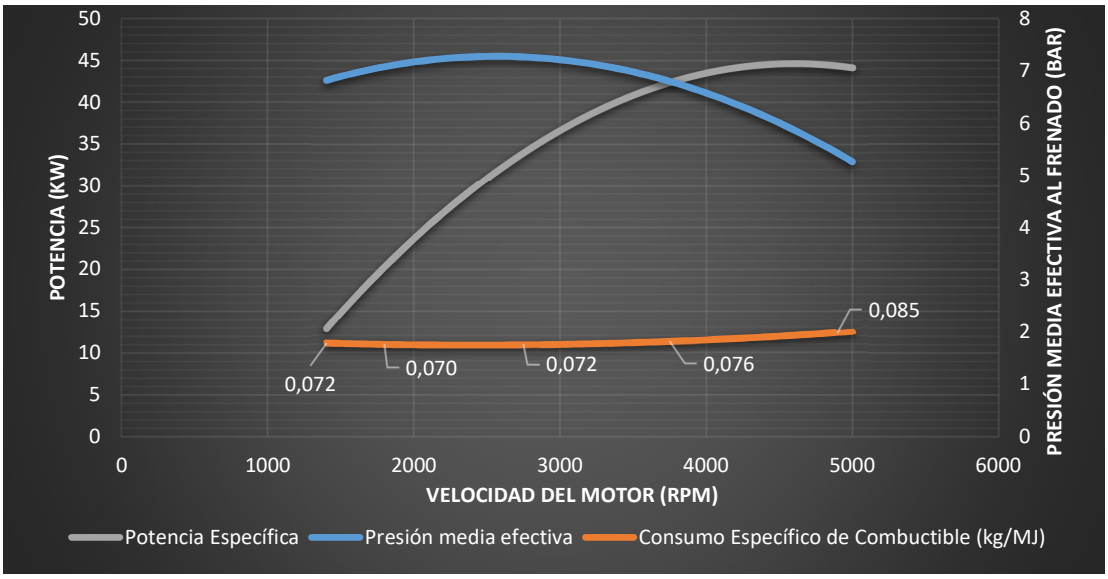

Fig. 2.16 Desempeño típico de un motor con inyección indirecta.

Fuente: Howarth, 1966 [33]
Elaboración: Ricardo Román

La razón de compresión de los MEC está determinada normalmente por los requisitos de arranque, y es común que sea mayor que la óptima, sea para máxima economía de combustible o máxima potencia. Esto es especialmente cierto para los motores de inyección indirecta donde la razón de compresión suele estar oscilar entre 18 a 24:1. A pesar de esto, ayudas de arranque adicionales acostumbran a usarse en los MEC, a saber, inyección de combustible en exceso, precalentadores y combustibles especiales.

Además de los inyectores unitarios hay dos tipos principales de bombas inyectoras, bombas lineales y rotativas. Las bombas rotativas son más baratas, pero la presión de inyección es menor que la de las bombas lineales. Esto hace que las bombas rotativas sean más adecuadas para motores de inyección indirecta con requerimientos menos exigentes. Los inyectores de combustibles y las boquillas también son componentes clave, y de igual forma que las bombas inyectoras suelen ser producidos por fabricantes especializados.

En conclusión, la correcta conjugación de la inyección de combustible al flujo de aire es muy importante. La amplia gama de cámaras de combustión para inyección directa evidencia que el diseño final es menos importante que asegurar la correcta mezcla del aire y el combustible. Debido a que la potencia de cualquier MEC (Motor de encendido por compresión) es menor que la de un MEP (Motor de encendido provocado) de dimensiones similares. Los turbocompresores son fundamentales para elevar la potencia del MEC, con lo que además se obtiene una mejor eficiencia.

2.2.1.1.4. Combustión en los MEC

La combustión en un MEC es algo diferente de la de un MEP. Mientras que la combustión en un MEP es esencialmente un frente de llama avanzando a través de una mezcla homogénea, la combustión en un MEC es un proceso aleatorio que ocurre simultáneamente en varios lugares de una mezcla no homogénea a una tasa controlada por la inyección de combustible. En ingreso de aire al motor es libre, con el torque y la potencia del motor determinados por la cantidad de combustible inyectado por ciclo. Debido a que el aire no sufre ningún tipo de estrangulamiento, la presión en el múltiple de admisión se mantiene en un valor de presión, básicamente, igual a la atmosférica.

Durante la carrera de compresión el cilindro sólo contiene aire, y se utilizan razones de compresión mucho mayores. Las razones de compresión de MEC moderno están en el rango de 12 a 24. En comparación a los MEP, se obtienen altas eficiencias térmicas (eficiencias de conversión de combustible) cuando estas razones de compresión se usan en las ecuaciones 2.1 y 2.2

$$(\eta_t)_{DIESEL} = 1 - \left(\frac{1}{r_c}\right)^{k-1} \left\{\frac{\beta^k - 1}{k(\beta - 1)}\right\} \qquad (Ec. 2.1)$$

$$(\eta_t)_{DUAL} = 1 - \left(\frac{1}{r_c}\right)^{k-1} \left\{\frac{\alpha\beta^k - 1}{k\alpha(\beta - 1) + \alpha - 1}\right\} \qquad (Ec. 2.2)$$

Donde:

$r_c = razón\ de\ compresión$

$$k = \frac{c_p}{c_v}$$

$$\alpha = relación\ de\ presiones$$

$$\beta = relación\ de\ volúmenes$$

Sin embargo, debido a que la relación aire combustible promedio, a la cual los MEC funcionan, es relativamente pobre, se obtiene menos potencia para un desplazamiento de motor dado.

El combustible es inyectado en los cilindros, tarde, en la carrera de compresión por uno o más inyectores localizados en la cámara de combustión de cada cilindro. El tiempo de inyección dura normalmente 20° del giro del cigüeñal, comenzando a alrededor de 15° antes del PMS y finalizando 5° después de ese punto. La demora de ignición es casi básicamente constante, por lo que a mayores rpm el combustible debe inyectarse un poco antes.

Además del arremolinamiento y la turbulencia del aire, se necesita una alta velocidad de inyección para distribuir el combustible en todo el cilindro y facilitar homogenización con el aire.

Después de la inyección el combustible debe atravesar una serie de etapas que aseguran una adecuada combustión:

Atomización: Las gotas de combustible se dividen en pequeñas gotitas. Mientras más pequeñas sean las gotas iniciales emitidas por el inyector, más rápido y eficiente será el proceso de atomización.

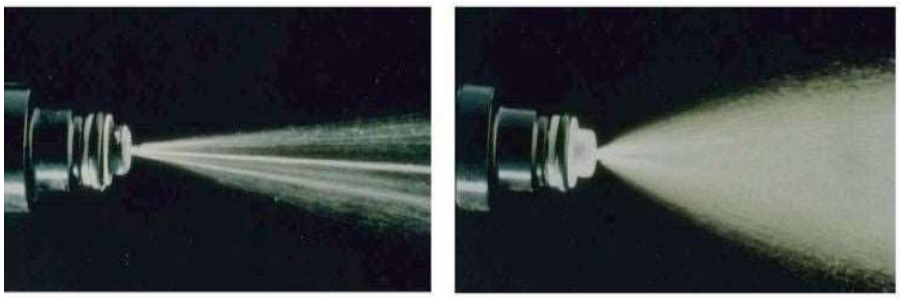

Fig. 2.17 Ilustración de la atomización del combustible.

Fuente: https://www.diariomotor.com/como/mantenimiento/ [34]
Elaborado por: Diario Motor

Vaporización: Las pequeñas gotitas de combustible líquido se transforman en vapor. Esto ocurre muy rápido debido a la alta temperatura del aire ocasionada por las altas relaciones de compresión. Para que estas temperaturas se alcancen se necesita por lo menos una relación de 12:1. Alrededor del 90% del combustible inyectado en el cilindro se evapora en 0.001 segundos después de la inyección. Conforme la primera gota se evapora, sus alrededores inmediatos se enfrían por el enfriamiento de evaporación. Esto afecta enormemente las evaporaciones posteriores. Cerca al núcleo del jet de combustible, la combinación de una alta concentración de combustible y el enfriamiento por evaporación causan una saturación adiabática del combustible. Por lo que la evaporación se detiene en ésta región, y sólo después de mayor homogenización y calentamiento este combustible se evapora.

Mezcla: Después de la evaporación, el vapor de combustible debe mezclarse con aire para formar una mezcla dentro del rango aire-combustible en el que sea inflamable. Esta mezcla se produce debido a la alta velocidad de inyección del combustible aunada al arremolinamiento y a la turbulencia en el cilindro. La figura 2.17 muestra las distintas zonas del chorro de inyección y las mezclas generadas en esa zona.

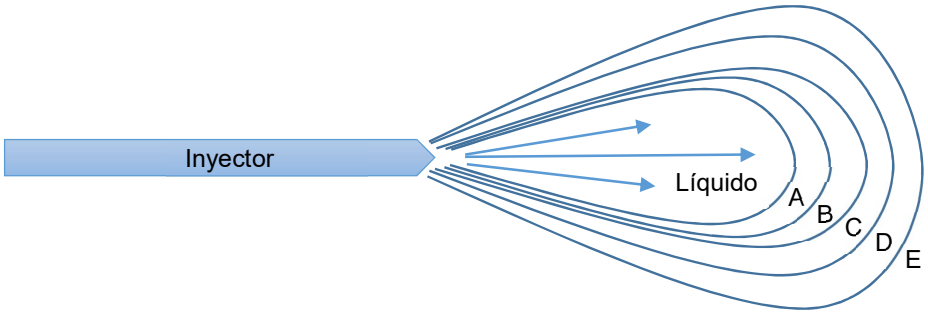

Fig. 2.18 Chorro de combustible de un MEC. Se ilustra las zonas de mezcla aire-combustible alrededor del núcleo líquido. El núcleo líquido está rodeado de mezclas sucesivas de vapor que son (A) muy rica para combustionarse, (B) rica en combustible, (C) estequiométrica, (D) pobre en combustible, (E) muy pobre para quemarse. La auto-combustion empieza primordialmente en la zona B. El hollín se genera principalmente en la zona A y B.

Fuente: Pulkrabek, W. W. (1997) [28]
Elaborado por: Ricardo Román

Auto ignición: A alrededor de 8° antes del punto muerto superior, entre 6 y 8° después del inicio de la inyección, la mezcla aire-combustible empieza a auto combustionarse. La combustión, propiamente, es precedida por reacciones secundarias, incluyendo la ruptura de las largas cadenas de hidrocarburos en tipos más pequeños y algo de oxidación. Estas reacciones, provocadas por la alta temperatura del aire, son exotérmicas y provocan un posterior aumento de la temperatura en sus inmediaciones. Esto finalmente conlleva a un proceso sostenido de combustión.

Combustión: La combustión empieza con la auto ignición simultáneamente en muchos lugares de la zona ligeramente rica en combustible, donde la razón equivalente es de 1 a 1.5. En este momento, entre el 70 y 95% del combustible en la cámara de combustión es vapor. Cuando la combustión empieza, múltiples frentes de llama provenientes de los puntos de auto ignición consumen rápidamente toda la mezcla gaseosa que está en una correcta relación aire-combustible, incluso donde no se haya producido auto ignición. Esto provoca un aumento súbito de la temperatura y presión del cilindro.

La alta temperatura y presión reducen el tiempo de evaporación y de demora de ignición de otras partículas de combustible y causan que más puntos de auto ignición potencien el proceso de combustión. El combustible líquido aún está siendo inyectado en el cilindro cuando la primera porción de combustible ya se está combustionando. Después del inicio de la combustión cuando toda la mezcla aire-combustible que está en estado inflamable se quema velozmente, el resto de la combustión se controla a través de la velocidad con la que puede ser inyectado, atomizado, vaporizado y mezclado en la proporción aire-combustible adecuada.

Esta tasa de combustión, ahora controlada con la velocidad de inyección puede verse en la figura 2.18 en el bajo aumento de presión que se produce después del masivo aumento inicial. La combustión dura entre 40° y 50° de rotación del motor, mucho más tiempo que la inyección (20°). Esto se debe a que a algunas partículas les toma tiempo mezclarse en una proporción adecuada y permanecen más tiempo durante la carrera de expansión. Nuevamente esto queda ilustrado en la figura 2.18, donde la presión permanece alta hasta que el pistón está 30° o 40° más allá del punto muerto superior. Alrededor del 60% del combustible es quemado en el primer tercio del tiempo de combustión. La velocidad de combustión aumenta con la velocidad del motor, así que el ángulo de quema permanece casi constante. Durante la principal etapa de la combustión, entre el 10% y el 35% del vapor de combustible en el cilindro estará en una proporción aire-combustible correcta.

2.2.1.1.5. Emisiones en los MEC

Las emisiones de gases contaminantes, por parte de los vehículos con motores de combustión interna, han ido en aumento desde su invención en el ocaso del siglo XIX. Desde los años 80, en el Ecuador, el problema del smog ha venido incrementándose. Siguiendo la tendencia global que desde mediados del siglo XX se empezó a manifestar. Y no fue hasta la década del 60 que se identificó a los automóviles como contribuyentes clave de esta contaminación, y la necesidad de establecer estándares. A raíz de la exigencia de motores más eficientes y menos contaminantes. La industria del automóvil se vio abocada a cambiar el paradigma

de fabricación, dejando de lado el enfoque en la potencia (normalmente conseguida a través de aumentos en la cilindrada y el volumen de aire aspirado) y adoptando la eficiencia de los motores como nueva directriz de diseño. Esto consiguió que, durante la década de los 70 y 80, las emisiones de hidrocarburos, monóxido de carbono y óxidos de nitrógeno se reduzcan en un 95%. De la misma manera en la década siguiente el plomo, uno de los mayores contaminantes del aire, fue descartado como aditivo para el combustible.

