



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ

**TEMA: IDENTIFICACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE LAS
EMISIONES NO_x DE LOS MOTORES DIÉSEL EN EL AMBIENTE Y
LAS PERSONAS.**

AUTOR: BYRON RAMIRO ESPARZA NARVAEZ

DIRECTOR: ING. CARLOS NOLASCO MAFLA YÉPEZ. MSc.

IBARRA, MAYO 2019



AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	1002331922		
APELLIDOS Y NOMBRES:	Esparza Narváez Byron Ramiro		
DIRECCIÓN:	Ibarra, Guallupe 530 y Manuela Cañizares		
EMAIL:	ramyfox_04@hotmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062631512	TELÉFONO MÓVIL:	0995847046

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	IDENTIFICACIÓN DE LAS CONSECUENCIAS DE LAS EMISIONES NO _x DE LOS MOTORES DIESEL EN EL AMBIENTE Y LAS PERSONAS
AUTOR (ES):	Byron Esparza
FECHA: DD/MM/AAAA	14 de Mayo del 2019
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ
ASESOR /DIRECTOR:	Ing. Carlos Mafla Msc.

2. CONSTANCIAS

El autor (es) manifiesta (n) que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto la obra es original y que es (son) el (los) titular (es) de los derechos patrimoniales, por lo que asume (n) la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá (n) en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 14 días del mes de Mayo de 2019

EL AUTOR:

(Firma).....

Nombre: Byron Esparza



CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR

TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

Yo, **Byron Ramiro Esparza Narváez** con cédula de identidad Nro. **1002331922**, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado **Identificación de las consecuencias de las emisiones NOx de los motores Diésel en el ambiente y las personas**. Que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ** en la Universidad Técnica del Norte quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi Condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

AUTOR

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Byron', is written above a horizontal line.

Firma

Byron Ramiro Esparza Narváez

1002331922

Ibarra, a los 14 días del mes de mayo del 2019

CERTIFICADO

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

En mi calidad de director del plan de trabajo de grado, previo a la obtención del título de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, nombrado por el Honorable Concejo Directivo de la Facultad de Ingeniería en Ciencias Aplicadas.

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es “**Identificación de las consecuencias de las emisiones NOx de los motores Diésel en el ambiente y las personas**” presentado por el señor **Byron Ramiro Esparza Narváez** con número de cédula 1002331922, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometidos a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 14 días del mes de mayo del 2019.

Atentamente



Ing. Mafia Carlos MSc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO

DEDICATORIA

A mis padres Ramiro Esparza y Juana Narváez; ya que esta tesis es un tributo por todos los años de esfuerzo y amor, por ayudarme día a día a ser una persona productiva para la sociedad y cumplir cada sueño y anhelo que como familia nos hemos propuesto, a mis hermanos en especial a Tatiana que ha estado siempre en todas las etapas de mi vida, a mis abuelitos Jorge y Laurita que siento que me cuidan con su gran amor desde el cielo, a mis amigos cercanos que en su momento han sido participantes de todas mis luchas y conseguir mis sueños.

Byron Ramiro Esparza Narváez.

AGRADECIMIENTO

A Dios por cuidarme cuando más lo necesité y no desampararme cuando tuve un accidente automovilístico y con su gran poder pudo sacarme adelante y ser nuevamente una persona saludable, a mis padres que siempre han confiado en mí dándome la oportunidad de realizarme como persona y profesional y ser ellos el motivo principal que me impulsa a seguir luchando en los días más difíciles y al amor que me ha rodeado de personas especiales en mi vida que siempre estarán en mi corazón. A la Universidad Técnica del Norte por proporcionarme la mejor formación, a los docentes que tuve en toda mi carrera en esta prestigiosa institución y que gracias a sus conocimientos me han llevado por la senda del saber en especial por la ayuda recibida de mi tutor Ing. Carlos Mafla Msc.

Byron Ramiro Esparza Narváez.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

	PÁGINA
AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD	ii
CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR	iii
CERTIFICADO	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDOS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	xi
ÍNDICE DE TABLAS	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN	xiv
INTRODUCCIÓN	xvi
1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	1
1.1 OBJETIVOS.	1
1.1.1 OBJETIVO GENERAL.	1
1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.	1
1.2 JUSTIFICACIÓN.	1
1.3 ALCANCE.	1
1.4 ANTECEDENTES.	2
1.5 MOTOR DIÉSEL.	3
1.5.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIÉSEL.	3
1.5.2 CICLOS DE FUNCIONAMIENTO TEÓRICOS DEL MOTOR DIÉSEL	4
1.5.2.1 Admisión (1-2)	4
1.5.2.2 Compresión (2-3)	5
1.5.2.3 Combustión (3-4)	5
1.5.2.4 Expansión (4-5)	6
1.5.2.5 Principio de escape (5-6)	6
1.5.2.6 Expulsión de gases (6-1)	6
1.5.2.7 Diagrama teórico del motor diésel	7
1.5.3 DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DIÉSEL	7
1.5.4 CICLO REAL DEL MOTOR DIÉSEL	9

1.5.4.1 Admisión (1-2)	9
1.5.4.2 Compresión (2-3)	9
1.5.4.3 Inyección y combustión (3-4)	9
1.5.4.4 Expansión (4-5)	10
1.5.4.5 Principio de escape (5-6)	10
1.5.4.6 Expulsión de los gases (6-1)	10
1.6 COMBUSTIÓN DIÉSEL FORMACIÓN DE LA MEZCLA	10
1.6.1 FASES DE LA COMBUSTIÓN	12
1.6.1.1 Fase de retraso al encendido	12
1.6.1.2 Fase de combustión premezclada	12
1.6.1.3 Fase de combustión por difusión	13
1.6.1.4 Fase de combustión por difusión tardía	13
1.6.2 LLAMA DE DIFUSIÓN	14
1.6.2.1 Zona I (Zona inerte)	14
1.6.2.1 Zona II (Combustión premezclada rica)	15
1.6.2.2 Zona III (Combustión por difusión)	15
1.6.3 DETALLE DE LA MASA INYECTADA EN LA FASE DE COMBUSTIÓN	15
1.7 EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES	17
1.7.1 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x)	17
1.7.2 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	17
1.7.2.1 Mezcla pobre	17
1.7.2.2 Mezcla rica	18
1.8 DIÓXIDO DE CARBONO (CO ₂)	18
1.9 MATERIAL PARTICULADO	18
1.9.1 PARTÍCULAS PRIMARIAS	18
1.9.2 PARTÍCULAS SECUNDARIAS	18
1.10 HIDROCARBUROS NO QUEMADOS	19
1.11 SISTEMAS DE INYECCIÓN DIÉSEL	19
1.11.1 BOMBAS DE INYECCIÓN	19
1.11.1.1 Bomba de inyección en línea	19
1.11.1.2 Bomba de inyección rotatoria	20
1.11.1.3 Bomba de inyección rotativa de émbolo axial (VE)	20
1.11.1.4 Bomba de inyección rotativa de émbolo radial (VR)	21
1.11.2 COMMON RAIL	21
1.11.3 UNIDAD BOMBA INYECTOR UIS	21

1.11.4 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE INYECCIÓN DIÉSEL	21
1.12 NORMAS EURO	22
1.12.1 EURO I	22
1.12.2 EURO II, III, IV	23
1.12.3 EURO V	23
1.12.4 EURO VI	23
1.13 EFECTOS CONTAMINANTES SOBRE LA SALUD HUMANA Y MEDIO AMBIENTE	25
1.13.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)	25
1.13.2 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO _x)	26
1.13.3 MATERIAL PARTICULADO (MP)	26
1.13.4 IMPACTO AMBIENTAL	27
1.13.4.1 Smog Fotoquímico	27
1.13.4.2 Cambio climático	27
1.13.4.3 Ozono	27
1.14 ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES EN MOTORES DIÉSEL	28
1.14.1 RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE	28
1.14.2 DEPENDIENDO DEL LUGAR DONDE SON INTRODUCIDOS LOS GASES RECIRCULADOS	29
1.14.2.1 EGR Interno	29
1.14.2.2 EGR Externo	29
1.14.3 DEPENDIENDO DE LA PRESIÓN	29
1.14.3.1 EGR de baja presión	29
1.14.3.2 EGR de alta presión	29
1.14.4 ATENDIENDO A LA TEMPERATURA DEL GAS	30
1.14.4.1 EGR caliente	30
1.14.4.2 EGR frío	30
1.14.5 SOLUCIONES PASIVAS	30
1.14.5.1 Combustión LTC	31
1.14.5.2 Estrategia PREDIC	31
1.14.2.3 Filtros de partículas Diésel (DPF)	32
1.14.2.4 Reducción catalizadora selectiva (SCR)	32
2. MATERIALES Y MÉTODOS	34
2.1 METODOLOGÍA	34
2.2 MATERIALES Y EQUIPOS	34
2.2.1 ANALIZADOR DE GASES	34

2.2.1.1 Funcionamiento del analizador de gases	34
2.2.1.2 Características técnicas del analizador de gases Kane	35
2.2.2 LÍMITE DE EMISIONES PERMITIDAS EN EL ECUADOR	36
2.2.3 LÍMITE DE EMISIONES PERMITIDAS EN MÉXICO	36
2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE PRUEBA	36
2.2.4.1 Vehículo de pasajeros (VP)	36
2.2.4.2 Camiones ligeros (CL3)	37
2.2.5 FICHAS TÉCNICAS DE LOS VEHÍCULOS DE PRUEBA	37
2.2.6 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS MEDICIONES DE GASES NO _x	37
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	40
3.1 MEDICIÓN DE GASES NO _x , Vehículo 1	40
3.2 MEDICIÓN DE GASES NO _x , Vehículo 2	42
3.3 MEDICIÓN DE GASES NO _x , Vehículo 3	45
3.4 MEDICIÓN DE GASES NO _x , Vehículo 4	48
3.5 MEDICIÓN DE GASES NO _x , Vehículo 5	50
4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	54
4.1 CONCLUSIONES	54
4.2 RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	56
ANEXOS	60

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA NÚM.	PÁGINA
1.1 Motor Diésel	4
1.2 Admisión	4
1.3 Compresión	5
1.4 Combustión	5
1.5 Expansión	6
1.6 Expulsión de gases	6
1.7 Ciclo termodinámico Diésel	7
1.8 Ciclo real en un motor Diésel	8
1.9 Ciclo real	9
1.10 Proceso de combustión	12
1.11 Fases de combustión	13
1.12 Llama de difusión	14
1.13 Detalle de la masa inyectada en la fase de combustión	16
1.14 Bomba lineal	20
1.15 Evolución normativa EURO	24
1.16 Diferencias de los chorros de un motor Diésel (a), Predic con dos inyectores(b)	31
1.17 Filtro de partículas DPF	32
1.18 Proceso de las emisiones contaminantes en un motor Diésel	33
2.1 Analizador de gases Kane	35
2.2 Verificación del sistema de escape	38
2.4 Colocación del analizador	38
2.5 Medición de los gases NOx	39
3.1 Variación de las emisiones NOx vehículo 1	42
3.2 Variación de las emisiones NOx, vehículo 2	45
3.3 Variación de las emisiones NOx, vehículo 3	47
3.4 Variación de las emisiones NOx, vehículo 4	50
3.5 Variación de las emisiones NOx, vehículo 5	52

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA NÚM.		PÁGINA
1.1	Características de los sistemas de inyección Diésel	22
1.2	Valores de las emisiones contaminantes	25
1.3	Efectos de los óxidos de nitrógeno en la salud	26
2.1	Características técnicas del analizador de gases Kane	35
2.2	Límites máximos permitidos de emisiones contaminantes	36
2.3	Fichas técnicas de los vehículos de prueba	37
3.1	Valores obtenidos vehículo 1	40
3.2	Promedio de las pruebas realizadas vehículo 1	41
3.3	Valores obtenidos vehículo 2	43
3.4	Promedio de las pruebas realizadas vehículo 2	44
3.5	Valores obtenidos vehículo 3	45
3.6	Promedio de las pruebas realizadas vehículo 3	47
3.7	Valores obtenidos vehículo 4	48
3.8	Promedio de las pruebas realizadas vehículo 4	49
3.9	Valores obtenidos vehículo 5	50
3.10	Promedio de las pruebas realizadas vehículo 5	52
3.11	Valores máximos de NOx según su categoría	53

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO NÚM.	PÁGINA
1. Colocación de la sonda de medición.	61
2. Obtención de valores de las mediciones NOx	62
3. Colocación del analizador portátil	63
4. Obtención de datos	64
5. Valores obtenidos Camioneta Chevrolet Luv D-Max/Urcuquí	65
6. Valores obtenidos Camioneta Chevrolet Luv D-Max/Quiroga	66
7. Valores obtenidos Camioneta Chevrolet Luv D-Max/Quiroga	67
8. Valores obtenidos en el vehículo Citroën C-elysee/Ibarra	68
9. Valores obtenidos en el vehículo Citroën C-elysee/Ibarra	69

RESUMEN

La presente investigación tuvo como finalidad identificar la formación de óxido nítricos (NO_x), en la combustión de motores de encendido por compresión (MEC), además de identificar las consecuencias que provocan las emisiones NO_x de los motores Diésel al medio ambiente y la salud humana. La sustentación bibliográfica del presente proyecto fue desarrollada en función del método investigativo mediante el cual se obtuvo información relevante de textos, artículos científicos y sitios web relacionados al tema de investigación, se realizaron pruebas de análisis de gases con la finalidad de obtener valores de emisiones NO_x, utilizando el analizador de gases portátil marca Kane, mencionadas pruebas fueron realizadas en cinco vehículos con diferentes valores de kilometraje a regímenes de ralentí y 2 500 rpm bajo el método de prueba estática en diferentes localidades de la provincia de Imbabura, obteniendo como resultado valores que permitieron determinar mediante un análisis estadístico la variación de las emisiones NO_x entre los vehículos de prueba (CL3) camionetas y (VP) automóviles, como resultado de las pruebas estáticas de emisiones NO_x se pudo determinar que los vehículos de categoría (VP) registraron mayores concentraciones de NO_x en relación a los vehículos de categoría (CL3) en un 8,40% en la prueba a ralentí y en función de la prueba estática a 2 500 rpm se generó una disminución del 27% en las emisiones NO_x en los vehículos de categoría (CL3) en relación a los vehículos de categoría (VP), los valores citados anteriormente de NO_x fueron comparados con la normativa internacional mexicana NOM-167-SEMARNAT-2017 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales), para el método de prueba estático, mismas que se encuentran dentro del límite establecido para la emisiones de NO_x. Cabe mencionar que dichos valores pueden afectar a las vías respiratorias de la población si se exponen por tiempos prolongados a las emisiones NO_x.

ABSTRACT

The purpose of this research was to identify the formation of nitric oxide (NO_x) in the combustion of compression ignition engines (MEC), as well as to identify the consequences of the NO_x emissions of Diesel engines to the environment and human health. The bibliographic support of the present project was developed based on the investigative method through which relevant information was obtained from texts, scientific articles and websites related to the research topic, gas analysis tests were carried out in order to obtain NO_x emission values, using the Kane portable gas analyzer, mentioned tests were performed on five vehicles with different mileage values at idle speeds and 2,500 rpm under the static test method in different locations in the province of Imbabura, obtaining as a result values that they allowed to determine by means of a statistical analysis the variation of the NO_x emissions between the test vehicles (CL3) trucks and (VP) automobiles, as a result of the static tests of NO_x emissions it was possible to determine that the vehicles of category (VP) registered higher concentrations of NO_x in relation to category (CL3) vehicles by 8.40% in the idling test and based on the static test at 2500 rpm, a 27% decrease in NO_x emissions was generated in category (CL3) vehicles to the vehicles of category (VP), the values previously mentioned of NO_x were compared with the Mexican international norm NOM-167-SEMARNAT-2017 (Secretariat of Environment and Natural Resources), for the static test method, which are found within the limit established for NO_x emissions. It is worth mentioning that these values can affect the respiratory tract of the population if they are exposed for long times to NO_x emissions.

INTRODUCCIÓN

Los motores de combustión interna evolucionan constantemente en su tecnología, con la finalidad de mejorar sus prestaciones y como punto importante en los motores Diésel cumplir con las normas ambientales vigentes que cada vez son más restrictivas especialmente en las emisiones NOx y partículas, los sistemas empleados para reducir estas emisiones requieren de una sofisticada gestión electrónica cada vez más precisa.

En la revisión bibliográfica se hace referencia a la formación de NOx en la cámara de combustión y se describen las posibles soluciones tanto activas y pasivas para poder disminuir la cantidad de NOx generados por los motores Diésel, basados en los límites de las normativas ambientales vigentes, además de sus efectos sobre la salud humana y el medio ambiente.

Para obtener los valores de emisiones NOx se basó en protocolos establecidos para las mediciones de este tipo de gases utilizando un analizador de gases portátil marca Kane a diferentes vehículos de prueba y mediante un proceso analítico se procede al análisis y comparación de los valores obtenidos durante las mediciones, haciendo referencia a la normativa internacional mexicana de la secretaria de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT).

Como parte final se redacta las conclusiones y recomendaciones del presente trabajo, en los anexos constan los datos de las pruebas realizadas a los diferentes vehículos.

1. REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

1.1 OBJETIVOS.

1.1.1 OBJETIVO GENERAL.

Identificar las consecuencias de las emisiones NO_x de los motores diésel en el ambiente y las personas.

1.1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.

1. Investigar sobre la formación de óxidos nítricos en la combustión de motores Diésel.
2. Definir las afectaciones de los NO_x en el ambiente.
3. Determinar las consecuencias en la salud de las personas provocadas por las emisiones de NO_x.

1.2 JUSTIFICACIÓN.

Innegable y evidentemente uno de los principales problemas urbanos en los últimos tiempos, es el incremento en los niveles de contaminación que impactan al medio ambiente y la salud humana, originado en gran parte por el proceso de combustión de los motores Diésel, el aumento de la densidad poblacional y la difícil situación geográfica en las que se encuentran algunas ciudades, contribuyen al aumento de gases contaminantes, mismos que se derivan de la tecnología, combustible y operación de los automotores.

El objetivo principal de esta investigación, es estudiar el proceso de combustión de un motor de encendido por compresión y analizar los parámetros que influyen en la formación de NO_x y PPM, a razón de ello se indagará en la investigación de nuevas tecnologías para la reducción de las emisiones atmosféricas haciendo referencia a la normativa ambiental vigente, la cual garantizará la calidad del aire.

1.3 ALCANCE.

Investigar sobre la formación de óxidos nítricos en la combustión de motores Diésel.

- Se estudiará el proceso de combustión convencional en motores Diésel.
- Se investigará posibles soluciones activas y pasivas para la reducción de emisiones contaminantes.

Definir las afectaciones de los NO_x en el ambiente.

- Se analizará los efectos generados por los óxidos de nitrógeno hacia el ambiente.

- Se estudiará la norma técnica INEN 2207 (límites permitidos de emisiones contaminantes en motores Diésel).

Determinar las consecuencias en la salud de las personas provocadas por las emisiones de NOx.

- Se detallará las afecciones a la salud humana.
- Se identificará las áreas más vulnerables del cuerpo humano por la inhalación de gases NOx y PPM.

1.4 ANTECEDENTES.

La historia del motor Diésel tiene sus inicios en el año de 1897, cuando Rudolf Diésel de origen frances, crea la primera máquina térmica basada en el funcionamiento del ciclo Otto, obtenido así un motor Diésel con una potencia de 25 Caballos de vapor y con un rendimiento del 10%, este motor de combustion interna puede funcionar en ciclos de dos o cuatro tiempos. Su fundamento se basa en la entrada de aire, el cual es comprimido en una relacion de 16 a 22:1, inyectando combustible y provocando la combustión, al año siguiente Rudolf Diésel mejora el motor logrando obtener un rendimiento del 18% y con ello implementó sus motores en la industria y en la naval (Villegas, 2007, pág. 09).

En el año de 1923 se redujo el tamaño del motor Diésel mismo que fue implementado en un camión, realizando un viaje de 100km a una velocidad media de 30km/h (Bartsch, 2001, pág. 32).

Los grandes avances tecnológicos alcanzados desde la invención del motor Diésel hasta la actualidad, han llevado a los fabricantes a tener como objetivos principales, mejorar la eficiencia, disminuir el consumo de combustible y reducir notablemente las emisiones contaminantes emitidos por los gases de escape en los motores Diésel, los cuales constituyen una de las principales fuentes de contaminación que afecta a la salud de la población y al medio ambiente (Campos, 2015, pág. 21).

Según la organización mundial de la salud la contaminación es el principal problema ambiental en todo el mundo, lo cual repercute en un efecto de suma importancia en la salud de la población. Así consta en su último informe sobre la calidad del aire en la cual se estima que la contaminación es directamente responsable de la muerte prematura de más de 7 millones de personas al año (Rojas, 2015, pág. 01).

Debido a esta problemática, la Unión Europea implantó en 1988 una normativa referente a los límites máximos de emisiones contaminantes denominada EURO 0, la normativa ha evolucionado en cada segmento de manera diferente siendo cada vez más exigente, en la actualidad la normativa vigente es la EURO 6 (Total, 2019, pág. 02).

Los fabricantes de motores Diésel para dar cumplimiento a estas normativas EURO, han ido desarrollando e implementando una serie de sistemas tecnológicos para limpiar los gases resultantes producidos por la combustión, entre los cuales se puede mencionar la válvula EGR, el filtro anti partículas (FAP), tecnología adblue (Escuela de organización industrial, 2015, pág. 01).

Debido a las exigencias de las normativas ambientales, mismas que con el paso del tiempo se enfocaran a limitar a aún más las emisiones contaminantes, fabricantes como Denso Corporation trabajan en la tecnología i-ART, la cual basa su funcionamiento en colocar un sensor de presión en cada inyector mismo que supervisa la actividad de inyección, como la inyección de combustible se produce hasta 1000 veces por segundo, la tecnología i-ART mide con precisión la fluctuación de la presión y la temperatura, parámetros que influyen directamente en la reducción de NOx y PPM consiguiendo de esta manera un aire más limpio (Denso Corporation , 2019, pág. 02)

Bosch es uno de los principales proveedores de tecnología para motores Diésel a nivel mundial, es por ello que trabaja en el desarrollo de un novedoso sistema que conserva la ventaja con respecto al consumo de combustible y el impacto ambiental, la normativa vigente estable un rango de 168mg/km. A partir de 2020 este límite se reducirá a 120mg/km, los ingenieros de Bosch han logrado un decisivo avance en los últimos meses. Una combinación de tecnología avanzada de inyección de combustible, un sistema de gestión del aire recientemente desarrollado y una gestión inteligente de la temperatura ha hecho posible alcanzar un valor de 13 miligramos de NOx por kilómetro lo cual se verá reflejado dicho proyecto para el año 2020 (Bosch, 2018, pág. 02).

1.5 MOTOR DIÉSEL.

1.5.1 PRINCIPIO DE FUNCIONAMIENTO DEL MOTOR DIÉSEL.

El funcionamiento del motor Diésel, al igual que los motores de explosión, la combustión se produce por el efecto de una reacción química, donde es necesaria la presencia abundante de oxígeno, el cual está contenido en el aire. La temperatura que adquiere el aire al ser comprimido en un cilindro por el pistón, oscila entre los 800°C en compresiones de relación 20:1, asegurando la inflamación del Diésel cuando es inyectado en el aire que está altamente

comprimido, el cual provee a su vez del suficiente oxígeno al combustible para que este pueda producir su combustión. De esta manera el combustible libera su energía calorífica que el motor convertirá en energía mecánica (Gil, 2002, pág. 8)



Figura 1.1 Motor Diésel

(Sanz, 2017, pág. 54)

1.5.2 CICLOS DE FUNCIONAMIENTO TEÓRICOS DEL MOTOR DIÉSEL

Este ciclo del motor Diésel se desarrolla en cuatro carreras del pistón, correspondiente a dos vueltas del cigüeñal.

1.5.2.1 Admisión (1-2)

La válvula de admisión se abre y el pistón comienza su carrera descendente desde el punto muerto superior, el aire empieza a entrar en el cilindro, en teoría el pistón desciende manteniendo una presión igual a la atmosférica en el interior del cilindro, cuando el pistón llega al punto muerto inferior la válvula de admisión se cierra y el cilindro queda completamente lleno de aire, el diagrama de trabajo permite seguir la evolución de la presión y el volumen dentro del cilindro, como se puede apreciar en la figura 1.2 (Sanz, 2017, pág. 55).