En contraparte el crecimiento del parque automotor repuntó, por lo que los niveles de contaminación se mantuvieron prácticamente igual. En el futuro, reducir aún más las emisiones, será un proceso mucho más costoso. Y el aumento de la población tampoco da indicios de desacelerarse. En la figura 2.19 se aprecia la relación entre la emisión de contaminantes y la relación aire combustible de un motor MEP típico.

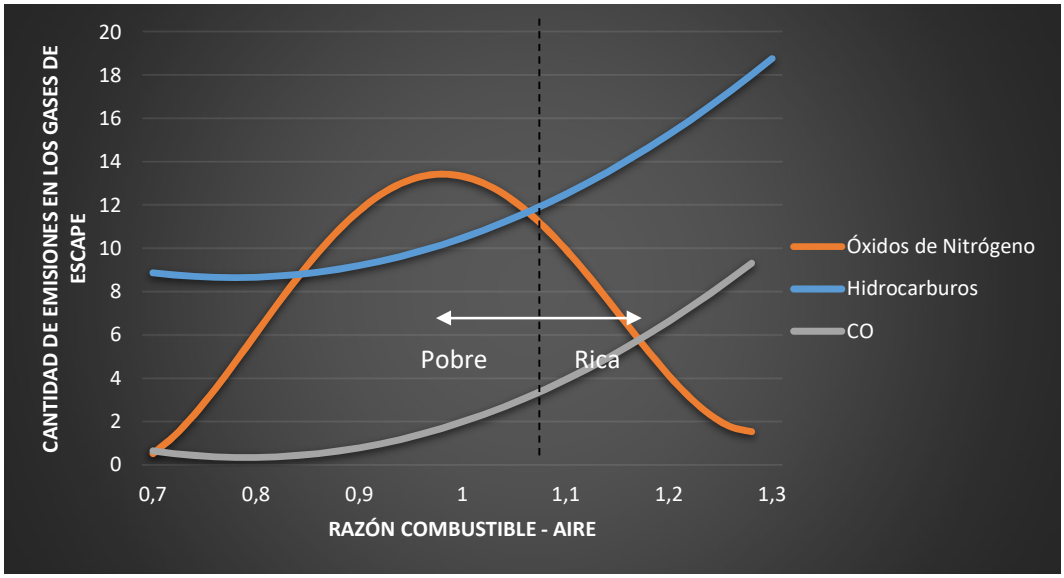

Fig. 2.19 Emisiones para un MEC en función de la razón combustible – aire.

Fuente: Heywood, 1988. [25]
Elaboración: Ricardo Román

En los motores de ciclo diésel se utiliza frecuentemente convertidores catalíticos, no obstante, estos últimos no son eficientes para reducir los óxidos de nitrógeno. Los hidrocarburos y el monóxido de carbono por otro lado son reducidos satisfactoriamente, aunque hay una mayor dificultad por la menor temperatura a la

que salen los gases de escape. Hecho que se compensa por la mezcla mayormente pobre con la que funciona el ciclo diésel.

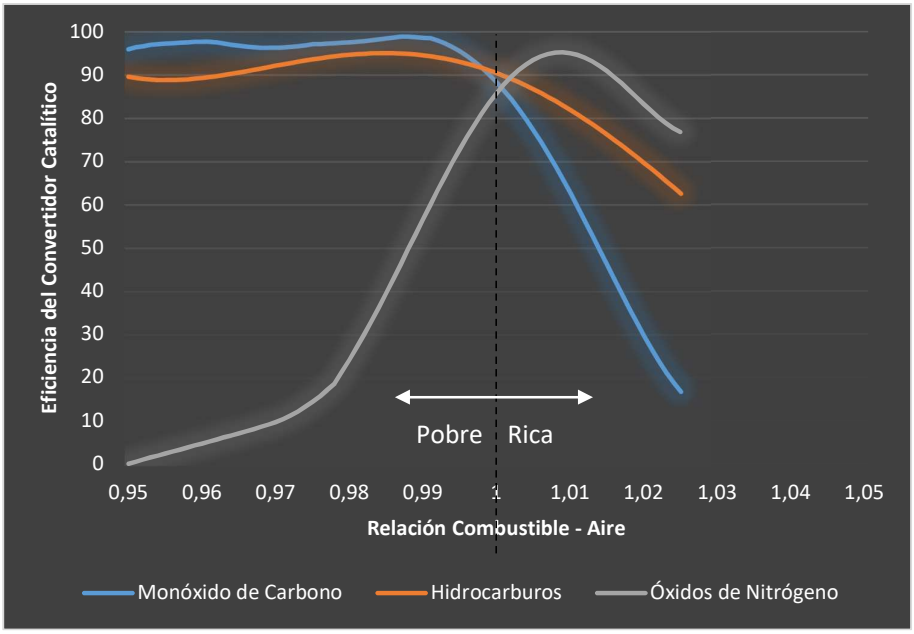

Fig. 2.20 Eficiencia del Catalizador en Función de la relación Combustible – Aire para un MEC.

Fuente: Kummerj, T.,1981. [35]
Elaborado por: Ricardo Román

2.2.1.1.6. Fuentes y Control de Emisiones en los MEC

El monóxido de carbono no es una parte importante a ser controlada en los MEC pues su funcionamiento, en general y con un motor en buenas condiciones, utiliza mezclas pobres de combustible.

El ruido de los motores diésel se debe principalmente a las altas relaciones de compresión con las que son diseñados, siendo que estas conllevan altísimas presiones de funcionamiento presentes durante la combustión. Esta relación fue bien identificada por Glikin en 1985. Para entender la fuente de la rápida combustión y cómo puede ser controlada, es necesario considerar la inyección de combustible y los procesos de combustión.

Como se indicó previamente, el combustible es inyectado en la cámara de combustión casi al final de la carrera de compresión. El combustible se evapora de cada gota de combustible, y se mezcla con el aire para formar una mezcla inflamable. No obstante, la combustión no se produce inmediatamente, y durante este lapso de demora (entre el inicio de la inyección y el inicio de la combustión) se sigue formando la una mezcla inflamable. En consecuencia, cuando la ignición ocurre lo hace en diferentes zonas, y se presenta una rápida combustión de la mezcla formada durante el lapso de demora. Esta rápida combustión genera el golpeteo característico del diésel. Evidentemente, la forma de reducir el ruido de la combustión es: o bien reducir la cantidad de mezcla preparada durante el lapso de demora, lo que puede conseguirse reduciendo la tasa de inyección inicial o más comúnmente reducir la duración del lapso de demora. El lapso de demora puede reducirse:

- Con una mayor temperatura, lo que aumenta tanto la tasa de transferencia de calor, como las tasas de reacción química.
- Con una mayor presión, que aumenta la tasa de transferencia de calor.
- Con un combustible cuya autoignición se produzca más fácilmente (mayor número de cetano)

Un combustible con alto cetanaje es difícil de obtener, pues la calidad del diésel suele ser mediocre. Mayores temperaturas se presentan en motores sobrealimentados y en los que tienen bajas pérdidas de calor. Pero como se mencionará posteriormente esto involucra altos niveles de NOx. Una solución alternativa es demorar el momento de inyección para que la inyección se produzca más cerca del final de la carrera de compresión. Esto genera un aumento en el consumo de combustible, así como otros inconvenientes.

La relación entre Ruido, Humo, NOx y consumo específico de combustible con adelanto y retraso de inyección se muestra en la figura 2.21. Idealmente, la combustión debería ocurrir instantáneamente en el punto muerto superior. En la práctica, la combustión empieza antes del mismo y continúa después de éste. Adelantar el inicio de la inyección (y así la combustión) aumenta el trabajo de

compresión, pero las mayores presiones y temperaturas conseguidas en el PMS también aumentan el trabajo de expansión. No obstante, si el tiempo de inyección se adelante demasiado, el aumento en el trabajo de compresión será mayor que el de expansión. Obviamente, una inyección más rápida conlleva una combustión más rápida, y esto resulta en tiempos de inyección menos adelantados. Hay una tasa de inyección sobre la cual no existen aumentos en el consumo de combustible, y mientras mayor el arremolinamiento menor la tasa de inyección.

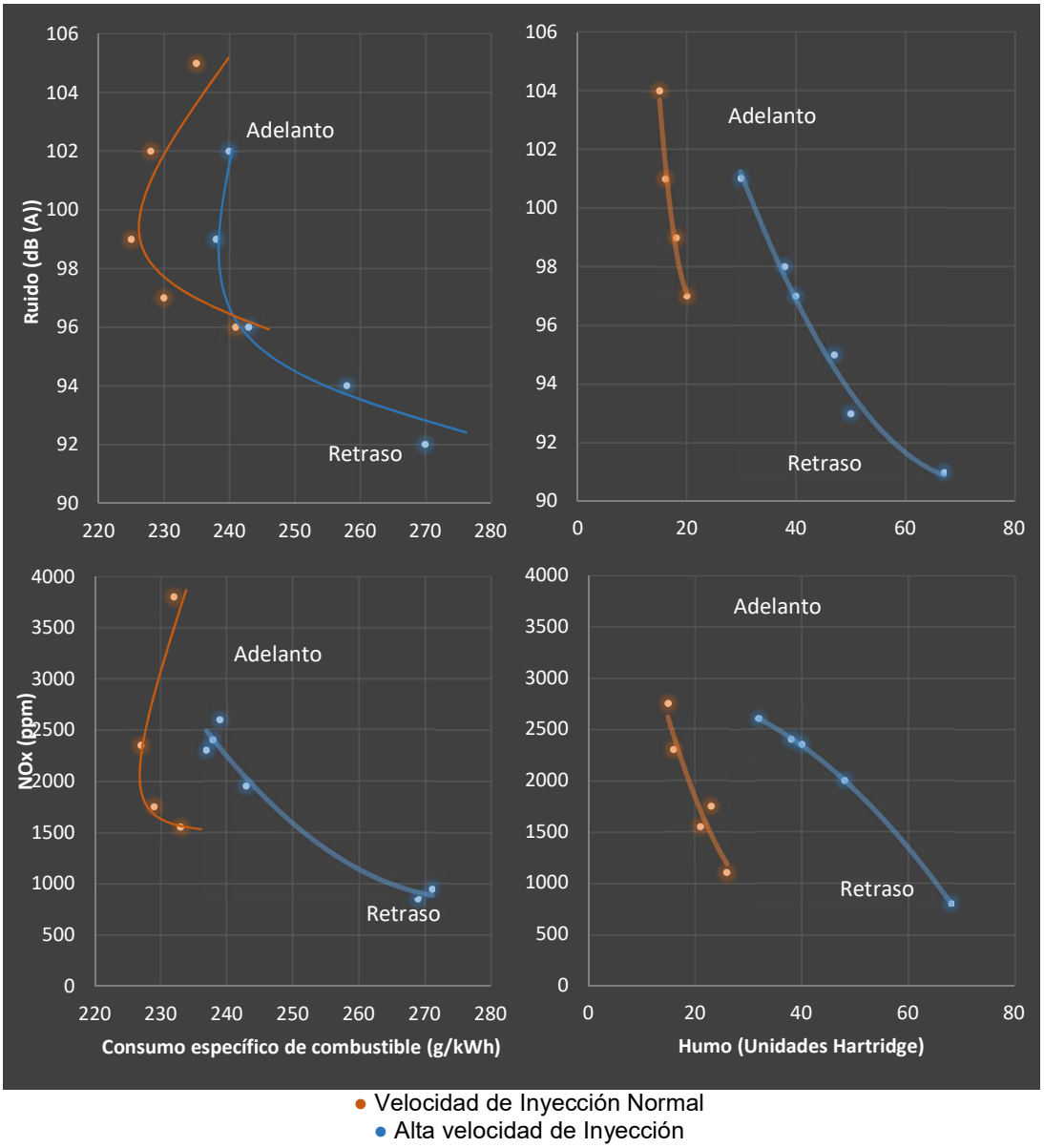

Fig. 2.21 Relación entre Ruido, Humo, NOx y consume específico de combustible. A diferentes velocidades de inyección y con diferentes tiempos de inyección.
Fuente: Pischinger, Cartellieri. (1985) [36]
Elaborado por: Ricardo Román

El humo negro de los MEC se origina en el lado rico en combustible de la zona de reacción en la fase de difusión controlada de la combustión. Luego de la rápida combustión al final del período de demora, la combustión subsecuente del diésel es controlada por las tasas de difusión de aire dentro del vapor de combustible y viceversa, y la difusión de los productos de la combustión fuera de la zona de reacción. Las partículas de carbono se forman por la descomposición térmica (fractura) de las moléculas grandes de hidrocarburo, y las partículas de hollín se forman por aglomeración. Las partículas de hollín pueden oxidarse cuando entran en la porción pobre de la zona de reacción, y continúan haciéndolo durante la carrera de expansión, después del final de la fase de difusión de la combustión.