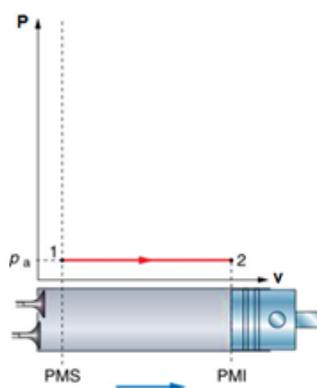


Figura 1.2 Admisión

(Sanz, 2017, pág. 56)

1.5.2.2 Compresión (2-3)

En este ciclo las válvulas de admisión y escape se encuentran totalmente cerradas, en tanto el cilindro se encuentra lleno de aire a presión atmosférica (P_a), el pistón se desplaza del punto muerto inferior al punto muerto superior, en este ciclo el aire se comprime y se puede obtener presiones muy altas que a su vez elevan la temperatura del aire, como se muestra en la figura 1.3 (Sanz, 2017, pág. 56).

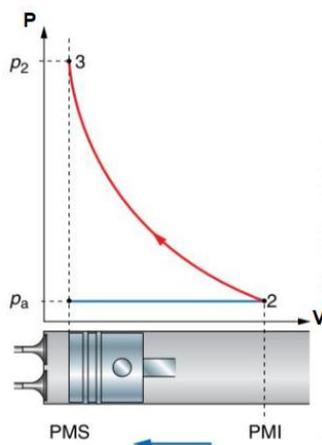


Figura 1.3 Compresión

(Sanz, 2017, pág. 56)

1.5.2.3 Combustión (3-4)

Como se muestra en la figura 1.4, cuando el pistón se encuentra en ascenso, antes de que llegue al punto muerto superior el aire ha alcanzado la presión máxima y una temperatura que oscila entre los 700°C y 900°C, dando inicio a la inyección y provocando la expansión de los gases, el pistón es empujado hacia el punto muerto inferior obteniendo como resultado la transformación de la energía calorífica en trabajo (Luna & Mier, 2014, pág. 42).

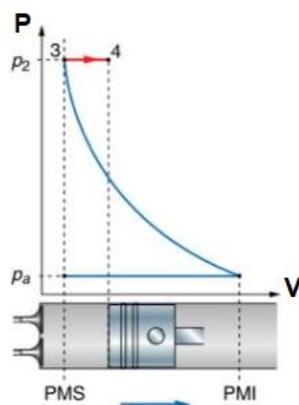


Figura 1.4 Combustión

(Sanz, 2017, pág. 57)

1.5.2.4 Expansión (4-5)

Como se puede observar en la figura 1.5, la combustión termina en el punto (4), la presión disminuye desde el punto (P_2) al punto (P_1) y la expansión de los gases generan un trabajo positivo, tomando en consideración que las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas (Sanz, 2017, pág. 57).

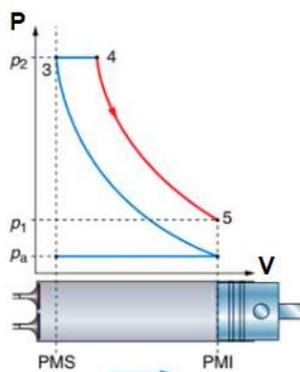


Figura 1.5 Expansión

(Sanz, 2017, pág. 57)

1.5.2.5 Principio de escape (5-6)

La presión en el interior del cilindro se encuentra en (P_1) y el pistón se encuentra en el punto muerto inferior y se abre la válvula de escape, en este ciclo la presión desciende instantáneamente hasta la presión atmosférica (P_a), el calor residual que no ha sido convertido en trabajo se evacua al exterior (Sanz, 2017, pág. 57).

1.5.2.6 Expulsión de gases (6-1)

En este ciclo el pistón se desplaza del PMI al PMS con la finalidad de expulsar los gases quemados, y la presión atmosférica se mantiene constante durante toda la carrera, como se indica en la figura 1.6 (Sanz, 2017, pág. 57).

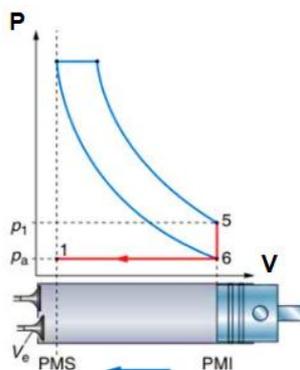


Figura 1.6 Expulsión de gases

(Sanz, 2017, pág. 57)

1.5.2.7 Diagrama teórico del motor diésel

La figura 1.7, muestra la evolución teórica del diagrama de trabajo Diésel, de lo cual se puede deducir que:

La carrera de admisión y escape en teoría se realizan a presión atmosférica y no intervienen en el rendimiento del ciclo

La carrera de compresión (2-3) y la de expansión (4-5) tienen procesos adiabáticos lo cual implica que no hay intercambio de calor con el entorno

La portación de calor Q_1 mediante el ciclo de combustión (3-4) es un proceso isóbaro lo cual implica que se realiza a presión constante

La sustracción de calor Q_2 , cuando la válvula de escape realiza su apertura (5-2) se supone isócara, en este punto la presión varía de manera instantánea en cuanto el volumen permanece constante (Sanz, 2017, pág. 58).

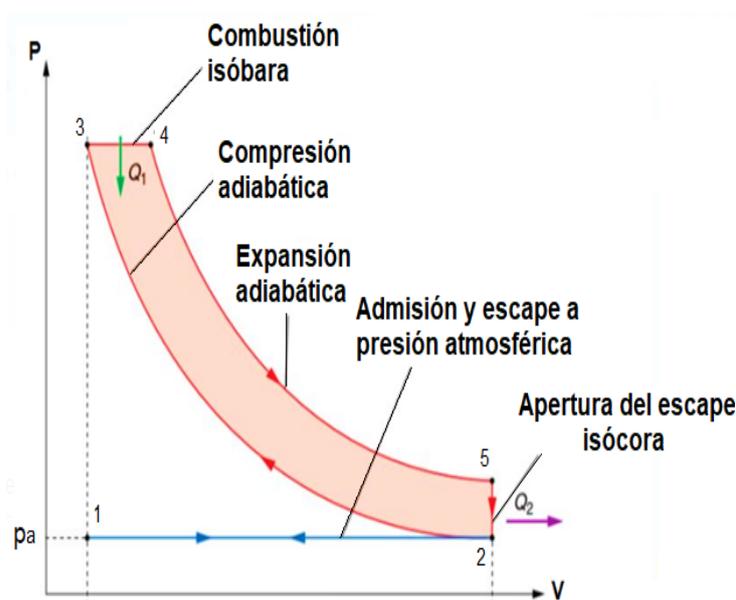


Figura 1.7 Ciclo termodinámico Diésel

(Sanz, 2017, pág. 59)

1.5.3 DIAGRAMA DE DISTRIBUCIÓN DIÉSEL

El motor Diésel dispone de cotas de distribución con la finalidad de mejorar el llenado de los cilindros y la evacuación de los gases generados por la combustión, los gases quemados no contienen oxígeno por lo que interesa su total evacuación dejando espacio disponible para ser ocupado por el aire puro (Sanz, 2017, pág. 63)

En la siguiente figura se puede apreciar las cotas de distribución de un motor Diésel y sus ciclos de trabajo.

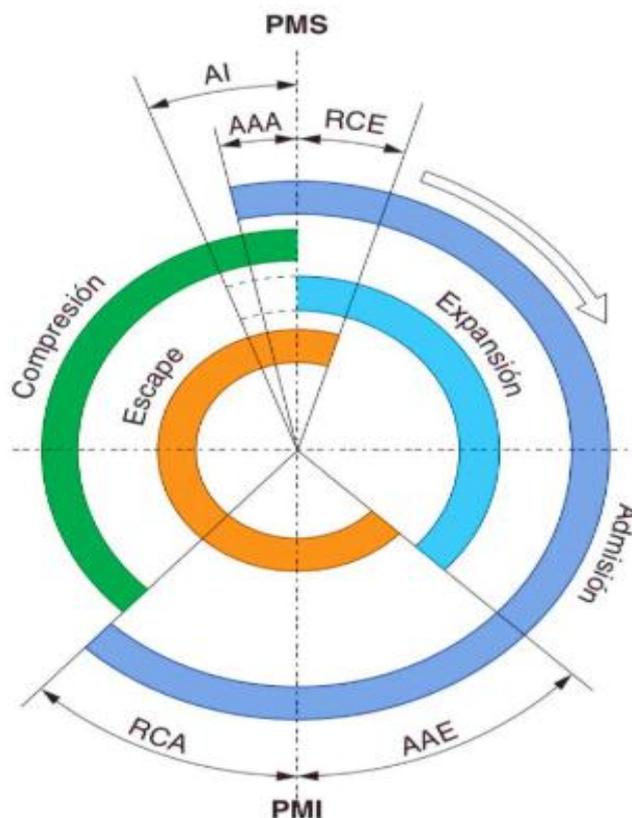


Figura 1.8 Ciclo real en un motor Diésel

(Dominguez & Ferrer, 2013)

Donde:

AAA: Avance a la apertura de admisión

RCA: Retraso al cierre de admisión

AI: Avance a la inyección

AAE: Avance a la apertura del escape

RCE: Retraso al cierre del escape

Mencionadas cotas tienen una función específica en los ciclos de trabajo del motor Diésel.

La válvula de escape se abre antes de que el pistón llegue el PMI (AAE), para descargar con rapidez la presión residual al final del tiempo de expansión

Con el retraso en cierre de escape (RCE) se aprovecha la inercia adquirida por los gases para mejorar su evacuación

El avance a la apertura de admisión (AAA), la válvula de admisión se abre antes de que el pistón llegue al punto muerto superior con la finalidad que la velocidad de salida de los gases de escape arrastre a los de admisión venciendo su inercia

El retaso en el cierre de admisión (RCA), con esta cota se consigue que los gases sigan entrando en el cilindro debido a la velocidad que aún conservan al final de la admisión

Los motores Diésel sobrealimentados tienen la característica de tener menores ángulos en las cotas AAA y RCE, debido a que en la entrada de aire en el cilindro es forzada (Dominguez & Ferrer, 2013, pág. 208).

1.5.4 CICLO REAL DEL MOTOR DIÉSEL

El ciclo práctico del motor Diésel representado en la figura 1.9, describe el proceso real de funcionamiento del motor, y sus diferencias con el ciclo teórico (Gonzalez, 2015, pág. 32)

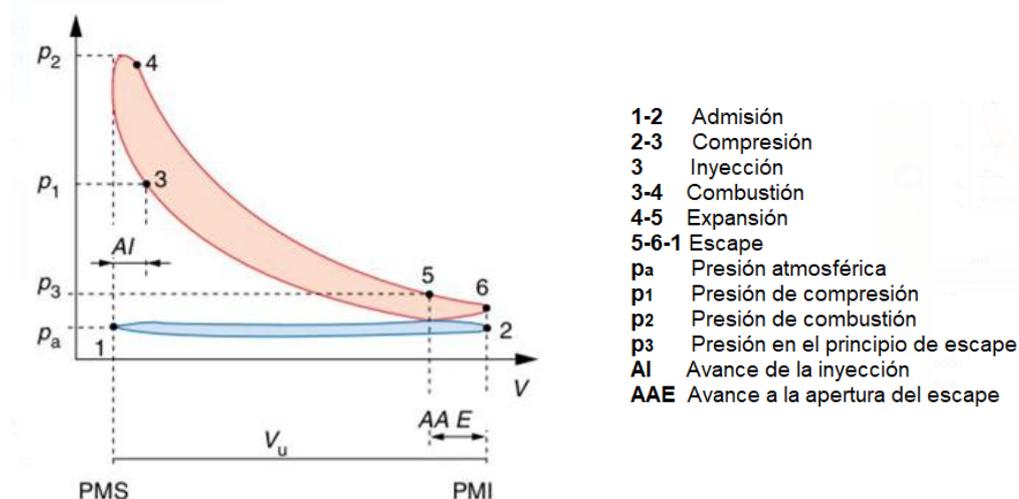


Figura 1.9 Ciclo real
(Sanz, 2017, pág. 60)

1.5.4.1 Admisión (1-2)

El pistón está llegando al punto muerto superior la válvula de admisión ya se encuentra abierta, debido al avance de la apertura de admisión (AAA), el pistón desciende hasta el punto muerto inferior conservando una presión por debajo de la atmosférica en el interior del cilindro, debido a las pérdidas de carga. Cuando el pistón comienza a subir al PMS, la válvula de admisión aún permanece abierta un instante con el fin de aprovechar la velocidad de entrada que ha adquirido el aire, una vez superado el PMI la válvula se cierra y comienza la compresión como se indica en la figura 1.9 (Gonzalez, 2015, pág. 33)

1.5.4.2 Compresión (2-3)

En este ciclo las válvulas de admisión y escape se encuentran cerradas, el pistón asciende comprimiendo el aire que se encuentra dentro del cilindro hasta la presión P_1 (presión de compresión), la compresión no es adiabática ya que existe intercambio de calor a través de las paredes del cilindro, como indica la figura 1.9

1.5.4.3 Inyección y combustión (3-4)

La inyección comienza en el punto 3 cuando el pistón se encuentra en compresión, en este punto el incremento de presión no es instantáneo y se necesita tiempo para que inicie la

combustión y se libere el calor, este tiempo se compensa adelantando el momento de la inyección (AI). en una primera fase se produce una subida muy rápida de la presión, pero no se realiza a volumen constante debido a que el pistón efectúa un desplazamiento desde el punto 3 hasta el PMS. En una segunda fase el pistón toma su carrera descendente y la combustión continua hasta el punto 4, en este recorrido la presión no se mantiene constante, como se ilustra en la figura 1.9

1.5.4.4 Expansión (4-5)

El pistón desciende en la carrera de trabajo, a diferencia del ciclo teórico esta carrera no es adiabática ya que parte del calor es evacuado al sistema de refrigeración a través de las paredes del cilindro, el ciclo de expansión termina en el punto 5, como se indica la figura 1.9

1.5.4.5 Principio de escape (5-6)

En el punto 5, el interior del cilindro se encuentra a la presión (P_3 presión en el principio de escape), para evacuar esta presión residual es necesario un avance en la apertura del escape (AAE), es decir el pistón recorre del punto 5 al punto 6, la caída de presión y la sustracción de calor no se realiza a volumen constante en diferencia al ciclo teórico (no isócara), como se muestra en la figura 1.9

1.5.4.6 Expulsión de los gases (6-1)

En este punto la presión ya ha descendido en el interior del cilindro y el pistón comienza su carrera ascendente, los gases quemados son expulsados al exterior mientras la presión es ligeramente superior a la atmosférica

El ciclo practico tiene un rendimiento menor que el teórico debido a las pérdidas que se producen en el funcionamiento real del motor (Sanz, 2017, pág. 64).

1.6 COMBUSTIÓN DIÉSEL FORMACIÓN DE LA MEZCLA

El proceso de combustión en el motor de encendido por compresión (MEC), se produce de una manera espontánea pero no instantánea, se inicia mediante el autoencendido de la mezcla formada en el interior del cilindro a alta temperatura, una mezcla de aire-combustible en condiciones normales de funcionamiento del motor, prende con gran velocidad llegando a alcanzar los 2 milisegundos (Gil, 2002, pág. 10).

El sistema de inyección desempeña un papel fundamental, ya que es el encargado de proporcionar el combustible en las condiciones óptimas para la creación de la mezcla, la

presión en el interior de la cámara de combustión en el momento que se produce la inyección se encuentra en un rango de 50 bar a 100 bar. Por otro lado, con los sistemas de inyección common rail se puede inyectar el combustible en un rango de 200 bar a 1800 bar de presión, tomando en consideración que este valor puede aumentar en un futuro, por lo tanto, la formación de la mezcla se produce casi simultáneamente con el proceso de combustión, ya que es el punto que representa el final uno y el comienzo de otro. Una vez que el combustible entra en contacto con el gas, que se encuentra a una elevada temperatura en el cilindro se produce el primer fenómeno denominado atomización (García, 2009, pág. 16).

Se llama atomización al proceso por el cual un líquido en forma de lámina, vena o gotas, se desintegra en ligamentos o gotas de menor tamaño, con la finalidad de aumentar la superficie de contacto que existe entre el aire y el combustible, en cuanto la vena líquida se desintegra y se produce la atomización de combustible comienza el fenómeno de englobamiento (García, 2009, pág. 16).

El englobamiento es el mecanismo en el cual, el chorro inyectado al interactuar con el gas ambiente (aire), hace entrar este mismo gas dentro de la periferia del mismo chorro confiriéndole un mayor grosor, una deceleración y una reducción de densidad. Una vez realizados los procesos de atomización y englobamiento del aire se obtiene como resultado a las gotas combustible separadas y rodeadas de un gas a una temperatura elevada con el que intercambian energía, este intercambio de energía produce un aumento de temperatura de la gota, con lo cual se incrementa la cantidad de combustible que pasa a fase gaseosa, reduciendo el diámetro de la misma hasta hacerla desaparecer. La evaporación completa del combustible finaliza en la denominada longitud líquida cuya magnitud es de 100 veces el diámetro de la tobera (García, 2009, pág. 17).

Haciendo referencia a la formación de la mezcla, el combustible después de salir de la tobera de inyección, se atomiza y se mezcla con el aire, el fenómeno de englobamiento de aire caliente hace que las gotas creadas durante el proceso de atomización se calienten, de tal forma que el combustible líquido se evapora hasta una cierta distancia, en donde ya no queda combustible líquido (Peiró, 2015, pág. 23). Dentro de la formación de la mezcla y encendido, como se ha descrito anteriormente este proceso es espontáneo, pero no instantáneo debido a que existe un periodo de demora.

En la formación de la mezcla se produce una demora física, en tanto que el encendido está constituido por una demora química como se describe en la figura 1.10

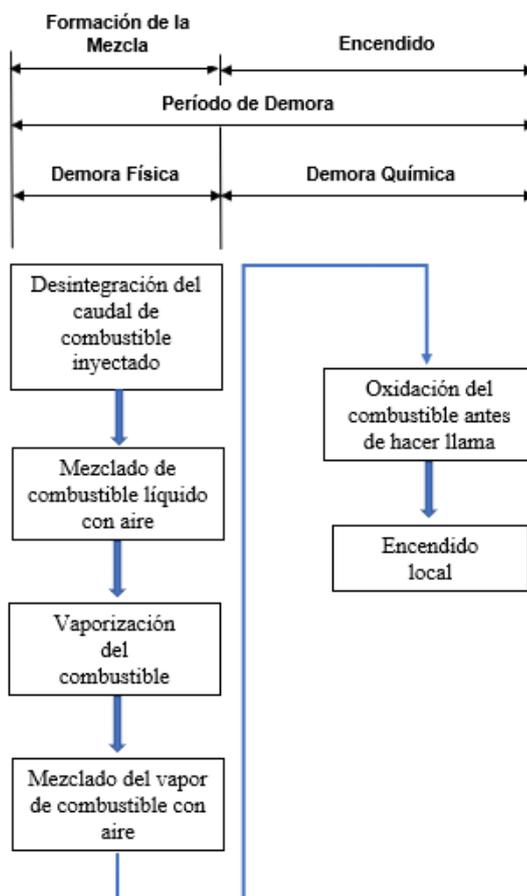


Figura 1.10 Proceso de combustión

(Gil, 2002, pág. 11)

1.6.1 FASES DE LA COMBUSTIÓN

1.6.1.1 Fase de retraso al encendido

Esta fase comienza en el inicio del proceso de inyección, el combustible se mezcla con el aire a través de una serie de procesos físicos, en una atmósfera con presencia de oxígeno lo cual provoca prereacciones químicas de baja intensidad produciendo la rotura de las moléculas de combustible, esta secuencia de procesos culmina en el autoencendido espontáneo de la mezcla que marca el final de esta fase como se puede apreciar en la figura 1.11.

1.6.1.2 Fase de combustión premezclada

Se puede definir la duración de esta fase desde el inicio de la combustión hasta punto mínimo de la curva de liberación de calor, en ella se oxida el combustible que se ha mezclado con el aire entre los límites de inflamabilidad durante la fase de retraso al autoencendido, pero que todavía no ha podido reaccionar. Por tanto, los procesos físicos-químicos que controlan esta

fase están íntimamente ligados con los que se produjeron en el proceso de autoencendido, en consecuencia, debido a la alta disponibilidad de combustible mezclado la tasa de liberación de calor es elevada, como se puede mostrar en la figura 1.11 (Peiró, 2015, pág. 23).

1.6.1.3 Fase de combustión por difusión

Esta fase está controlada principalmente por el proceso de mezcla de combustible evaporado con el aire en el interior de la cámara, mientras dura la inyección el proceso de mezcla es controlado por la cantidad que introduce el chorro en la cámara. En referencia a la estructura de la llama alcanza un periodo cuasi-estacionario, es decir, que su comportamiento no varía con respecto al tiempo mientras se está inyectando, por tanto, esta fase tiene su duración desde el final de la fase de combustión premezclada hasta el final del proceso de inyección, como se aprecia en la figura 1.11 (García, 2009, pág. 19)

1.6.1.4 Fase de combustión por difusión tardía

En el instante en que el proceso de inyección llega al final, termina el periodo cuasi-estacionario de la combustión por difusión al que le sigue la fase por combustión por difusión tardía en mencionada fase se observa una caída de la tasa de liberación de calor debido al deterioro del proceso de mezcla aire-combustible provocado por la desaparición del aporte de inyección, de tal forma que la combustión va perdiendo intensidad hasta que termina, como se muestra la figura 1.11 (García, 2009, pág. 20).

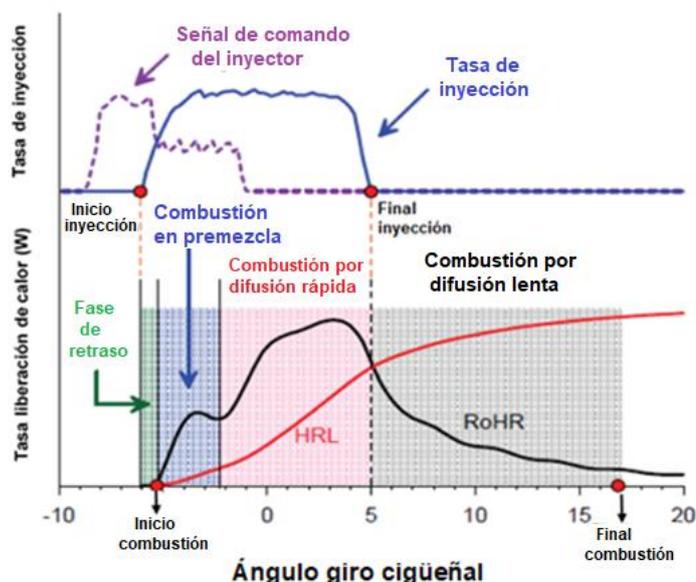


Figura 1.11 Fases de combustión

(Peiró, 2015, pág. 24)

1.6.2 LLAMA DE DIFUSIÓN

La llama de difusión Diésel tiene su inicio desde la fase de combustión por difusión hasta el final del proceso de inyección, la figura 1.12, muestra un esquema del modelo de la llama de difusión.