La generación de humo aumenta por altas temperaturas en la zona rica en combustible durante la difusión de la combustión, y por reducciones en la razón aire combustible total. Las emisiones de humo pueden reducirse acortando la fase de difusión de la combustión, siendo que esto limita el tiempo para la formación de hollín y prolonga el tiempo para su oxidación. La fase de difusión puede acortarse incrementando el arremolinamiento, con una inyección más rápida, y un spray de combustible más delgado. Adelantar el tiempo de inyección también reduce las emisiones de humo. Mientras más se adelante la inyección, mayores son las temperaturas durante la carrera de expansión, y mayor es el tiempo que tienen las partículas de hollín, para oxidarse. Desafortunadamente adelantar el tiempo de inyección conlleva a un aumento de los decibeles. No obstante, si la velocidad de inyección se aumenta y el tiempo se retrasa, se puede obtener una reducción final tanto de ruido como de humo. Una combinación así se muestra en la figura 2.21, y también se puede apreciar que el mínimo consumo específico de combustible presenta una ligera disminución, y que hay una reducción significante en las emisiones de óxidos de nitrógeno.

La formación de humo depende principalmente de la carga del motor. Conforme crece la carga, se inyecta más combustible, y esto aumenta la formación de humo por tres razones.

- La duración de la difusión de la combustión aumenta.

- Las temperaturas de combustión aumentan.
- Durante la carrera de expansión se produce menos oxidación del hollín pues hay menos tiempo después del final de la difusión de la combustión, y también hay menos oxígeno.

En los motores atmosféricos, siempre ocurre que la formación de humo limita la potencia del motor. La formación de óxidos de nitrógeno está íntimamente ligada a la temperatura, la concentración local de oxígeno y la duración de la combustión. Por este motivo en los motores diésel, los NOx se forman durante la fase de difusión de la combustión, en el lado débil de la zona de reacción. Reducir la duración de la difusión controlada de la combustión incrementando la velocidad de inyección conlleva la disminución de los NOx como se indicó en la figura 2.19. Retardar el tiempo de inyección también reduce los NOx, pues una inyección posterior implica menores temperaturas, y la fuerte relación entre temperatura y NOx determina una reducción de NOx, a pesar del aumento en la duración de la combustión asociada a la inyección retrasada. La relación entre NOx y la formación de humo también se muestra en la figura 2.21.

A media carga, la formación de humo es baja, pero hay presencia de NOx, la figura 2.22-b muestra que las emisiones de NOx por unidad de potencia de hecho crecen. En general, las emisiones de NOx son mayores en un motor con inyección indirecta que en uno con inyección directa, pues los motores con inyección indirecta tienen una mayor relación de compresión y, por lo tanto, mayores temperaturas de combustión. Al igual que en los MEP la recirculación de los gases de escape a media carga es forma efectiva de reducir los NOx. Los gases inertes limitan las temperaturas de combustión, consecuentemente, reduciendo la formación de NOx. Pischinger y Cartellieri (1972) presentaron resultados para un motor de inyección directa a media carga en el que las emisiones de NOx fueron reducidas a la mitad con una recirculación de aproximadamente un 25% (EGR), pero con un aumento de consumo de un 5%.

Los hidrocarburos sin combustionar en un MEP afinado correctamente provienen de dos fuentes. En primer lugar, alrededor del perímetro de la zona de reacción

habrá una mezcla que es demasiado pobre como para quemarse, y mientras más largo sea el período de demora tanto mayor será la cantidad de emisiones de HC. Sin embargo, hay un período de demora debajo del cual ya no es posible obtener reducción en las emisiones de HC. Bajo estas condiciones las emisiones de HC se originan principalmente en una segunda fuente, el combustible remanente en el saco de la boquilla (el espacio entre el asiento de la boquilla y los orificios de salida) y en los orificios de salida. El combustible de estas fuentes puede entrar a la cámara de combustión tarde en el ciclo, con la consecuente emisión de hidrocarburos.

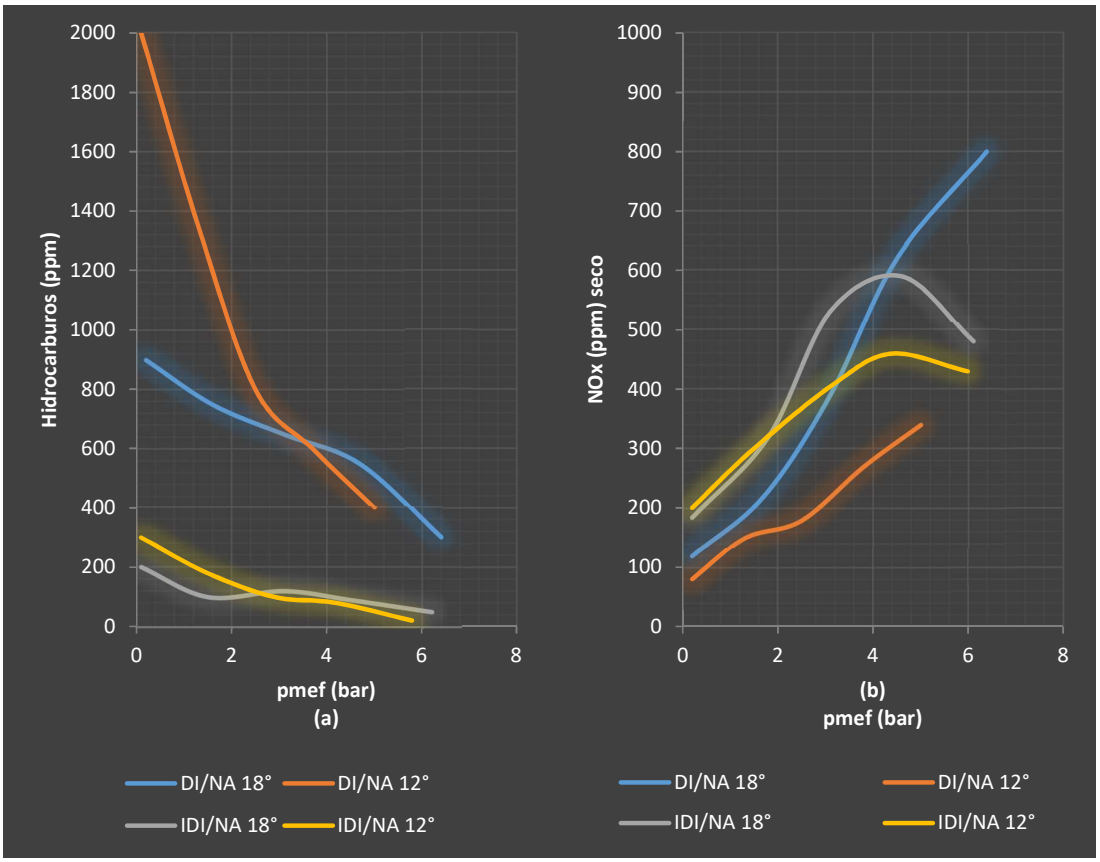

Fig. 2.22 Comparación, de emisiones de Hidrocarburos y NOx, de dos motores atmosféricos con inyección directa (DI) e indirecta (IDI), a diferentes cargas y con diferentes ángulos de adelanto en el tiempo de inyección.

Fuente: Pischinger, Cartellieri.,1972. [36]
Elaborado por: Ricardo Román

La figura 2.22-a muestra que las emisiones de hidrocarburos son peores para los motores de inyección directa que para los de inyección indirecta, especialmente en altas cargas, cuando hay una demora significativa de ignición en los motores de inyección directa. Adelantar el tiempo de inyección reduce las emisiones de HC,

pero esto conlleva al aumento de NOx (figura 2.22-b) y de ruido. Las emisiones de HC aumentan a media carga, como consecuencia de un tiempo de demora mayor que implica que la cantidad de mezcla; en el perímetro de la zona de reacción, que es muy pobre para combustionarse; crezca. Finalmente, si un motor diésel funciona con exceso de inyección de combustible, existirá una significativa cantidad de hidrocarburos y de humo.

El último tipo de emisiones es el material particulado, este es cualquier sustancia, además del agua, que puede ser recuperada a través de la filtración de los gases de escape diluidos, a 325 K. Este material se genera, en las zonas ricas en combustible, dentro del cilindro durante la combustión. La densidad máxima de las emisiones de partículas ocurre cuando el motor está bajo carga con MTA. En esta condición se inyecta la máxima cantidad de combustible para entregar la máxima potencia, lo que resulta en una mezcla rica y baja economía de combustible. Este efecto se puede apreciar en el humo oscuro que emite un bus urbano o un camión cuando sube una pendiente difícil. Debido a que estas partículas son hollín o hidrocarburos condensados, cualquier estrategia, para reducir el humo o las emisiones de hidrocarburos, servirá para reducir el material particulado.

De necesitarse medidas adicionales, el material particulado puede oxidarse en un catalizador incorporado en el múltiple de escape. No obstante, para que un catalizador se desempeñe satisfactoriamente debe operar por sobre su temperatura de trabajo. En vista de que los motores diésel emiten gases de escape a una temperatura relativamente baja, los catalizadores no necesariamente alcanzan esta temperatura. Lo que ha promovido el desarrollo de trampas de partículas regenerativas calentadas eléctricamente. Estas trampas de partículas se diferencian de los catalizadores de los MEP, debido a que el proceso de regeneración no tiene lugar mientras los gases de escape atraviesan la trampa. O bien el flujo de gases se divide o la regeneración ocurre con el motor apagado. Aire es conducido a la trampa, y el calor de fuente eléctrica es usado para alcanzar una temperatura suficientemente alta, a la cual el material particulado se oxide.

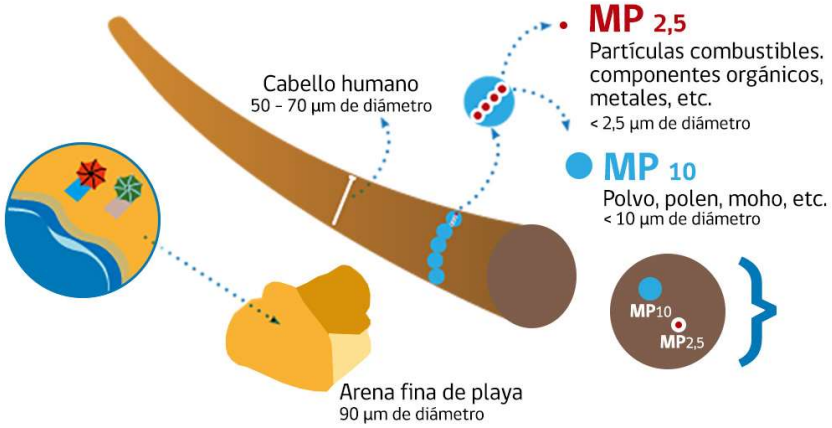

Fig. 2.23 Tamaños relativos de material particulado 10 (PM 10)y 2.5 (PM 2.5)
Fuente: Blender, M. (2019) [37]
Elaborado por: Blender, M. (2019)

Debe recordarse que los catalizadores que pueden acoplarse a los motores diésel son catalizadores de oxidación, que no reducen las emisiones de NOx. Sin embargo, antes de considerar tales catalizadores, es necesario reducir los niveles de azufre en el diésel hasta por lo menos un 0.05% en masa. Esto se debe a que un catalizador de oxidación implicaría la formación de anhídrido sulfúrico y posteriormente ácido sulfúrico. Otra ventaja de usar catalizador, es que aporta en la reducción del olor de los gases de escape.

Se ha manifestado preocupación de que los gases de escape de los MEC puedan contener cancerígenos. Monaghan (1990) [65] señaló que los MEC son probablemente seguros en este sentido, pero que los gases contienen efectivamente sustancias mutagénicas. Una técnica para identificar sustancias mutagénicas es presentada por Seizinger et al. (1985) [66], estos son normalmente hidrocarburos aromáticos polinucleares (PNAH por sus siglas en inglés), también conocidos como compuestos aromáticos policíclicos (PAC por sus siglas en inglés).

Ha habido mucho debate sobre si los PAC provienen del combustible o del aceite que no se combustiona, o si los PAC se pueden formar durante la combustión. El trabajo de Trier et al. (1990) [67] ha usado hidrocarburos radio-identificados (usando carbono-14) para rastrear varias fracciones orgánicas en el combustible después de la combustión. Trier et al. Concluyeron que los PAC pueden formarse durante la combustión.

Las emisiones de los motores sobrealimentados y las de aquellos con bajas pérdidas de calor son, en general, menores que las de los atmosféricos; la excepción son los óxidos de nitrógeno. Las altas temperaturas (y también presiones en los motores sobrealimentados) implican un tiempo de demora de ignición más corto, y en consecuencia a una reducción en el ruido de combustión y en las emisiones de hidrocarburos. Las altas temperaturas durante la carrera de expansión favorecen las reacciones de oxidación, y tanto las emisiones de humo como de material particulado decrecen. Las emisiones de óxidos de nitrógeno aumentan como consecuencia directa de las altas temperaturas de combustión. No obstante, cuando un motor turbocargado tiene acoplado un inter-enfriador, todas las temperaturas se reducen, haciendo que las emisiones de NOx caigan.

Capítulo 3
METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Descripción del estudio

El estudio se centrará en la recolección de datos históricos de investigaciones previas, centros de revisión vehicular, el CCICEV (Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares) que forma parte de la Escuela Politécnica Nacional, y las normativas legales de emisiones contaminantes para automotores.

3.2. Recolección de datos

3.2.1. Investigación Documental

3.2.1.1. Obtención de Datos históricos del CCICEV

El CCICEV es un centro creado en 2002 con la finalidad de tecnificar los procesos de evaluación de emisiones vehiculares. Sus casi dos décadas de funcionamiento lo han ubicado como un ente reconocido a nivel nacional en su área de investigación. En la actualidad se dedica, entre otras actividades, a la evaluación de vehículos nacionales, importados, investigación sobre emisiones vehiculares, y revisiones técnicas vehiculares. [39]

En vista de la cantidad de información almacenada en este centro y a las limitaciones de acceso de vehículos diésel para su estudio. Se opta por recabar datos sobre ensayos anteriores, a vehículos diésel, desarrollado en el CCICEV. En los anexos se presentan los datos obtenidos de este centro de investigación.