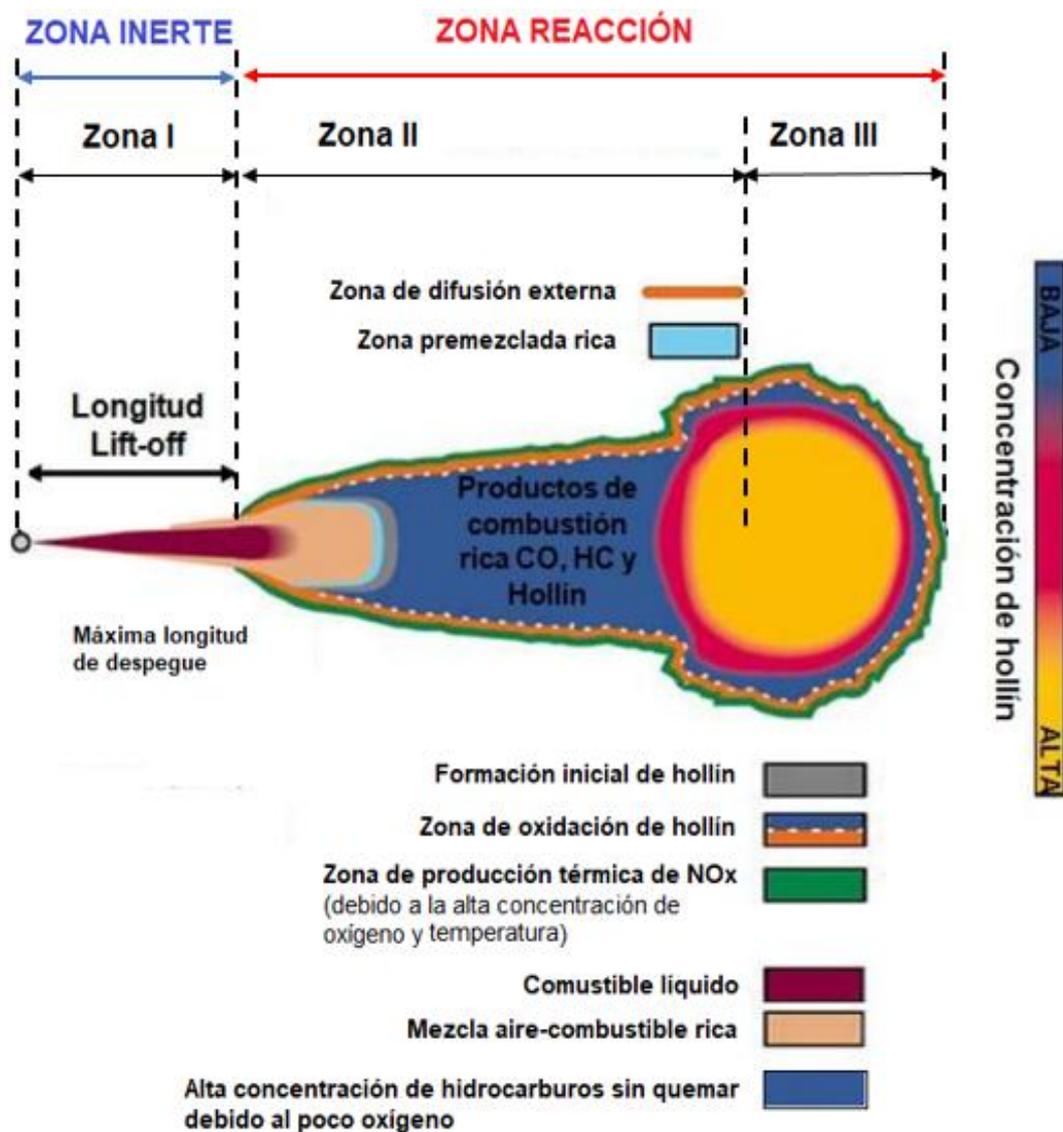


Figura 1.12 Llama de difusión

(García, 2009, pág. 21)

1.6.2.1 Zona I (Zona inerte)

Situada entre la salida de la tobera y el punto donde empieza la llama difusiva, su longitud es la denominada longitud lift-off o longitud de despegue de llama (combustible líquido), en esta zona ocurre la atomización, el englobamiento y la evaporización del aire (denominados fenómenos físicos) (García, 2009, pág. 21).

1.6.2.1 Zona II (Combustión premezclada rica)

Tras la longitud de lift-off el chorro adquiere condiciones reactivas, también justo después de esta distancia existe una zona de reacción premezclada, que consume prácticamente todo el oxígeno englobado por el chorro, en consecuencia, dejando el interior de la llama sin concentración de oxígeno. La llama difusiva se forma una vez superada esta zona, los productos de esta reacción de dosado rico sirven como base para la formación de hollín (García, 2009, pág. 21).

1.6.2.2 Zona III (Combustión por difusión)

A partir de la zona I y los alrededores de la zona II, la llama adquiere una estructura compuesta a su vez de dos zonas, una zona interna en donde se tiene productos parciales creados en la zona II, combustible sin quemar y hollín

Si bien la formación de hollín viene determinada en la zona II, su crecimiento se da durante la zona III. En el esquema de la figura 1.12 se pueden apreciar diferentes concentraciones de hollín en el interior de la llama, creciendo su concentración a medida que se avanza aguas abajo (sentido de propagación de llama) de la zona II, hasta que alcanza la parte frontal de la llama en la cual se observa un vórtice que representa la concentración más elevada de hollín, adicionalmente cuando el hollín alcanza la zona de reacción se oxida de manera completa, por el contrario los óxidos de nitrógeno se forman en la zona más externa de la mencionada zona de reacción ya que las condiciones son ideales para la formación de NO_x, al menos por vía térmica, las temperaturas son elevadas y adicionalmente se dispone de oxígeno en el gas que rodea la zona de reacción, cabe recalcar que la formación de NO_x continua después de finalizar la inyección durante la fase de combustión por difusión lenta como se puede apreciar en la figura 1.11 (García, 2009, pág. 22).

1.6.3 DETALLE DE LA MASA INYECTADA EN LA FASE DE COMBUSTIÓN

Como se detalla en la figura 1.13, el combustible atraviesa la zona de mezcla rica reaccionando químicamente en un proceso débilmente exotérmico, es decir, (el proceso que desprende energía en forma de calor), elevando su temperatura hasta los 1600°K (1326,8°C) formando productos parciales, principalmente monóxido de carbono e hidrocarburos, dichos hidrocarburos se consideran predecesores para la formación de hollín, en esta combustión premezclada se libera alrededor del 10% al 15% de la energía química contenida en el combustible. Una vez que el combustible a superado la zona de premezcla rica, el combustible ingresa a la zona interna de llama de difusión, la cual se caracteriza por no tener oxígeno mientras el combustible continúa mezclándose y englobando gases que no liberan

energía alguna, el camino del combustible a través de la zona interior hacia la zona de reacción de la llama de difusión, es decir el frente de llama, viene condicionado por una elevada temperatura del mencionado frente que conjunto con los precursores generados en la premezcla rica origina la aparición de hollín en el interior de la llama. El hollín se genera en pequeñas partículas y tiende a ir creciendo en el interior de la llama hasta aproximarse al frente de llama en el cual, alcanza su tamaño máximo, cuando el combustible alcanza el frente de llama los productos parciales de la combustión son oxidados por el oxígeno, en este punto el combustible libera su energía entre un 80%-85% diferencia que no había sido liberada durante la fase de premezclada rica, con esta oxidación del combustible se alcanzan las temperaturas más altas durante todo el proceso, como consecuencia a estas temperaturas el hollín formado previamente es oxidado y sus niveles decrecen a cero, como se puede mostrar en la figura 1.13, por el contrario la tasa de formación de óxidos de nitrógeno aumenta significativamente (García, 2009, pág. 25).

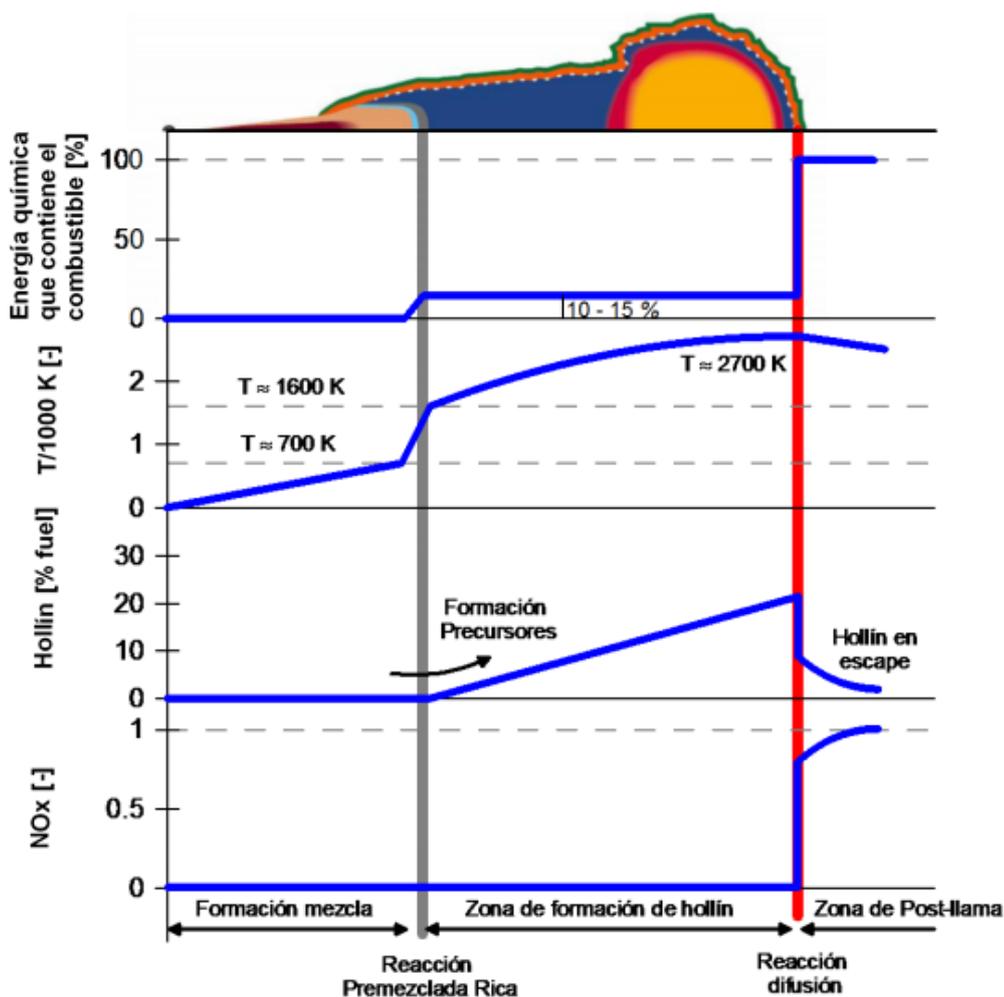


Figura 1.13 Detalle de la masa inyectada en la fase de combustión

(García, 2009, pág. 24)

1.7 EMISIONES DE GASES CONTAMINANTES

Todos los procesos de combustión producen una serie de emisiones que inevitablemente genera un problema de contaminación medioambiental, debido al aumento considerable del parque automotor, la contaminación atmosférica ha crecido gradualmente y los gobiernos han tenido que elaborar normativas que regulen estas emisiones, los contaminantes más importantes provienen de un motor de combustión Diésel (Cortés, 2010, pág. 2).

1.7.1 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

Los óxidos de nitrógeno están compuestos por el óxido nítrico (NO) y el dióxido de nitrógeno (NO₂) en relación entre un 70% y 90% del total de los NO_x provenientes de los motores Diésel, en un motor se genera mayoritariamente óxido nítrico (NO) pero en ciertas ocasiones, las zonas de temperatura son bajas y la cantidad de O₂, se genera una cantidad considerable de NO₂ por la conversión del NO (Acevedo, 2007, pág. 15).

La formación de NO depende en su totalidad de la cantidad de oxígeno y de las altas temperaturas. El gas se quema después del tiempo de presión máxima en el cilindro, la parte inicial de la combustión es muy importante para la formación de NO_x al menos la mayoría de todo el NO_x se forman en los primeros 20° del giro del cigüeñal posterior al inicio de la combustión (Acevedo, 2007, pág. 15).

El dióxido de nitrógeno, está catalogado como uno de los principales contribuyentes a la formación del smog fotoquímico y la lluvia ácida este elemento se encuentra entre un 10% y 30% como compuesto de las emisiones totales de NO_x generadas por el motor de encendido por compresión, la aparición de NO₂ ocurre cuando las moléculas de NO provenientes de zonas de alta temperatura son transportadas hacia zonas en la que prevalecen el HO₂, a altas temperaturas las cantidades de NO₂ son menores (Acevedo, 2007, pág. 15).

1.7.2 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El CO es uno de los contaminantes más peligrosos, su mecanismo de formación depende fuertemente del dosado de la mezcla aire-combustible, y la cantidad generada por un motor depende el equilibrio entre los procesos de formación y oxidación del mismo, una combustión rica invariablemente produce CO, como el motor Diésel opera en un régimen de mezcla pobre (exceso de aire), sus emisiones de CO son limitadas (Acevedo, 2007, pág. 13).

1.7.2.1 Mezcla pobre

En estas zonas la llama no puede evolucionar debido a que no son capaces de resistir una rápida combustión y se generan productos procedentes de la descomposición química

(pirólisis) y la oxidación parcial del carbono del combustible (aparición de CO) (Peiró, 2015, pág. 36).

1.7.2.2 Mezcla rica

En estas zonas las cantidades de combustible es tan grande que no es capaz de mezclarse con el aire suficiente para que así se produzca la oxidación completa del CO (Peiró, 2015, pág. 36).