3.2.1.1.1. Equipos Utilizados en las pruebas

3.2.1.1.1.1. Medidor de Material Particulado Fino $MP_{2.5}$

El material particulado será calculado con el equipo marca MAHA MPM 4M con el cual se desarrollarán los ensayos necesarios en los diferentes vehículos, dicho equipo realiza mediciones en tiempo real de la concentración de material particulado (Total Carbono [TC] o Carbono Elemental [EC]), los resultados de las pruebas se muestran inmediatamente después de completarlas, las mismas se ven reflejadas en forma gráfica en mg/m^3 en función del tiempo mediante una interfaz hacia un computador, En la Tabla tal y en la figura tal se detalla las especificaciones técnicas del equipo.

Tabla 3.1 Especificaciones del equipo de medición de PM.

Especificación	Unidad	Cantidad / Calidad
Modelo	-	MPM-4M
Principio de Medición	-	Dispersión de láser
Software	-	MPM View
Alimentación	V	12 DC
Dimensiones	mm	550 x 245 x 240
Potencia	W	25
Tiempo de Calentamiento	Min.	10
Rango medición	Mg/m^3	0.1-400

Fuente: MAHA. (2011) [38]
Elaboración: Ricardo Román

Fig. 3.1 Ilustración del equipo

Fuente: MAHA (2011) [38]
Elaboración: MAHA (2011)

3.2.1.1.1.2. Opacímetro

Para la medición de la opacidad de los gases de escape de los distintos vehículos se empleará el equipo MAHA MDO2. La medición se obtiene manteniendo la salida de gases de escape como una corriente de flujo parcial con libre aceleración o a bajo régimen. Una ventaja de este equipo es que la medición es continua y es posible obtener valores a cada instante del ensayo. Para la entrega de datos el equipo cuenta con dos componentes el opacímetro propiamente y un terminal de datos para la generación de datos y resultados numéricos del ensayo. El principio de funcionamiento es el nivel de oscurecimiento, dentro de una cámara cerrada, cuando los gases de escape circulan por dicho compartimento.

Tabla 3.2 Especificaciones técnicas del opacímetro utilizado en los ensayos.

Especificación		Valor	Unidad
Modelo		MDO2 LON	
Software		Eurosystem V6.07	
Dimensiones		550 x 245 x 240	mm
Alimentación		230 @ 50 Hz	V
Potencia		110	W
Principio de medición		Absorción Fotométrica	
Tiempo de calentamiento		3	Min.
Rango de medición	RPM	400-8000	Rpm
	Opacidad	0-100	%
	Coeficiente Absorción	0-9.99	m^{-1}

Fuente: Maha. (2010) [38]
Elaborado por: Ricardo Román

Fig. 3.2 Fotografía ilustrativa del equipo de medición de opacidad.

Fuente: Maha. (2010) [38]
Elaborado por: Maha. (2010)

3.2.1.1.2. Ensayos para medición de emisiones

1. Se pone en funcionamiento los equipos MPM-4M y el opacímetro MAHA MDO2 para la medición de $PM_{2.5}$ y opacidad, respectivamente.
2. Revisión de Fugas: Se inspecciona el sistema de escape de la unidad a ser ensayada, en aras de garantizar que no existan fugas durante la salida de los gases producidos durante la combustión.
3. Temperatura: El motor de combustión interna MEC de la unidad debe llegar a la temperatura óptima de trabajo. Por lo que se ha de esperar a que el motor alcance este punto.
4. Se acciona el acelerador hasta alcanzar las revoluciones de corte. Este proceso se repite en al menos tres ocasiones, con lo que se garantiza la depuración del sistema de escape.
5. Se ubican las sondas del medidor de partículas y del opacímetro en la salida del tubo de escape del vehículo.
6. Se acciona el acelerador del vehículo de forma constante hasta que se produzca el corte de la alimentación por parte de la computadora (A alrededor de 2900 rpm) y se suelta el acelerador hasta que el motor regrese a ralentí.
7. Se repite el procedimiento anterior tantas veces cuantas se desee evaluar el material particulado $PM_{2.5}$.
8. A través del software del equipo PMP-4M se obtienen los resultados y dichos resultados se representan en forma gráfica mientras que los resultados del

opacímetro se imprimen desde el control de mando del equipo MAHA MDO2. Se ha de verificar que la desviación de por lo menos tres valores no sea mayor al 10% y que los resultados no manifiesten un patrón decreciente.

9. Se apaga el motor de la unidad.

3.2.1.2. Datos de Investigaciones Previas

En 2014 Pablo Luna y Juan Francisco Mier desarrollaron el proyecto "Medición y evaluación de los niveles de opacidad generados por los vehículos con motor de combustible diésel". En esta investigación se obtuvieron datos de opacidad de 50 vehículos de la provincia de Imbabura, elegidos de forma aleatoria. Los datos obtenidos se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Especificaciones de distintos vehículos ensayados en la provincia de Imbabura.

Placa	Potencia [HP]	Cilindrada [Litros]	R.C. [ ]	Año [años]	Kilometraje [km]	Opacidad [%]
PBV-8542	99,92	3,0	18,3	2013	47.000	16,4
IBB-5714	99,92	3,0	18,3	2012	36.893	32,7
IBB-5714	76,06	2,5	18,5	2012	10.243	11,8
PBX-9575	132,00	2,0	18,5	2012	30.036	18,0
PDA-2387	99,92	3,0	18,3	2012	29.704	35,0
PIC-2389	105,00	2,5	18,0	2012	19.400	26,9
IBD-3456	105,00	2,5	18,0	2012	56.786	26,0
IHG-3456	76,06	2,5	18,5	2012	25.645	23,6
IJH-3427	105,00	2,5	18,0	2012	23.456	23,0
PTV-9130	99,92	3,0	18,3	2012	38.567	15,5
IBB-5714	105,00	2,5	18,0	2012	32.027	29,2
PBY-3398	58,91	2,5	18,5	2012	51.123	27,6
PBK-9230	99,92	3,0	18,3	2011	147.800	48,7
PBS-6625	99,92	3,0	18,3	2011	47.543	18,1
PBT-5178	58,91	2,5	18,5	2011	26.604	15,2
IBA-7826	76,06	2,5	18,5	2011	62.879	23,4
XBA-5402	76,06	2,5	18,5	2011	74.248	38,5

Fuente: Luna P., Mier J. Varios. (2014) [46]
Elaboración: Ricardo Román

Tabla 3.4 Especificaciones de distintos vehículos ensayados en la provincia de Imbabura. (Continuación)

IBP-0345	132,00	2,0	18,5	2011	56.987	27,0
PDN-3456	99,92	3,0	18,3	2011	98.765	39,3
PSJ-9876	76,06	2,5	18,5	2011	78.465	33,0
IBM-6578	76,06	2,5	18,5	2011	38.765	38,0
PSP-3426	76,06	2,5	18,5	2011	57.987	21,5
PBK-8490	126,00	2,5	16,5	2010	70.000	33,2
PBI-5708	105,00	2,5	18,0	2010	80.000	13,0
PCH-1747	76,06	2,5	18,5	2010	68.700	28,6
ITB-9282	105,00	2,5	18,0	2010	156.726	52,0
CRT-5678	105,00	2,5	18,0	2010	87.456	43,4
IFT-2365	58,91	2,5	18,5	2010	47.658	27,0
PTY-3456	132,00	2,0	18,5	2010	78.657	38,3
PHT-2345	76,06	2,5	18,5	2010	56.783	29,0
PDV-8712	105,00	2,5	18,0	2010	89.563	26,4
PBF-4452	58,91	2,5	18,5	2010	111.012	42,5
PBK-5750	70,84	2,8	17,2	2009	47.000	29,3
PBK-8312	105,00	2,5	18,0	2009	35.408	21,0
PBL-1935	124,53	2,5	17,5	2009	85.705	35,0
PBD-5814	124,53	2,5	17,5	2009	70.000	29,1
PSN-2838	105,00	2,5	18,0	2009	110.000	33,7
PFV-9876	99,92	3,0	18,3	2009	67.598	34,9
PBC-6418	140,19	3,0	15,0	2008	63.341	28,3
TBA-1162	84,26	3,7	18,0	2008	155.000	48,4
PDB-3164	125,00	2,5	17,6	2008	105.000	38,1
PND-2398	105,00	2,5	18,0	2008	124.088	43,2
CHT-2356	105,00	2,5	18,0	2008	98.768	46,0
IPY-2398	76,06	2,5	18,5	2008	123.657	54,0
ICM-016	76,06	2,5	18,5	2007	93.697	44,1
RCB-825	99,92	3,0	18,3	2007	211.011	59,3
ICN-006	99,92	3,0	18,3	2007	169.000	42,0
PTV-0626	82,50	2,0	17,7	2006	92.000	28,5
IND-0876	76,06	2,5	18,5	2006	160.135	35,0
CBJ-0339	94,70	2,5	15,0	2005	196.530	40,2

Fuente: Luna P., Mier J. Varios. (2014) [46]
Elaboración: Ricardo Román

3.2.1.3. Legislación para emisiones contaminantes y entorno internacional

La preocupación por la calidad del aire es una cuestión a la que se le ha dado importancia desde hace varias décadas. Europa, Estados Unidos y Japón son pioneros en el desarrollo de marcos legislativos que establezcan valores máximos para las emisiones contaminantes. Con este antecedente la investigación obtendrá datos sobre legislación extranjera para comparar la estrictez y la evolución de dichas normativas con las de nuestra ciudad.

Por su amplia replica alrededor del mundo se prestará especial atención a las normas desarrolladas por la Unión Europea. En vista que países vecinos y con parques automotores similares al del Ecuador, como Colombia y Perú, han optado por observar las normas Euro para establecer límites en sus países.

Capítulo 4

ANÁLISIS Y PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS

4.1. Relación entre las emisiones y las características de los vehículos

Los resultados obtenidos de las fuentes bibliográficas están resumidos en las figuras que se mostrarán a continuación.

4.1.1. Potencia del vehículo

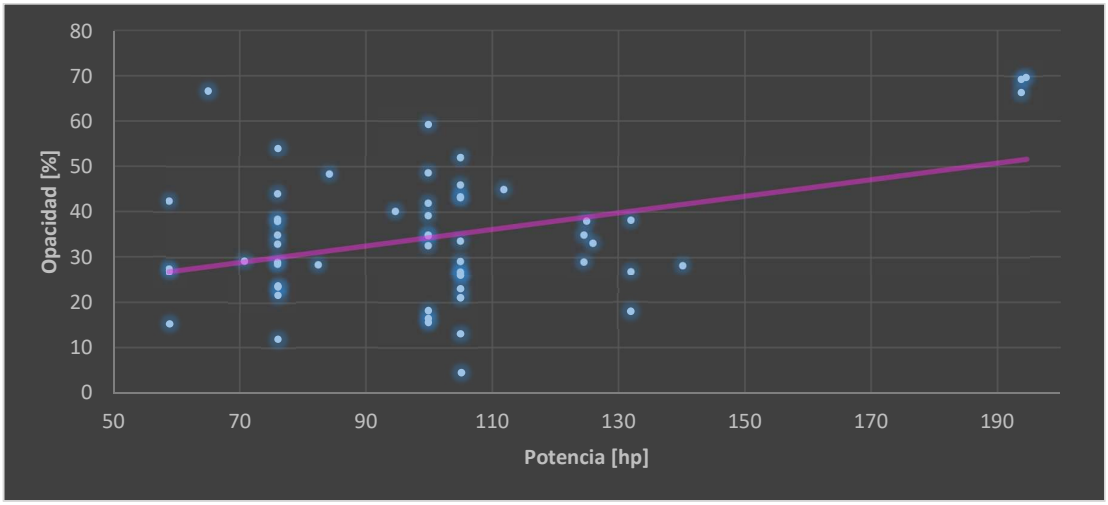

Fig. 4.1 Relación entre la Potencia y la opacidad del vehículo
Fuente: Luna P., Mier J. (2014) [46]
Elaboración: Ricardo Román

4.1.2. Años de uso del vehículo

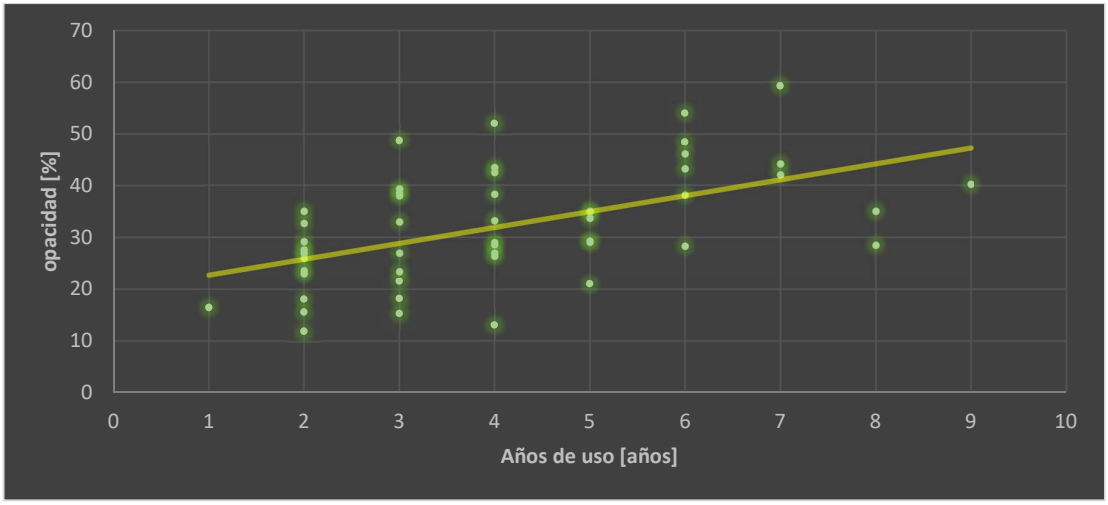

Fig. 4.2 Relación entre los años de uso del vehículo y la opacidad.
Fuente: Luna P., Mier J. (2014) [46]
Elaboración: Ricardo Román

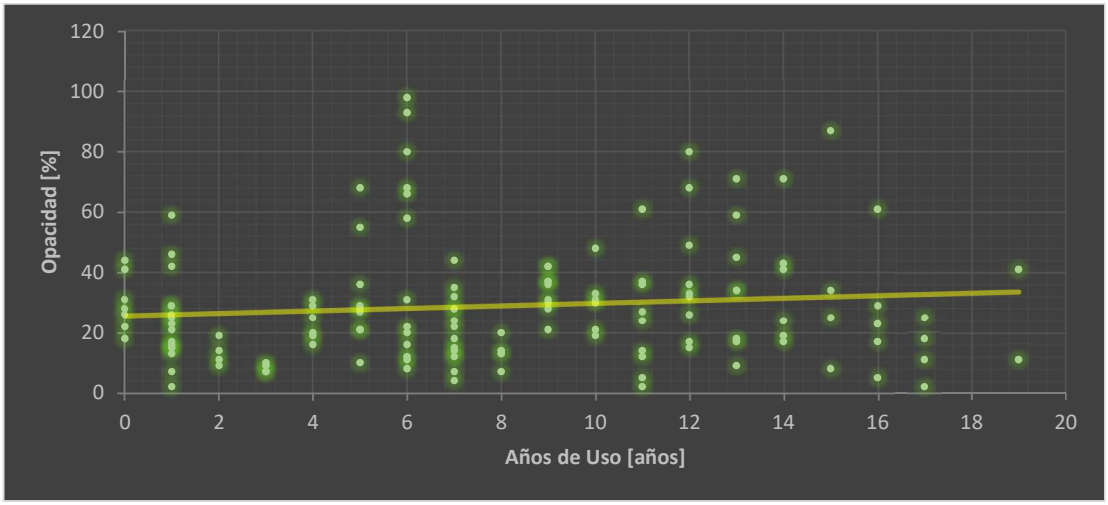

Fig. 4.3 Relación entre los años de uso del vehículo y la opacidad. Datos CCICEV
Fuente: CCICEV (2020) [47]
Elaboración: Ricardo Román

4.1.3. Relación de compresión del vehículo

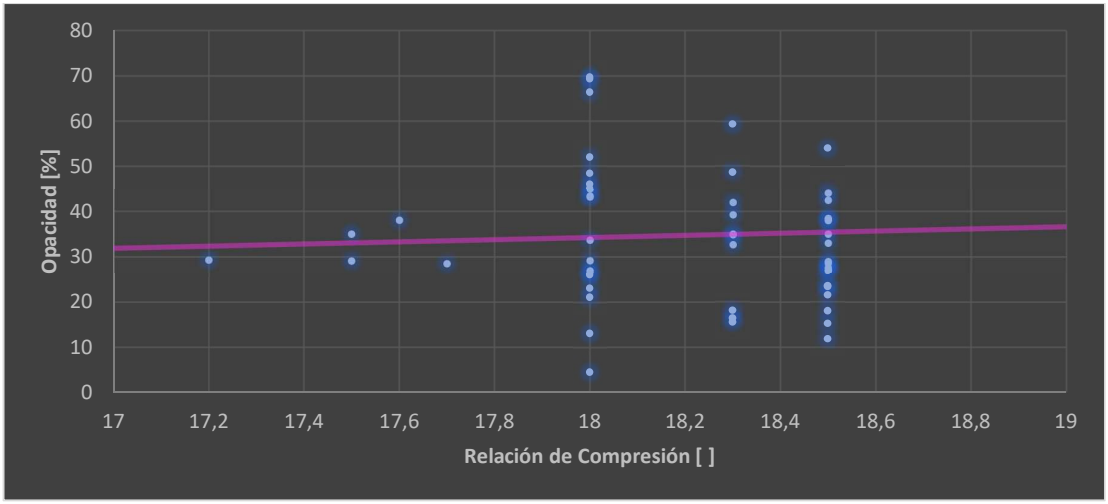

Fig. 4.4 Relación entre la relación de compresión del vehículo y la opacidad
Fuente: Luna P., Mier J. (2014) [46]
Elaboración: Ricardo Román

4.1.4. Kilometraje del vehículo

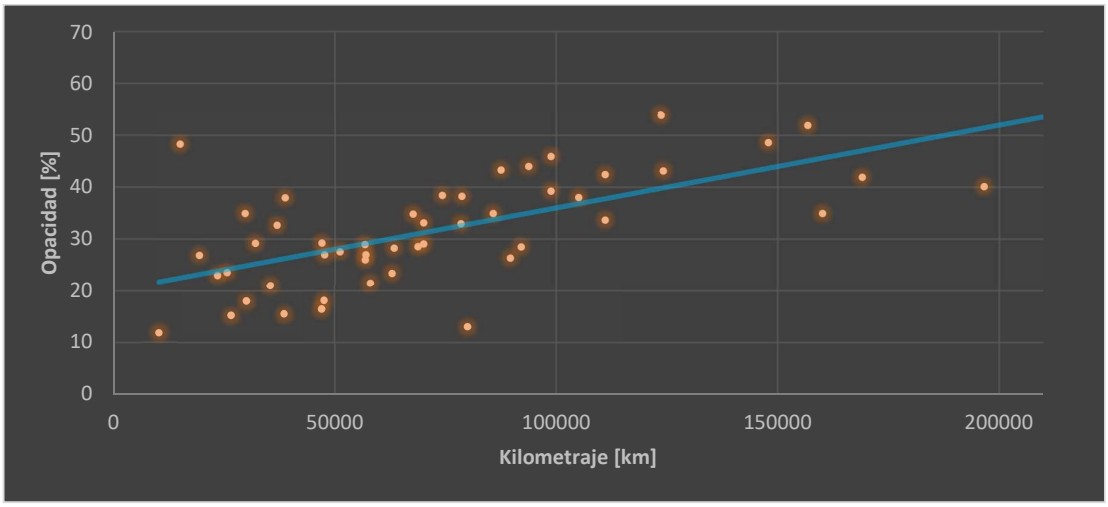

Fig. 4.5 Relación entre el kilometraje y la opacidad.
Fuente: Luna P., Mier J. (2014) [46]
Elaboración: Ricardo Román

4.1.5. Cilindrada del vehículo

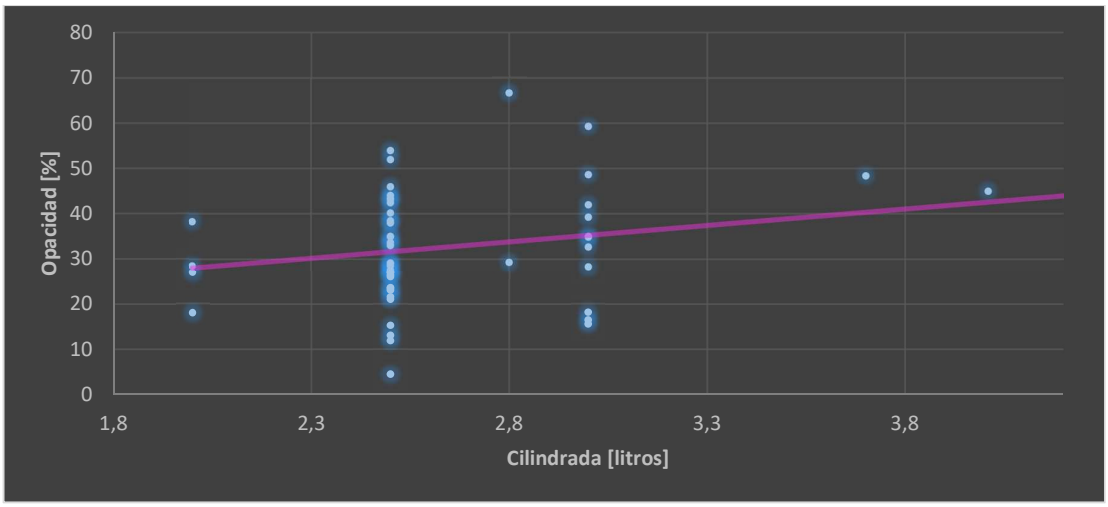

Fig. 4.6 Relación entre la cilindrada y la opacidad.
Fuente: Luna P., Mier J. (2014) [46]
Elaboración: Ricardo Román

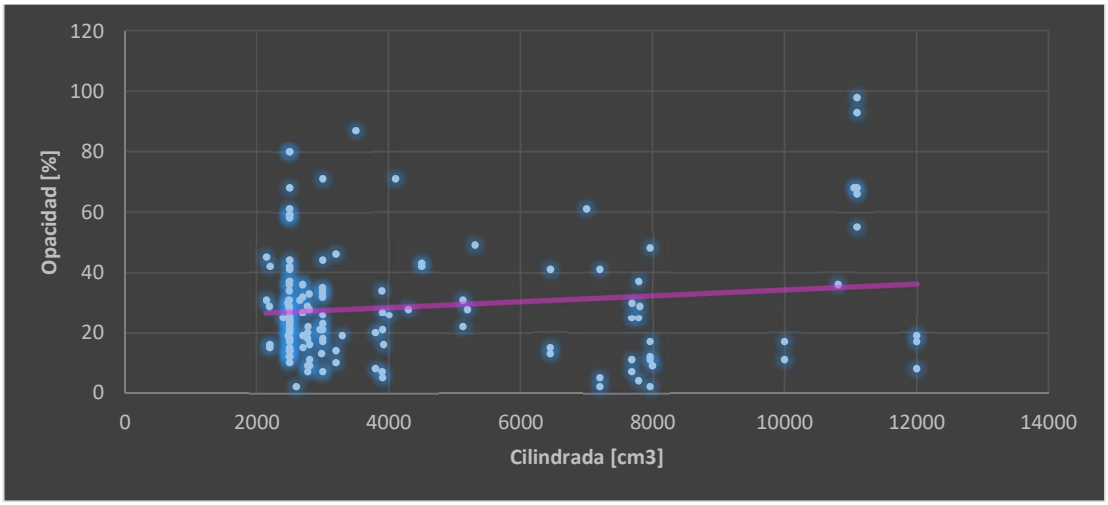

Fig. 4.7 Relación entre la cilindrada y la opacidad. Datos CCICEV.
Fuente: CCICEV (2020) [47]
Elaboración: Ricardo Román

En las figuras 4.1 a 4.4 se relaciona la potencia, los años de uso del vehículo y la relación de compresión con la opacidad. Se aprecia que la relación entre los 3 factores y la opacidad es baja. El coeficiente de determinación obtenido para estas relaciones no supera el 30%. Consecuentemente no se puede definir una relación de causalidad clara entre estos factores y la opacidad. Existe tan poca correspondencia que en el caso de la relación año – opacidad hay vehículos cuyos

modelos tiene una diferencia de 19 años y, sin embargo, los valores de opacidad son iguales.

En los gráficos 4.5 a 4.7 que establecen la conexión entre el kilometraje y la cilindrada del vehículo con la opacidad se puede notar una mejor correspondencia. Llegando casi al 40% de coeficiente de determinación para el kilometraje. A pesar de que la correlación entre cilindrada y kilometraje con la opacidad aparece como mayor no llega al punto de definir estos factores (kilometraje y cilindrada) como determinantes para los valores de opacidad.

En el caso de la cilindrada se aprecia que valores tan disímiles como 2500 cm^3, 7000 cm^3 y 11000 cm^3 presentan el mismo valor de opacidad. A pesar de que cuanto mayor sea la cilindrada de un automotor, para un mismo valor de rpm, la cantidad de emisiones contaminantes será también mayor. En general, grosso modo, las emisiones del vehículo con cilindraje de 11 000 cm^3 puede llegar a generar 4.4 veces más emisiones contaminantes que el de 2500 cm^3. A pesar de esto mientras ambos mantengan sus valores de opacidad menores a 50 o 60% (dependiendo de su modelo) ambos serían aprobados.