1.8 DIÓXIDO DE CARBONO (CO₂)

El CO₂ naturalmente se encuentra en la atmósfera y es un producto normal de la combustión, normalmente la quema de un combustible debe producir solo dióxido de carbono y agua la proporción relativa de estos dos componentes depende de la razón carbono-hidrógeno en el combustible, alrededor de 1:1,75 para Diésel común, las emisiones de CO₂ provenientes del motor pueden reducirse mediante la disminución del contenido de carbono o por el mejoramiento en la eficiencia del combustible en el motor, la alta eficiencia del motor Diésel le da una ventaja ambiental sobre los combustibles fósiles (Acevedo, 2007, pág. 12).

1.9 MATERIAL PARTICULADO

En el sector del motor, por partículas se entiende todo tipo de materia presente en los gases de escape que se encuentre en estado sólido o líquido en condiciones aproximadamente a las ambientales. Dependiendo de los procesos físicos o químico que se dan tanto en el proceso de combustión y en la línea de escape pueden clasificarse en dos tipos (Peiró, 2015, pág. 37)

1.9.1 PARTÍCULAS PRIMARIAS

Se forman directamente como producto del proceso de combustión y se mide a la salida del cilindro

1.9.2 PARTÍCULAS SECUNDARIAS

Proviene de una serie de procesos atmosféricos ocurrido tanto en el escape como en la atmósfera, medidos a la salida del escape o en una derivación de éste (Peiró, 2015, pág. 37)

El material particulado (PM) es una emisión más que provoca el motor Diésel que, juntamente con el NO_x, tienen el mayor grado de importancia dentro del conjunto de emisiones. Esta se compone de hollín (material carbónico sólido similar al carbón) y de una fracción extraíble (hidrocarburos extraíbles con un solvente fuerte) absorbido dentro del hollín, y otra compuesta de material inorgánico (sulfato, agua y cenizas). Las

concentraciones de material particulado se miden a través de una muestra de gases de escape que pasan a través de un filtro que está a 52°C, y se tabula el cambio en el peso del filtro. El hollín se forma en el cilindro, a partir de hidrocarburos pesados en fase gaseosa los cuales se condensan en zonas deficientes de oxígeno tocadas por el combustible atomizado, el hollín se forma a partir de una reacción de pirólisis (descomposición química de materia a alta temperatura en ausencia de oxígeno), ajustando el balance entre la razón de mezcla (aire-combustible) y la evolución de la temperatura puede modificar la razón de formación. Mezclar rápido después de que la temperatura suba, puede reducir la formación de hollín, después cuando se mezcla el hollín y aire, el primero encuentra oxígeno y se quema si la temperatura es lo suficientemente alta, las concentraciones de hollín son mayores dentro del cilindro que las encontradas en los gases de escape, es decir, alrededor de un 90% se oxida dentro del cilindro, los parámetros de diseño del motor y su evolución evidencian la formación de hollín (Acevedo, 2007, pág. 17).

1.10 HIDROCARBUROS NO QUEMADOS

La aparición de hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados en las emisiones de un motor Diésel tienen su origen en la combustión incompleta. El término hidrocarburo significa compuesto orgánico en estado gaseoso, en las zonas próximas a la superficie del pistón, cilindro y culata la mezcla aire-combustible sufre calor fácilmente, razón por la cual no se consigue la temperatura suficiente para que la llama avance y se consuma toda la mezcla, generando de esta manera la aparición de hidrocarburos (Cortés, 2010, pág. 11).

1.11 SISTEMAS DE INYECCIÓN DIÉSEL

1.11.1 BOMBAS DE INYECCIÓN

Las bombas son un elemento mecánico para la inyección de combustible Diésel, mencionados elementos han presentado importantes avances tecnológicos en su evolución. Se presentan en dos modelos las bombas de inyección lineal y las bombas de inyección rotativas.

1.11.1.1 Bomba de inyección en línea

Su funcionamiento se basa por el accionamiento de un eje de leva en línea que se conecta al cigüeñal del motor, el accionamiento de esta bomba es mecánico y a cada leva le corresponde activar un elemento de bomba el cual entrega combustible a un cilindro. La regulación de la entrega de combustible es a través de una barra reguladora, como característica este tipo de

bomba no ha sufrido grandes cambios tecnológicos a través del tiempo se utilizan en maquinaria pesada (Gonzalez, 2015, pág. 55).

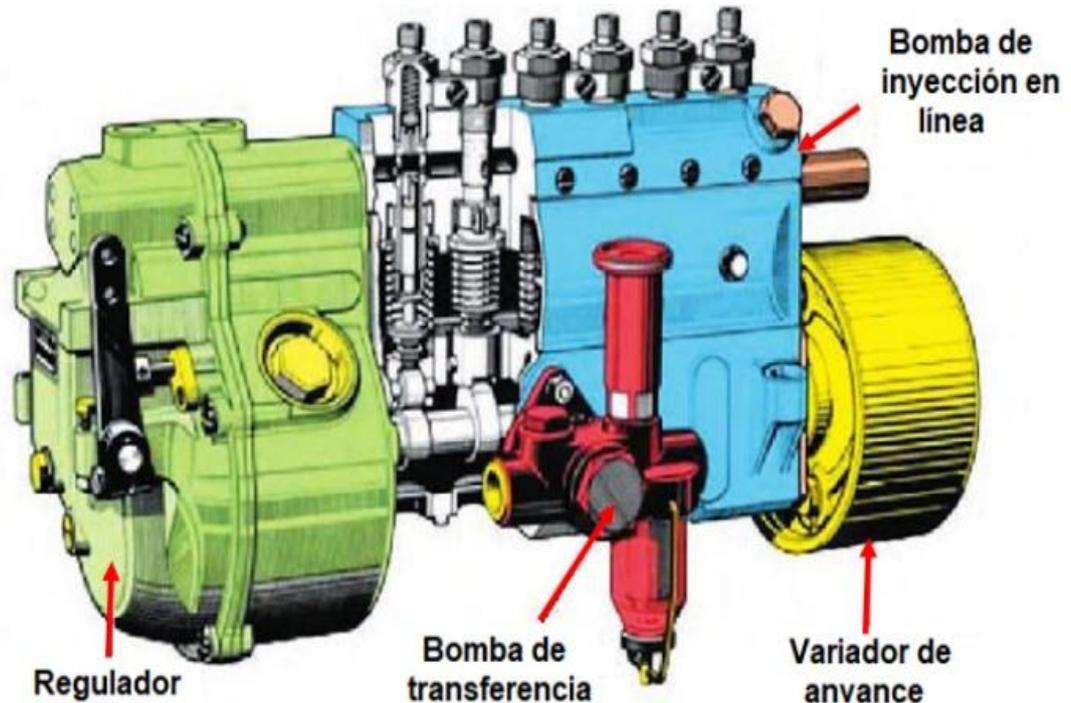


Figura 1.14 Bomba lineal

(Gonzalez, 2015, pág. 55)

1.11.1.2 Bomba de inyección rotatoria

Debe su nombre al eje de leva radial el cual alimenta a un solo elemento de bomba a alta presión el cual distribuye el combustible a los inyectores, se puede regular las revoluciones de forma mecánica, electrónica o a través de un variador de avance integrado dichas bombas pueden presentarse con un embolo axial o radial (Parera, 2002, pág. 38).

1.11.1.3 Bomba de inyección rotativa de émbolo axial (VE)

Esta bomba consta de una bomba de aletas que aspira combustible del depósito y lo suministra al interior de la cámara de bomba. Un émbolo distribuidor central que gira mediante un disco de levas, asume la generación de presión y la distribución a los diversos cilindros, durante una vuelta del eje de accionamiento es émbolo realiza tantas carreras como cilindros del motor ha de abastecer, en la bomba rotativa de émbolo axial equipada con regulador mecánico de regulaciones por fuerza centrífuga o con mecanismo actuador

regulado electrónicamente, existe una corredera de regulación que determina la carrera útil y dosifica el caudal de inyección (Parera, 2002, pág. 38).

1.11.1.4 Bomba de inyección rotativa de émbolo radial (VR)

Esta bomba se caracteriza por utilizar émbolo radial para generar presión. Puede ser dos o cuatro émbolos radiales que son accionados por un anillo de levas. Una electroválvula de alta presión dosifica el caudal de inyección el comienzo de la inyección se regula mediante el giro del anillo de levas, con el variador de avance (Parera, 2002, pág. 39).

1.11.2 COMMON RAIL

La palabra common rail puede traducirse como trampa de inyección, es decir se hace referencia al elemento característico del sistema de inyección gasolina la diferencia fundamental está constituida por el funcionamiento con mayores presiones de trabajo en los motores Diésel. La presión de inyección se genera independientemente del régimen del motor y del caudal de inyección, el combustible para la inyección está a disposición en el acumulador de combustible de alta presión, la unidad electrónica de control calcula a partir de campos característicos programados, el momento de inyección y la presión de inyección y el inyector realiza las inyecciones en cada cilindro del motor, a través de una electroválvula controlada (Castillejo, 2014, pág. 33).

1.11.3 UNIDAD BOMBA INYECTOR UIS

La bomba de inyección constituyen una sola unidad es decir por cada cilindro del motor se monta una unidad en la culata que es accionada directamente mediante un empujador, o indirectamente mediante balancín por parte del árbol de levas del motor, debido a la eliminación de las tuberías de alta presión es posible una presión de inyección esencialmente mayor debido a que no hay pérdidas por recorrido de combustible de la cañerías, la regulación electrónica regula el comienzo de la inyección, es posible una reducción destacada de las emisiones contaminantes del motor Diésel (Castillejo, 2014, pág. 35).

1.11.4 PARÁMETROS DE FUNCIONAMIENTO DE LOS SISTEMAS DE INYECCIÓN DIÉSEL

En la siguiente tabla 1.1, se detalla los valores de funcionamiento de los diferentes sistemas de inyección Diésel, cabe recalcar que los valores para la bomba de inyección lineal hacen referencia al modelo P3000.

Tabla 1.1 Características de los sistemas de inyección Diésel

Sistema de inyección	Caudal de inyección por carrera (mm ³)	Presión máxima de inyección (bar)	Número de revoluciones por minuto (rpm)	Potencia máxima por cilindro (KW)	Número de cilindros
Rotativa (VE)	120	1 200 1 350	4 500	25	4-6
Rotativa (VR)	135	1 700	4 500	25	4-6
Lineal (P3000)	250	950	2 600	45	4-12
Common Rail	400	1 350 1 400	2 800	200	6-16
Unidad bomba inyector UIS	400	1 800	3 000	80	3-8

Fuente: (Bosch R. , 2005, pág. 12)

1.12 NORMAS EURO

Las normas EURO fueron desarrolladas por la Unión Europea en el año 1988, con la implementación de la EURO (0), estas normas fueron desarrolladas e implementadas a los vehículos a Diésel y gasolina, designando valores máximos permitidos para los gases contaminantes que la industria automotriz debe cumplir al momento de desarrollar y producir un vehículo, a lo largo de los años esta normativa ha evolucionado, estando en vigencia la fase EURO VI, implementada en el año 2014, con límites considerablemente más estrictos en la siguiente figura 1.15, se representa la evolución de la normativa EURO para las emisiones de hollín, NOx y CO en vehículos Diésel, es importante recalcar que las emisiones de NOx en las EURO I y II estaban ligadas a la emisiones de hidrocarburos sin quemar (HC). A partir de la EURO III se atribuyen valores límites para el NOx aisladamente (García del Río, 2017, pág. 337).

1.12.1 EURO I

Esta normativa fue implementada en el año de 1992, dentro de los requerimientos de esta norma se debería implementarse el catalizador, con la finalidad de reducir las emisiones contaminantes tanto de vehículos Diésel como de gasolina. El objetivo principal de este componente es reducir y transformar los gases de la combustión, este mecanismo se denomina “REDOX”, este componente realiza su trabajo en una temperatura de alrededor de 300°C, en su funcionamiento podemos describir que en su primera fase de trabajo los

dióxidos de nitrógeno se descomponen obteniendo como resultado nitrógeno a esta operación se le denomina (reducción), los hidrocarburos no quemados y el monóxido de carbono se tratan en la segunda fase de funcionamiento del catalizador convirtiéndolos en dióxido de carbono y agua (García del Río, 2017, pág. 338).