4.1.6. Distribución de vehículos por modelo

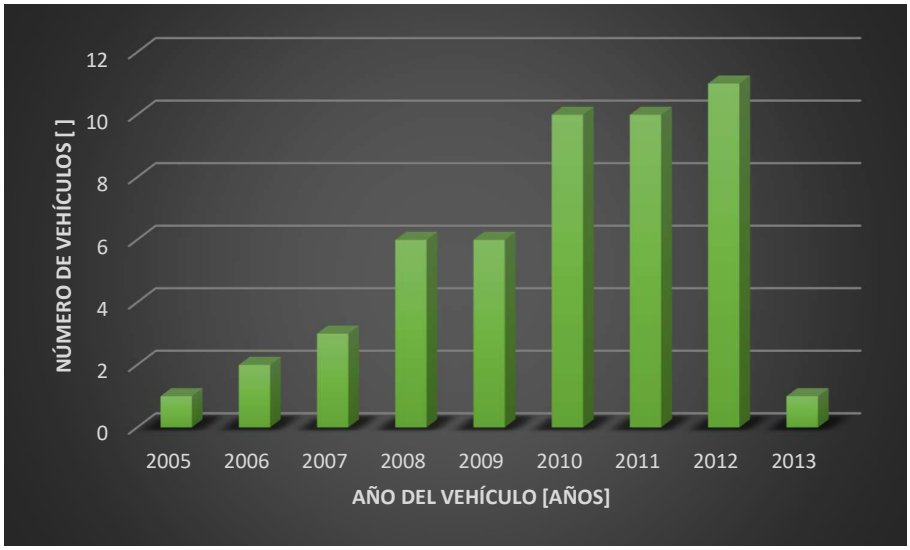

Fig. 4.8 Distribución de vehículos por modelos

Fuente: Luna P., Mier J. (2014) [46]
Elaboración: Ricardo Román

La figura 4.7 que a partir del año 2009 el porcentaje de vehículos evaluados es del 76% lo que coincide con los datos teóricos que indican que el parque automotor del país no sobrepasa los 20 años, con una edad promedio de 16 años y más del 60% de vehículos con menos de 11 años de vida.

Fig. 4.9 Distribución de vehículos por modelos
Fuente: CCICEV (2020) [47]
Elaboración: Ricardo Román

La figura 4.8 de igual forma indica que en el último año (2019) el 72% de vehículos que acudieron, por problemas en sus emisiones contaminantes, al CCICEV tenían una antigüedad menor o igual a 11 años. Teniendo en cuenta la aleatoriedad de en la selección de los vehículos de la tabla 3.3 y en los analizados por el CCICEV. Se aprecia que el parque automotor analizado tiene en promedio una edad de 7 años.

4.2. Nivel de confianza de la generalización de las conclusiones

De acuerdo a los datos de la AEADE en el país circulan 317 370 vehículos pesados, además el 34% del parque automotor se encuentra en Pichincha. A partir de estos es posible considerar que en la ciudad de Quito circulan alrededor de 108 000 vehículos diésel. Teniendo en cuenta esta cantidad y el número de vehículos del que se obtuvieron datos es posible determinar un nivel de confianza para las generalizaciones que se hagan a partir de este estudio.

Despejando el nivel de confianza a partir de la ecuación 4.1 es posible conocer cuan fidedigna será la generalización de los resultados analizados en este capítulo:

$$n = \frac{\sigma^2 Npq}{e^2(N-1) + \sigma^2 pq}$$

Donde:

$\sigma = nivel\ de\ confianza$
$N = Universo\ o\ población$
$p = probabilidad\ a\ favor$
$q = probabilidad\ en\ contra$
$e = error\ de\ estimación$
$n = tamaño\ de\ la\ muestra$

Una vez despejado el nivel de confianza a partir de la expresión anterior se obtiene la ecuación 4.2

$$\sigma = \sqrt{\frac{ne^2(N-1)}{pq(N-n)}}$$

Utilizando como datos N = 108 000, n = 189 (total de datos obtenidos), p = 70%, q = 30%, e = 6%. El valor de la variable sigma que representa nivel de confianza es de 1.73. Este valor indica que los resultados obtenidos son ciertos para alrededor de un 91% de la población de vehículos en el DMQ.

Se debe recordar que la relación entre “el 90% de los casos” (nivel de confianza) y el valor “1.645” (también llamado Z-score) es una propiedad de la distribución Normal. Es posible fijar otros niveles de confianza [62]. Habitualmente se usan niveles de confianza (NC) diversos, a los que corresponden distintos Z-scores como se indica en la tabla 4.1.

Tabla 4.1 Relación entre el nivel de confianza y el Z-score

Nivel de Confianza (NC)	Z-score
80%	1.282
90%	1.645
95%	1.96
99%	2.576

Fuente: https://www.netquest.com/ [62]

Elaborado por: Ricardo Román

4.3. Normativa legal de emisiones y entorno internacional

4.3.1. Evolución de la Normativa Legal Estadounidense

Las normas legales estadounidenses están definidas por las normas establecidas por la EPA (Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos). Esta agencia se encarga de proteger la salud humana y el medio ambiente. Desde 1955 ha desarrollado normas para procurar la buena calidad del aire. [58] En las figuras 4.10 y 4.11 se aprecia la reducción para los límites máximos de NOx y PM a lo largo de los años.

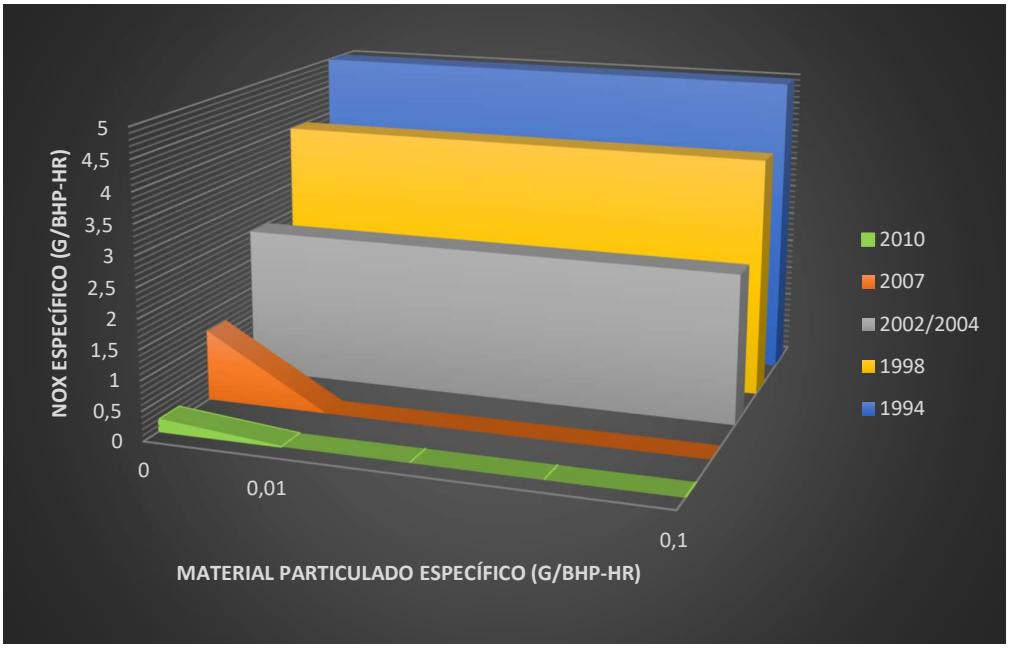

Fig. 4.10 Reducción de NOx y PM anual en las normas Estadounidenses

Fuente: https://h2blu.ca [40]
Elaborado por: Ricardo Román

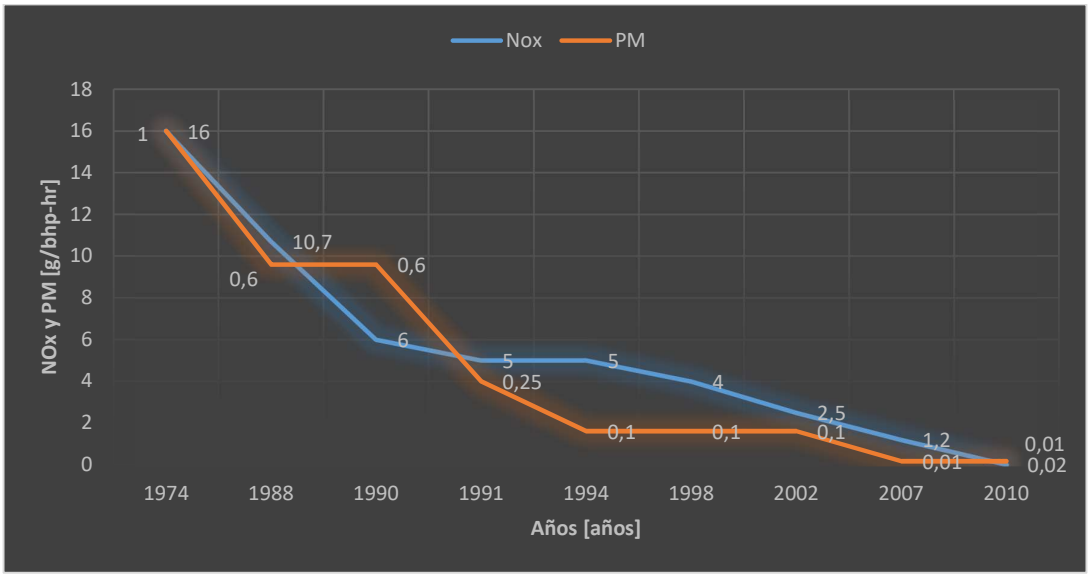

Fig. 4.11 Reducción de NOx y PM en las normativas a lo largo de los años
Fuente: https://h2blu.ca/ [40]
Elaborado por: Ricardo Román

4.3.2. Evolución de la Normativa Legal Europea

La normativa europea para definir los límites máximos para las emisiones contaminantes para vehículos diésel determina varias categorías. Para el presente estudio se definirán las más relevantes en la tabla 4.1 que se muestra a continuación.

Tabla 4.2 Categorías de vehículos a diésel definidas en las normas Euro

Categoría	Descripción del vehículo
M1	Vehículos diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros y que comprendan no más de ocho asientos además del asiento del conductor, y que tengan una masa máxima ("masa máxima en carga técnicamente admisible") que no exceda de 3,5 toneladas.
M2	Vehículos diseñados y fabricados para el transporte de pasajeros, que comprendan más de ocho asientos además del asiento del conductor y que tengan una masa máxima ("masa máxima en carga técnicamente admisible") que no exceda de 5 toneladas.

Fuente: https://www.transportpolicy.net/ [42]
Elaboración: Ricardo Román

Tabla 4.3 Categorías de vehículos a diésel definidas en las normas Euro (Continuación)

N1	Vehículos para el transporte de mercancías cuya masa máxima no exceda de 3,5 toneladas. Existen 3 subclases en función del peso de referencia (PR). N1-I: PR ≤ 1250 kg (Euro 1 y 2). N1-II: 1250 < PR ≤ 1700 kg (Euro 1 y 2). N1-III: 1700 kg < PR (Euro 1 y 2). N1-I: PR ≤ 1305 kg (Euro 3 en adelante). N1-II: 1305 < PR ≤ 1760 kg (Euro 3 en adelante). N1-III: 1760 kg < PR (Euro 3 en adelante).

Fuente: https://www.transportpolicy.net/ [42]
Elaboración: Ricardo Román

Tabla 4.4 Límites de emisiones para Automotores de las categorías M1, M2 y N1-I

Norma	Fecha	CO	HC + NOX	NOx	PM	PN
		g/km				(#/km)
Euro 1	1994.10	2.72	0.97	-	0.14	-
Euro 2 IDI	1998.01	1.00	0.70	-	0.08	-
Euro 2 DI	1998.01	1.00	0.90	-	0.10	-
Euro 3	2000.01	0.64	0.56	0.50	0.05	-
Euro 4	2005.01	0.50	0.30	0.25	0.025	-
Euro 5a	2009.09	0.50	0.23	0.18	0.005	-
Euro 5b	2011.09	0.50	0.23	0.18	0.005	6.0×10^{11}
Euro 6	2014.09	0.50	0.17	0.08	0.005	6.0×10^{11}

Fuente: https://www.transportpolicy.net/ [42]
Elaboración: Ricardo Román

Tabla 4.5 Límites de emisiones para automotores de la categoría N1-II

Norma	Fecha	CO	HC + NOX	NOx	PM	PN
		g/km				(#/km)
Euro 1	1994.10	5.17	1.40	-	0.19	-
Euro 2 IDI	1998.01	1.25	1.00	-	0.12	-
Euro 2 DI	1998.01	1.25	1.30	-	0.14	-
Euro 3	2000.01	0.80	0.72	0.65	0.07	-
Euro 4	2006.01	0.63	0.39	0.33	0.04	-
Euro 5a	2010.09	0.63	0.295	0.235	0.005	-
Euro 5b	2011.09	0.63	0.295	0.235	0.005	6.0×10^{11}
Euro 6	2015.09	0.63	0.195	0.0105	0.005	6.0×10^{11}

Fuente: https://www.transportpolicy.net/ [42]
Elaboración: Ricardo Román

Tabla 4.6 Límites de emisiones para automotores de la categoría N1-III

Norma	Fecha	CO	HC + NOX	NOx	PM	PN
		g/km				(#/km)
Euro 1	1994.10	6.90	1.70	-	0.25	-
Euro 2 IDI	1998.01	1.50	1.20	-	0.17	-
Euro 2 DI	1998.01	1.50	1.60	-	0.20	-
Euro 3	2000.01	0.95	0.86	0.78	0.10	-
Euro 4	2006.01	0.74	0.46	0.39	0.06	-
Euro 5a	2010.09	0.74	0.35	0.28	0.005	-
Euro 5b	2011.09	0.74	0.35	0.28	0.005	6.0×10^{11}
Euro 6	2015.09	0.74	0.215	0.125	0.005	6.0×10^{11}

Fuente: https://www.transportpolicy.net/ [42]
Elaboración: Ricardo Román

Las tablas 4.1 a 4.3 revelan que en las últimas actualizaciones de las normas europeas no sólo se ha regulado el PM por gramos por kilómetro, sino que se ha incluido el conteo de la cantidad de partículas por kilómetro.

4.3.3. Normativa Legal en el DMQ

De acuerdo a la norma NTE INEN 2 207 los límites máximos para los automotores de ciclo diésel a partir del año modelo 2002 se establecieron conforme indica la tabla 4.4

Tabla 4.7 Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor de diesel (prueba dinámica) a partir del año modelo 2000 (ciclos europeos)

Categoría	Peso bruto del vehículo	Peso de Referencia	CO	HC + NOx	Partículas	Ciclos de Prueba
-	[kg]	[kg]	[g/km]			-
M1(1)	≤3500	Todos	2.72	0.97	0.14	ECE-15 + EUDC
M1(2), N1		≤1250	2.72	0.97	0.14	
		>1250≤1700	5.17	1.4	0.19	
		>1700	6.9	1.7	0.25	

Fuente: NTE INEN 2 207:2002 [43]
Elaboración: Ricardo Román

La tabla 4.5 menciona ciclos de prueba, estos son definidos en la misma norma INEN y son tomados a partir de la norma euro. Pues el ciclo ECE-15 + EUDC es el ciclo de prueba dinámico establecido por la Unión Europea para los vehículos livianos y medianos, de gasolina o diésel, definidos en la directiva 93/59/EEC. [43]

Comparando la tabla 4.4 con las tablas 4.1 a 4.3 se identifica que los valores máximos para emisiones aplicables a vehículos diésel en el Ecuador son los mismos definidos por las normas Euro I, normas que fueron aprobadas en 1992. Y contrariamente a la disminución de la laxitud de las normas Euro con el pasar de los años, en el caso ecuatoriano los límites se han mantenido intactos desde hace 18 años. Este rezago de la normativa ecuatoriana ubica al país a 28 años de los países con legislaciones más estrictas.

Al mismo tiempo la revisión técnica vehicular que se desarrolla actualmente en el DMQ se centra en determinar el nivel de opacidad de los gases de escape, más no en controlar los valores de contaminantes como CO, HC, NOx o PM a pesar de que existir valores máximos estipulados en la norma INEN. Para el control de estos valores, en la actualidad, se tiene en cuenta únicamente las fichas técnicas y documentos que certifiquen dichos valores.

Estas prácticas sitúan al Ecuador, no sólo detrás de los estándares Euro II o Euro III, sino incluso detrás de los estándares del propio estándar Euro I.

4.3.4. Entorno Internacional

Como se corroboró previamente el país ha congelado sus normativas en cuanto a emisiones. Desde el año 2000 cuando se empezó a discutir la adopción de las normas estadounidense y europea no han existido actualizaciones importantes. La calidad del diésel ecuatoriano ha mejorado con el paso del tiempo, y en la actualidad se comercializa diésel con una cantidad promedio de 227 ppm de azufre. (Diario El Comercio, 2018) [50]. En 2018 el ministro de hidrocarburos, Carlos Pérez García, indicó que la norma INEN que rige en Ecuador está fuera de lo que requiere el mercado (permitiendo 500 ppm y buses de tecnología Euro 2) [50].

En relación con los países del G20 es claro el retraso del marco legislativo en Ecuador, como se evidencia en la figura 4.12, teniendo en cuenta que un 56% de estas economías ha alcanzado legislaciones para emisiones equivalentes a Euro VI. El tamaño de las economías y la incipiente industrialización ecuatoriana puede justificar esta situación. Sin embargo, al comparar el caso ecuatoriano con países latinoamericanos el panorama no es alentador.

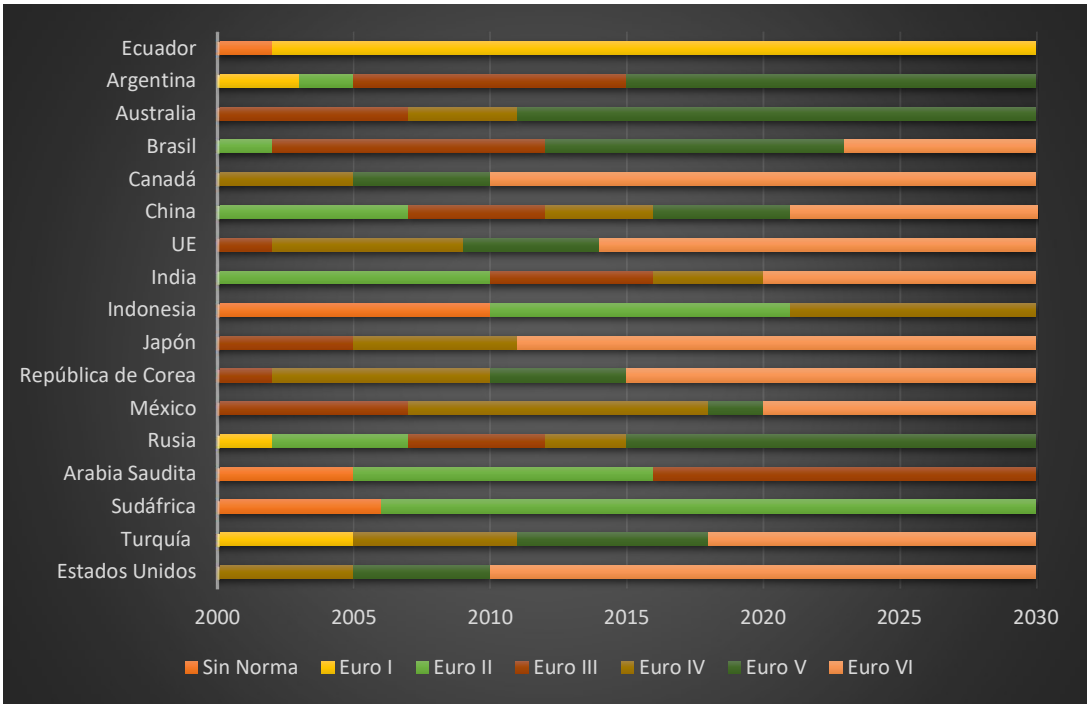

Fig. 4.12 Evolución de las normas aplicadas en varios países y proyecciones hasta 2030
Fuente: Miller, J. Braun, C. (2020) [51]
Elaboración: Ricardo Román

La figura 4.13 muestra la evolución de las normativas para emisiones en distintos países de Sudamérica. Nuevamente Ecuador muestra un atraso de 28 años en su legislación, pues desde el año 2002 cuando se aprobó la norma INEN NTE 2 207:2002 no ha habido cambio alguno para los límites de emisiones contaminantes.

En forma concisa los países latinoamericanos en promedio han vuelto más estrictas sus normativas ambientales cada 6 años y medio. En contraste Ecuador ha mantenido la misma normativa durante 20 años. Países vecinos como Colombia o Perú ya han migrado hacia la normativa Euro IV en contraposición a Ecuador que se mantiene a la cola de Sudamérica junto con Venezuela, un país que ha venido soportando una crisis económica desde hace casi dos décadas con una inflación interanual de más del 2600% en 2018.

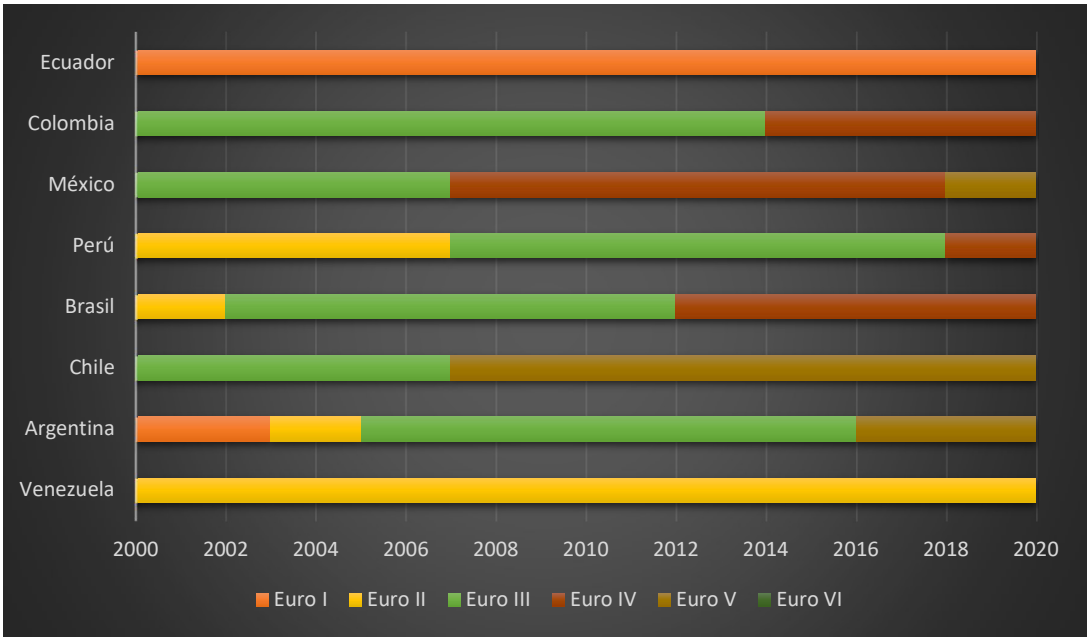

Fig. 4.13 Evolución de las normas de emisiones en Latinoamérica
Fuente: ssecoconsulting.com/ [49]
Elaboración: Ricardo Román

4.4. Relación entre la opacidad y PM

La opacidad de los gases de escape generalmente no se correlaciona bien con otras medidas de PM. Muchas correlaciones, entre la opacidad o lecturas del humo de escape y la masa de PM, que se han desarrollado proveen únicamente resultados aproximados. En vista de que las lecturas de opacidad pueden verse afectadas por la presencia de sulfatos, hidrocarburos, vapor de agua, así como por la composición del PM o sus condiciones físicas (coagulación) no es posible una relación fidedigna. (Majewski, 2013) [29]

4.5. Tecnologías de reducción de emisiones

Conforme se han ido desarrollando nuevas normativas de emisiones a la par se han generado alternativas tecnológicas para cumplir dichas disposiciones legales. Desde la aprobación de las normas EURO por primera vez en 1992, los fabricantes han reorientado sus esfuerzos a conseguir vehículos que a la par de ofrecer una experiencia satisfactoria de conducción mantengan sus niveles de emisiones bajo

las normas de cada país. En la figura 4.14 se resumen las tecnologías implementadas en los vehículos conforme cada nueva normativa entró en vigencia.

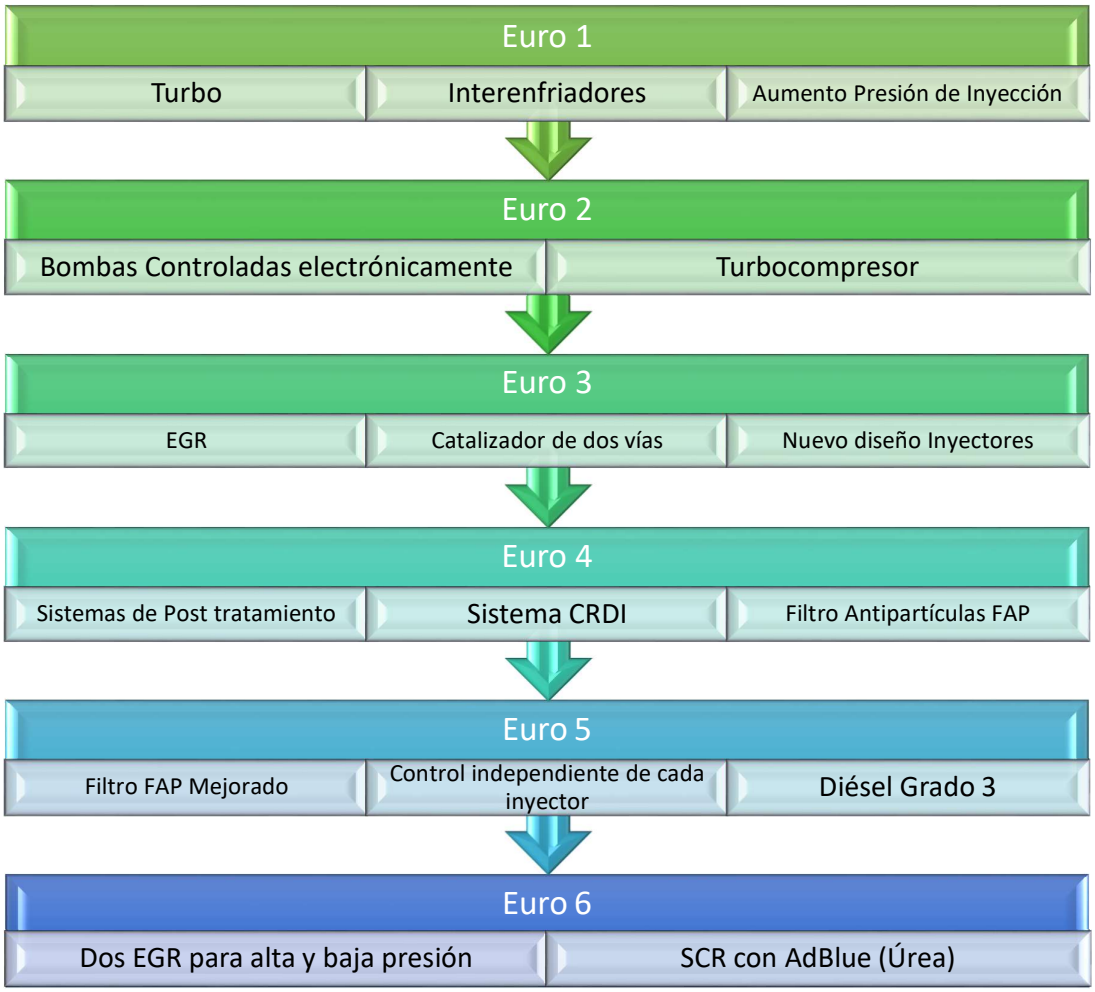

Fig. 4.14 Tecnologías de control de emisiones implementadas por norma europea.