1.12.2 EURO II, III, IV

Con el transcurso de los años, la Unión Europea fue modificando los límites de emisiones de gases contaminantes que los motores de combustión interna debían emitir. Los fabricantes automotrices optaron por producir motores de menor cilindrada concentrándose también en el ahorro de combustible, se implementaron sistemas de turbocompresores con la finalidad de obtener una mayor eficiencia y un bajo nivel de emisión de gases de escape. Cuando el motor trabaja en revoluciones bajas se genera menos monóxido de carbono y menor cantidad de hidrocarburos sin quemar e incluso se reduce los óxidos nitrógeno ya que el motor mantiene temperaturas bajas (García del Río, 2017, pág. 338).

1.12.3 EURO V

En el año 2009 se implementa la normativa Euro V, la cual fue desarrollada sobre todo para motores Diésel, el material particulado se origina de las impurezas del Diésel y están conformadas de diferentes tamaños, siendo las de menor tamaño más peligrosas por tener mayor penetración en los organismos vivos, para eliminar estas partículas se obligan a todos los fabricantes a implementar un filtro antipartículas (FAP , DPF) que consiste en una trampa para las partículas sólidas en suspensión, quedando retenidas en una especie de panel de cerámica con poros muy finos.

Cuando este filtro se satura se regenera automáticamente enviando una orden a la centralita para que aumente la temperatura de los gases de combustión con el objetivo de eliminar estas partículas, en este proceso es necesario un periodo de 10-20 minutos donde el motor no ha de pararse y el consumo de Diésel aumenta entorno a un 20% (García del Río, 2017, pág. 339).

1.12.4 EURO VI

Esta normativa es implementa en el año 2014 con la finalidad de reducir de forma drástica las emisiones de los vehículos Diésel, para poder cumplir con mencionada norma se recurre a un compuesto liquido denominado AdBlue el cual se va administrando en pequeñas dosis

en los gases de combustión generando una reacción química a alta temperatura, que produce amoníaco el cual descompone las moléculas de óxidos de nitrógeno molecular y agua, esta tecnología deberán llevar todos aquellos vehículos que no superen los límites dictados por la normativa, como característica principal el depósito de AdBlue tiene una duración de 10,000 Km, además cuando se termine el depósito de AdBlue el vehículo para su marcha automáticamente debido a que tiene una función que no podrá circular por no cumplir con la homologación vigente (García del Río, 2017, pág. 339).

La siguiente figura 1.15, se detalla la evolución de la normativa EURO a lo largo del tiempo y los cambios tecnológicos que ha implicado su adopción en los vehículos Diésel.

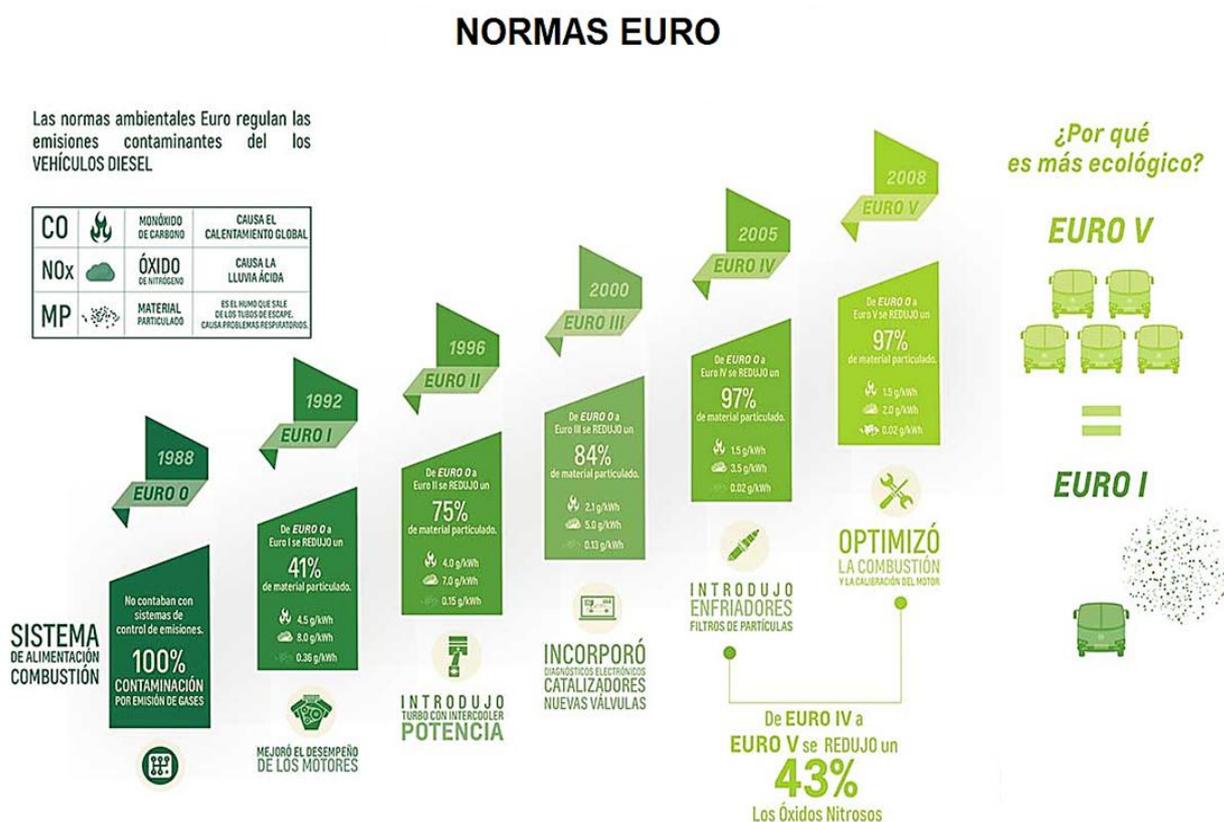


Figura 1.15 Evolución normativa EURO

(GM Colmotores, 2017, pág. 1)

Como se puede verificar en la figura 1.15, en 20 años el límite para las emisiones NOx se redujo alrededor de un 93%, mientras las emisiones de hollín se han rebajado en alrededor del 98% en comparación de a los valores permitidos por la EURO I.

Como se puede apreciar en la tabla 1.2, los valores máximos de emisiones contaminantes de acuerdo a la evolución de la norma EURO para motores Diésel.

Tabla 1.2 Valores de las emisiones contaminantes

NORMA	CO (g/km)	HC (g/Km)	NO_x (g/Km)	HC + NO_x (g/Km)	PM
Euro I	3,16	-----	-----	1,13	0,14
Euro II	1,00	0,15	0,55	0,70	0,08
Euro III	0,64	0,06	0,50	0,56	0,05
Euro IV	0,50	0,05	0,25	0,30	-----
Euro V	0,50	0,05	0,18	0,23	0,005
Euro VI	0,50	0,09	0,08	0,17	0,005

Fuente: (García del Río, 2017, pág. 333)

1.13 EFECTOS CONTAMINANTES SOBRE LA SALUD HUMANA Y MEDIO AMBIENTE

Según la organización mundial de la salud OMS, la contaminación del aire representa un importante riesgo medio ambiental y para la salud, dos informes de la OMS del 2014, ratificados en el 2016 describen que el 92% de la población mundial viven en lugares donde no se respetan los valores de la calidad del aire, la contaminación atmosférica tanto en las ciudades, en las zonas rurales de todo el mundo provoca cada año 3 millones de defunciones prematuras (Querol, 2018, pág. 35).

El crecimiento del automóvil privado es la génesis de la contaminación de las ciudades, con un consumo energético más de cuatro veces superior al autobús por cada pasajero y es el principal agente emisor en áreas urbanas. Además, el incremento de automóviles Diésel frente a los de gasolina han contribuido al aumento de partículas y óxido de nitrógeno, ya que los motores Diésel emiten una proporción de ambos contaminantes, siendo estos los contaminantes más problemáticos en los entornos urbanos y con grandes afecciones sobre la salud humana a continuación, se detalla los principales gases contaminantes y sus efectos en la salud humana (Querol, 2018, pág. 36).

1.13.1 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

El monóxido de carbono es el contaminante del aire más abundante en la capa inferior de la atmósfera, sobre todo en el entorno de las grandes ciudades, al ser el CO un gas tóxico la

exposición del hombre a elevadas concentraciones puede conducirle a la muerte. Uno de los efectos sobre la salud que produce el CO se debe a que al combinarse con la hemoglobina de la sangre, disminuye en ésta la capacidad de transportar oxígeno, así también afectando al sistema nervioso, agudeza visual, dolor de cabeza, el crecimiento fetal en mujeres embarazadas, cambios funcionales cardiacos y pulmonares (Carnicer, 2008, pág. 15).

1.13.2 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NO_x)

En las emisiones contaminantes al referirse a la fracción de NO_x, se cita al óxido nítrico (NO) y al dióxido de nitrógeno (NO₂), siendo este último cuatro veces más tóxico. Sus efectos en la salud producen percepción olfativa, irritación nasal, dolores respiratorios agudos, edema pulmonar, dolor de cabeza y daño celular en el pulmón, en la tabla 1.3 se detalla los efectos que tienen las personas según el nivel de concentración y en base al tiempo de exposición.

Tabla 1.3 Efectos de los óxidos de nitrógeno en la salud

CONCENTRACIÓN (ppm)	Tiempo de exposición	Efectos
5	14 hrs	Incremento de la resistencia de las vías respiratorias, aumento de hiperreactividad bronquial
2.5	2 hrs	Incremento de la resistencia de las vías respiratorias
1	2 hrs	Cambio en la capacidad vital
0,5 – 5	3-60 min	Personas con bronquitis crónica causa incremento de la resistencia de las vías respiratorias
0,5	20 min	Personas con asma, con 10 min. de ejercicio disminuye el flujo respiratorio.

Fuente: (Muñoz, Quiroz, & Paz, 2006, pág. 47)

1.13.3 MATERIAL PARTICULADO (MP)

Las fuentes móviles que son impulsadas por los derivados de la gasolina o Diésel, producen emisiones (MP) que son dañinas para el ser humano, esta emisiones producidas por un motor de ciclo Diésel son mayores que la de un vehículo operado a gasolina, las enfermedades producidas por el (MP) pueden ser cardiovasculares, cáncer al pulmón y enfermedades respiratorias, estas enfermedades no necesariamente tienen efecto inmediato en los seres humanos, sino más bien pueden tener efectos diferidos y presentarse con el transcurso de las años. El ser humano se puede defender del (MP) cuyas partículas poseen diámetros de 10 μm , no obstante, las partículas menores de 10 μm penetran al sistema respiratorio

(faringe, tráquea, bronquios y alvéolos). De estas las que tienen un diámetro menor de $2.5\mu m$ entran en los alveólos, de donde pueden pasar directamente a la sangre; las que son entre $10\mu m$ y $2.5\mu m$ de diámetro no pueden entrar en los alvéolos, pero quedan retenidas por un tiempo en los bronquios y bronquiolos. Se consideran partículas finas cuando estas tiene un diámetro menor de $2.5\mu m$ en tanto las partículas gruesas tienen un diámetro mayor a $2.5\mu m$. las partículas por su tamaño se dividen en dos grupos denominados MP_{10} y $MP_{2.5}$ (con diámetros equivalentes o menores que $10\mu m$ o $2.5\mu m$ respectivamente) mientras menor sea el tamaño de la partícula mayor es la penetración en el organismo del ser humano y por tanto mayores son los efectos dañinos que en él causan, por ejemplo, el MP_{10} produce trastornos sanguíneos y cardiovasculares mientras que el $MP_{2.5}$ puede generar daños cancerígenos y genéticos (Cortés, 2010, pág. 12).

1.13.4 IMPACTO AMBIENTAL

Los contaminantes son sustancias de origen natural o artificial que introducidos en altas concentraciones al medio ambiente provocan efectos perjudiciales entre los cuales se puede mencionar (Ortiz, 2014, pág. 14)

1.13.4.1 Smog Fotoquímico

Este fenómeno se puede observar en grandes ciudades donde el tráfico es abundante y las condiciones para la formación de este contaminante tienden a originarse en un tiempo soleado y cálido, debido a que los gases contaminantes no tienen la capacidad para dispersarse o diluirse. Este fenómeno se puede observar cuando existe una neblina en el aire causando daños irreparables a las plantas (Ortiz, 2014, pág. 15).

1.13.4.2 Cambio climático

Este fenómeno se puede observar en gran medida en el aumento de la temperatura del aire, fenómenos meteorológicos y elementos que conforman el clima (Ortiz, 2014, pág. 16).