Fuente: https://www.tecnologia-automovil.com/nuevas-tecnologias/euro-1-a-euro-6/ [44]
Elaboración: Ricardo Román

En el país actualmente ya se ofertan vehículos con tecnología que puede cumplir la normativa Euro IV e incluso Euro V (Citroen C3, Peugeot 308) [54] [55]. En el rubro de los camiones de igual forma se ofrecen vehículos con tecnología que permite cumplir el estándar Euro III [56].

Capítulo 5

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

5.1. CONCLUSIONES

- La tecnología de los vehículos diésel de venta y la calidad del diésel disponible, en la ciudad, son adecuados para implementar en la ciudad el estándar Euro III e incluso Euro IV. Existen vehículos cuya tecnología los faculta para observar incluso la norma Euro V, sin embargo, el diésel ecuatoriano impediría que cumplan dicho estándar.

- La opacidad no es una medida que se correlacione perfectamente con la contaminación de un automotor. Existen contaminantes peligrosos como el material particulado que a un mismo nivel de opacidad pueden presentar distintos valores de material PM 2.5 o PM 10.

- La opacidad de los vehículos diésel no guarda una relación estrecha con características como potencia, cilindraje, modelo o kilometraje. Consecuentemente automotores con altos valores de emisión de gases contaminantes pueden presentar iguales valores de opacidad.

- Como se analizó en el apartado 4.2. A partir del número de datos analizados (189 vehículos) el nivel de confianza es elevado. Por lo que las conclusiones obtenidas son en buena medida susceptibles de generalización para el parque automotor del DMQ. Es decir, que es justificado afirmar que las conclusiones alcanzadas son ciertas para un 91% de los vehículos que circulan en el DMQ.

- Como se aprecia en la evolución de la normativa europea el material particulado, para resultados óptimos, debe ser regulado por peso y también por número de partículas. Como consecuencia de que un mismo peso de

PM puede contener una reducida cantidad de partículas de PM 10 o una enorme cantidad de PM 2.5 (el más perjudicial para la salud humana)

- El país gasta al año cerca de 1200 millones por el rubro de subsidio al combustible diésel. El 63% de ese rubro se destina al transporte de carga. Se ha probado que un motor que cumple una norma de emisiones más estricta presenta un mejor rendimiento de consumo de combustible entre un 12 y un 42% [52] [53]. Siendo 27% la mejora de rendimiento promedio. Consecuentemente, el Ecuador podría ahorrar alrededor de 324 millones anuales en importación de diésel a través de un marco normativo menos laxo para los vehículos diésel.

5.2. RECOMENDACIONES

- Investigaciones anteriores han determinado que la opacidad no es una característica determinante para el nivel de material particulado. Sin embargo, es recomendable que se desarrollen investigaciones que determinen cuan bien se relaciona dicha característica con las cantidades de CO, NOx e Hidrocarburos emanadas por los motores diésel.

- Es conveniente que la revisión técnica vehicular en el DMQ empiece a revisar los valores de contaminantes como CO, HC, NOx y PM establecidos en la norma y no solamente el valor de opacidad.

- Siendo el PM el componente más peligroso para la salud humana, es aconsejable que el DMQ, a través de sus agencias encargadas del tema, empiece a tener éste parámetro en cuenta durante la revisión técnica vehicular.

- Es aconsejable que otras ciudades tengan en cuenta esta investigación a fin de generar marcos legales más estrictos. Esto favorecerá la reducción de afecciones respiratorias en zonas del país donde el parque automotor está creciendo como Guayaquil, Cuenca o Portoviejo.

Capítulo 6

BIBLIOGRAFÍA

[1] https://www.primicias.ec/noticias/sociedad/aire-quito-contaminacion-salud/

[2] https://www.quito.gob.ec/

[3] R. Román, Fuente Propia, Quito, 2019

[4] Código Orgánico de Organización Territorial Autonomía y Descentralización

[5] https://www.casagangotena.com/es/que-deberia-visitar-en-quito/

[6] maps.google.com

[7] https://commons.wikimedia.org/wiki/Category:Autobuses_de_Quito

[8] AEADE

[9] https://sni.gob.ec/proyecciones-y-estudios-demograficos

[10] https://www.ecuadorencifras.gob.ec/censo-de-poblacion-y-vivienda/

[11] https://www.elcomercio.com/actualidad/nube-esmog-quito-contaminacion-aire.html

[12] https://www.elcomercio.com/actualidad/ecovia-mujeres-quemadas-vapor-radiador.html

[13] http://www.amt.gob.ec/index.php/30-destacados/114-amt-en-numeros.html

[14] https://www.eltelegrafo.com.ec/noticias/quito/1/quito-circulacion-transito

[15] https://lahora.com.ec/noticia/1029217/09quito-vive-primer-dc3ada-de-pico-y-placa-que-obliga-a-cambiar-sus-hc3a1bitos

[16] http://contaminacioonquito.blogspot.com/2015/06/contaminacion-en-quito_12.html

[17] https://lahora.com.ec/quito/noticia/1102311168/el-esmog-ahuyenta-a-habitantes-de-la-necochea

[18] https://www.lahora.com.ec/noticia/393745/moradores-protestaron-por-la-contaminacic3b3n

[19] Luna Mier 2014

[20] Beltrán, J. Estudio de Emisiones de gases de un motor diésel utilizando el combustible ecuatoriano y el colombiano en un dinamómetro.

[21] Espinosa, V. Salazar, E. Correlación entre la opacidad y el material particulado PM 2.5, en vehículos diésel en la ciudad de Quito utilizando como muestra un motor de prueba.

[22] Cabrera, E. Carpio, C. Análisis de la opacidad del parque automotor diésel mediante una comparación con las redes de monitoreo de la calidad del aire en el centro histórico del cantón Cuenca"

[23] Martínez V., A. Motores de Combustión Interna.

[24] https://www.conservatucoche.com/es/motor/bomba-de-inyeccion-diesel-que-es-y-como-funciona-17.html

[25] Heywood, J. B. Internal Combustion Engine Fundamentals. New York: McGraw-Hill. 1988

[26] Stone, R. Introduction to Internal Combustion Engines. 1992. 2da Edición.

[27] https://www.conservatucoche.com/es/motor/bomba-de-inyeccion-diesel-que-es-y-como-funciona-17.html

[28] Pulkrabek, W. W. Engineering Fundamentals of the Internal Combustion Engine. 1997

[29] W. Majewski, H. Jääskeläinen, Smoke Opacity. 2013. https://dieselnet.com/tech/measure_opacity.php#pmmass

[30] https://www.eppetroecuador.ec/?p=5489

[31] Glikin P. E. (1985). Fuel Injection in Diesel Engines. Proc. I. Mech. E., Vol. 199. No. 78, pp. 1-14.

[32] https://www.slideshare.net/Protagonistsoldier/diesel-engine-power-plant-syed-anser-hussain-naqvi

[33] Howarth, M. H. 1966. The Design of high speed diésel engines.

[34] https://www.diariomotor.com/como/mantenimiento/anadir-un-poco-de-gasolina-a-diesel/

[35] Kummerj, T. "Catalysts for Automobile Emission Control" Prog. Energy Combustion Science, vol. 6, pp, 177-199,1981.

[36] Pischinger, R. Cartellieri W. Combustion System parameters and their effect upon diésel engine exhaust emissions. Paper 720756. SAE Trans., Vol. 81. 1972

[37] Blender, M. “Entender las emisiones contaminantes de aire” https://mariablender.com/entender-las-mediciones-de-contaminantes-de-aire/. 2019.

[38] MAHA, 2009. Management of Particle Emissions.

[39] http://www.ccicev.com/

[40] https://h2blu.ca/about-def/who-needs-def/

[41] https://dieselnet.com/calculator/smoke1.html

[42] https://www.transportpolicy.net/standard/eu-light-duty-emissions/

[43] Instituto Ecuatoriano de Normalización INEN. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 207:2002. Abril de 2002

[44] https://www.tecnologia-automovil.com/nuevas-tecnologias/euro-1-a-euro-6/

[45] https://www.primicias.ec/noticias/economia/ecuador-parque-automotor-mas-autos-pichincha-guayas/#:~:text=La%20edad%20promedio%20del%20parque,Automotrices%20del%20Ecuador%20(Aeade).

[46] Luna, P. Mier, J. Medición y Evaluación de los niveles de opacidad generados por los vehículos con motor de combustible diesel. Universidad Internacional del Ecuador. Quito – Ecuador. 2014.

[47] CCICEV. Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares.

[48] https://www.lahora.com.ec/noticia/1102279863/subsidio-al-diesel-cuesta-$1200-millones-anuales#:~:text=Subsidio%20al%20di%C3%A9sel%20cuesta%20%241.200,sus%20provincias%20y%20el%20mundo

[49] https://www.ssecoconsulting.com/pmrt-evalua-produccion-diesel-euro-vi.html

[50] https://www.elcomercio.com/actualidad/calidad-diesel-mejora-norma-quito.html

[51] Miller, J. Braun, J. Análisis Costo Beneficio de las normas euro VI sobre las emisiones en vehículos pesados en Argentina. The International Council on Clean Transportation. White Paper. Abril – 2020.

[52] https://www.ford.com.co/about-ford/noticias/2018/urea-clave-contaminar-menos-ganar-mas/

[53] http://www.toyocosta.com/blog/motores-euro-en-ecuador/

[54] https://www.citroen.com.ec/vehicle/citroen-c3/

[55] https://www.peugeot.com.ec/gama/selecciona-tu-vehiculo/2008.html

[56] https://www.chevrolet.com.ec/camiones

[57] Gómez, C. R. Vargas, L. M. Medición y Evaluación de las emisiones de Material Particulado y Opacidad en una flota de vehículos con motor Ciclo Diésel, utilizando una mezcla de Diésel con 20% de queroseno. (Tesis de maestría). Escuela Politécnica Nacional. Quito – Ecuador.

[58] https://espanol.epa.gov/

[59] https://www.autocasion.com/actualidad/reportajes/que-es-el-adblue-como-funciona-y-para-que-sirve

[60] http://www.prtr-es.es/NOx-oxidos-de-nitrogeno,15595,11,2007.html

[61] https://es.wikipedia.org/wiki/%C3%8Dndice_de_cetano

[62] https://www.netquest.com/blog/es/que-tamano-de-muestra-necesito

[63] http://www.quitoinforma.gob.ec/2017/11/22/quito-aprobo-normativa-para-mejorar-la-calidad-del-aire/#:~:text=Para%20veh%C3%ADculos%20nuevos%20modelo%202019,y%20comercial%20sean%20Euro%20III.

[64] Mafla, C.; Imbaquingo, R.; Melo, J.; Benavides, I.; Hernández, E.; (2018). «Cuantificación de la opacidad en motores electrónicos diésel usando diésel y biodiésel». INGENIUS. N.°19, (enero-junio). pp. 102-107.

[65] Monaghan M. L. (1990). The diesel passenger car in a Green world. SIA Diesel Congress. Lyon, Francia.

[66] Seizinger D. E., Marshall W. F., Brooks A. L. (1985). Fuel Influences on diesel particulates. SAE Paper 850546.

[67] Trier C. J., Rhead M. M., Fussey D. E. (1990). Evidence for the pyrosynthesis of parent polycyclic aromatic compounds in the combustion

chamber of a diesel engine. Paper C394/003, Automotive Power Systems – Environment and Conservation, I. Mech. E. Conf. Proc., MEP, Londres.

[68] Consejo Metropolitano del Distrito Metropolitano de Quito. Ordenanza Metropolitana N. 038. 18 de julio de 2000.

[69] https://www.elcomercio.com/actualidad/congestion-vehicular-quito-restricciones-movilidad.html

GLOSARIO DE TÉRMINOS

AdBlue: El Adblue es un sistema de depuración de gases imprescindible en los actuales motores diésel para proteger el medio ambiente elaborado mediante una disolución de urea. [59]

AMT: Agencia Metropolitana de Tránsito

CCICEV: Centro de Transferencia Tecnológica para la Capacitación e Investigación en Control de Emisiones Vehiculares

Cetanaje: Es un indicativo de la eficiencia de la reacción que se lleva a cabo en los motores diésel. Guarda relación con el tiempo que transcurre entre la inyección del carburante y el comienzo de su combustión, denominado “Intervalo de encendido”. Una combustión de calidad ocurre cuando se produce una ignición rápida seguida de un quemado total y uniforme del carburante. [61]

DI: Inyección Directa

DMQ: Distrito Metropolitano de Quito

EPA: Environment and Pollution Agency

IDI: Inyección Indirecta

INEN: Instituto Ecuatoriano de Normalización

MEC: Motor de encendido por compresión

MEP: Motor de encendido provocado

MTA: Mariposa totalmente abierta

NOx: Los óxidos de nitrógeno son un grupo de gases compuestos por óxido nítrico (NO) y dióxido de nitrógeno (NO2). El término NOX se refiere a la combinación de ambas sustancias. [60]

PAC: Policiclic Aromatic Compunds

PM: Material Particulado

PNAH: Polinuclear Aromatic Hidrocarbons