1.13.4.3 Ozono

El ozono cuando se encuentra en elevadas concentraciones es considerado un contaminante atmosférico principalmente por los efectos nocivos que puede ocasionar. El ozono se origina por medio de reacciones fotoquímicas de contaminantes que se emiten a la atmósfera como por ejemplo los hidrocarburos (HC). Los HC desempeñan un papel importante en la

formación de ozono a nivel del suelo siendo los vehículos los responsables de aproximadamente el 50 % (Zbarcea & tal, 2016, pág. 3)

1.14 ESTRATEGIAS PARA LA REDUCCIÓN DE EMISIONES CONTAMINANTES EN MOTORES DIÉSEL

Frente a las dificultades de atender a las reglamentaciones de emisiones vigentes y futuras, los constructores de automóviles han buscado distintas soluciones para controlar las emisiones que emite el escape de los vehículos. Para controlar estas emisiones se han desarrollado soluciones tecnológicas activas mismas que hacen referencia a estrategias de reducción de emisiones directamente en el interior del cilindro a partir de la realización de modificaciones en los sistemas de gestión de aire o de inyección, el desarrollo de sistema de recirculación de gases de escape EGR y sus posteriores evoluciones, así como la introducción de sistemas de distribución variable que flexibiliza el proceso de renovación de la carga y soluciones tecnológicas pasivas con la finalidad de dar cumplimiento a las normas vigentes (Amorim, 2010, pág. 19).

1.14.1 RECIRCULACIÓN DE GASES DE ESCAPE

La recirculación de los gases de escape puede definirse como, una técnica de reducción de emisiones NO_x en motores de combustión interna, mediante la cual se introducen en el cilindro los gases procedentes de combustiones anteriores que oscila entre un 5% y 10%. El gas quemado contiene un elevado porcentaje de CO₂ y agua esta técnica incrementa la proporción de gases inertes en el cilindro, mencionados gases provenientes del EGR (Exhaust Gas Recirculation), no participan en la combustión, pero permiten reducir la temperatura en el cilindro. Debido que el calor específico del gas recirculado es superior al del aire, la recirculación del gas de escape contribuye al reducir la temperatura de la llama, simultáneamente la introducción de un gas inerte en el cilindro disminuye la concentración de oxígeno en el interior del mismo, bajo estos parámetros la combustión se realiza de una forma más lenta disminuyendo la presión y temperatura de la combustión, obteniendo así la reducción de emisiones NO_x (Moreno, 2009, pág. 22). Existen diversos métodos para reintroducir parte de los gases quemados en la admisión, según la naturaleza del mismo se puede establecer diversas clasificaciones del sistema de recirculación, como se detallan a continuación;

1.14.2 DEPENDIENDO DEL LUGAR DONDE SON INTRODUCIDOS LOS GASES RECIRCULADOS

1.14.2.1 EGR Interno

Esta técnica se basa en el aprovechamiento de los reflujos en las válvulas para atrapar una cierta cantidad de gases residuales en el cilindro, dicha técnica se la puede efectuar generalmente por un perfil característico de las levas de escape permitiendo que éstas se abran durante la carrera de admisión, en un punto donde la presión de escape es superior a la del cilindro. De esta forma una parte del gas de escape es devuelto al cilindro (Moreno, 2009, pág. 23).

1.14.2.2 EGR Externo

En este punto el gas recirculado procede de algún punto del escape del motor. El gas fluye por diferencia de presión a través de un conducto que conecta con un punto de la línea de escape con un punto del sistema de admisión. Esto hace que la elección de toma y descarga del gas emitido por el motor MEC tenga una importancia primordial puesto que el cambio de presión entre dichos puntos determinará en gran medida el gasto máximo recirculado (Moreno, 2009, pág. 24).

1.14.3 DEPENDIENDO DE LA PRESIÓN

1.14.3.1 EGR de baja presión

En este método el gas de escape que se pretende reingresar en el motor se extrae agua abajo (sentido de la corriente) de la turbina para que sea transportado hasta la entrada del compresor aprovechando la depresión formada por el mismo, con este tipo de sistemas no se puede realizar una inversión en el flujo debido que la presión de escape es mayor o igual a la presión de entrada al compresor. Considerando que existen diferentes presiones entre la extracción y la descarga éstas no alcanzarían los niveles requeridos por la EGR deseados, es por ello que requieren de elementos auxiliares como una válvula de contrapresión en el escape o válvula de estrangulamiento en la admisión (Moreno, 2009, pág. 25).

1.14.3.2 EGR de alta presión

Este sistema es el más común en motores sobrealimentados. Este método de recirculación consiste en extraer el gas aguas arriba (sentido contrario al flujo), de la turbina y guiarlo hasta después del compresor (o después del intercooler), de forma que todo el conjunto se encuentra a una presión superior a la atmosférica. La diferencia de presiones entre los colectores de admisión y escape, junto con la posición de la válvula de recirculación

determinara el gasto (consumo) de gas recirculado. Es posible que bajo determinadas circunstancias la presión media en el colector de admisión sea superior a la del colector de escape invirtiendo el sentido del flujo y enviando aire fresco directamente al escape, mencionado fenómeno no suele ocurrir en motores de pequeña cilindrada ya que por su reducido tamaño del turbo grupo hace que el rendimiento del compresor y turbina sean moderados en este punto el EGR realiza su funcionamiento a baja carga y por tanto con dosado reducidos y bajas temperaturas de escape (Molina, 2005, pág. 180).

1.14.4 ATENDIENDO A LA TEMPERATURA DEL GAS

1.14.4.1 EGR caliente

Se entiende por EGR caliente al que se produce sin ningún enfriamiento del gas recirculado, en este caso el EGR incide de manera importante sobre la temperatura de admisión debido a que los gases están muchos más calientes que el aire admitido, no obstante en determinadas circunstancias, como el arranque en frío el incremento en la temperatura de admisión favorece el inicio de la combustión (Molina, 2005, pág. 181).

1.14.4.2 EGR frío

En esta técnica el sistema el gas recirculado se enfría en un intercambiador de calor para no afectar en la medida posible a la temperatura de admisión. La disminución de la temperatura de admisión representa una ventaja para las prestaciones del motor. A su vez es necesario tomar en cuenta que un enfriamiento excesivo de los gases de escape puede llevar a la condensación del vapor de agua y otras sustancias contenidas en el mismo (Molina, 2005, pág. 182).

1.14.5 SOLUCIONES PASIVAS

Se refieren a estrategias de reducción de contaminantes basadas en la eliminación o retención de las emisiones contaminantes producidos en el interior de la cámara de combustión, mediante la instalación de dispositivos de post-tratamiento específicos en la línea de escape. Dentro de este tipo de soluciones la distinción se realiza en función del contaminante que eliminan entre los cuales se puede mencionar; el filtro de partículas (DPF), catalizadores de reducción selectiva (SCR) el cual es el encargado de la eliminación de emisiones NOx, de manera complementaria a estas soluciones en los últimos años se han desarrollado nuevos conceptos de combustión con el objetivo de reducir simultáneamente las emisiones NOx y partículas de forma concreta los conceptos de combustión por difusión de baja temperatura LTC (Amorim, 2010, pág. 20).

1.14.5.1 Combustión LTC

Este tipo de estrategias de combustión LTC (Low Temperature Combustion), buscan alcanzar una combustión sin la formación de NO_x , dicha estrategia sugiere que con una temperatura de llama por debajo de los 1826.8°C , ya no se observaría la formación de óxidos de nitrógeno en cantidades significativas. Las estrategias de combustión avanzadas tienen la inyección en el medio de la carrera de compresión y la mezcla en el comienzo de la combustión es premezclada pero no homogénea (Amorim, 2010, pág. 23).

1.14.5.2 Estrategia PREDIC

Esta estrategia de combustión PREDIC (Premixed Lean Diésel Combustion) significa combustión Diésel premezclada de bajo dosado desarrollado por New ACE Institute se trataba de una nueva modalidad de combustión premezclada en la cual dos inyectores de doble orificio, posicionados en lateral de la cámara de combustión tienen la finalidad de que los chorros de inyección se choquen asociados a un nuevo diseño de cámara como se puede observar en la figura 1. 16, representa la disposición de los dos inyectores laterales utilizados en el Predic frente al inyector de posición central que se encuentra de forma habitual en los motores de combustión convencional, el choque entre los dos chorros tiene como objetivo la disminución de la penetración y mejora de la mezcla aire combustible evitando de esta manera el choque del chorro directamente con las paredes del cilindro, como resultado se obtuvieron reducciones en las emisiones de NO_x (Amorim, 2010, pág. 24).

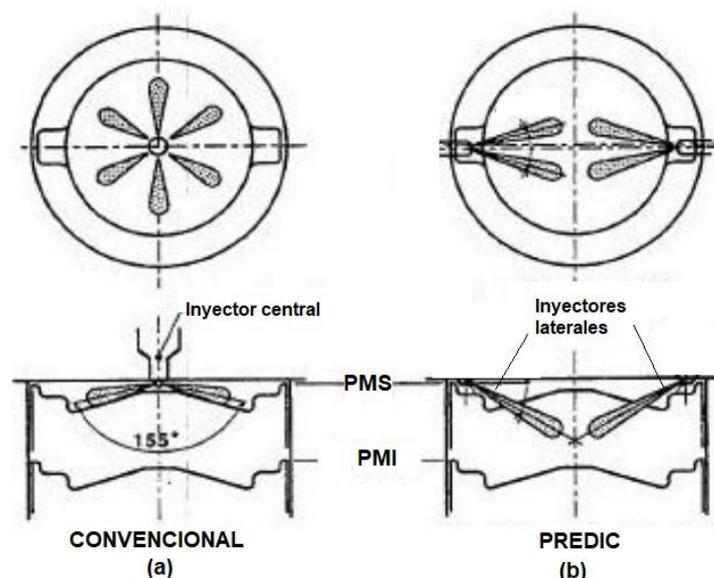


Figura 1.16 Diferencias de los chorros de un motor Diésel (a), Predic con dos inyectores(b).

(Amorim, 2010, pág. 25)

1.14.2.3 Filtros de partículas Diésel (DPF)

El filtro de partículas es un elemento que se encuentra situado en el tubo de escape cuya misión es la de eliminar las partículas sólidas generadas por la combustión Diésel. Estos filtros retienen las partículas para posteriormente quemarlas en un proceso de regeneración para transformarlas en dióxido de carbono y agua. Este elemento funciona que el filtro va reteniendo las partículas sólidas. Estas partículas ha de eliminarse de alguna forma, dichas partículas se eliminan de forma pirolítica (descomposición química de materia orgánica a alta temperatura), para ello el filtro cada cierto tiempo alcanza temperaturas superiores a los 400°C a este tiempo se le denomina el de regeneración, esto sucede cada vez que el vehículo detecta la acumulación de las partículas gracias a unos sensores ubicados en el sistema como se indica en la figura 1.17 (Boza, 2016, pág. 1).

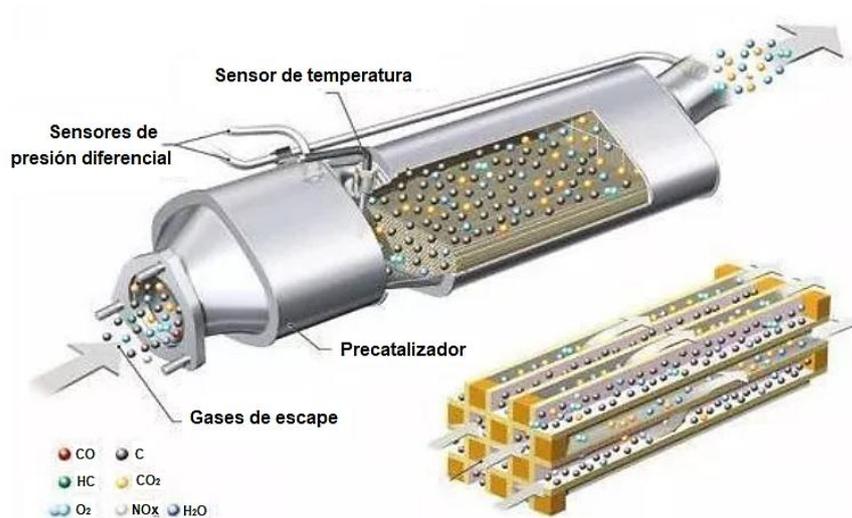


Figura 1.17 Filtro de partículas DPF

(Boza, 2016, pág. 2)

1.14.2.4 Reducción catalizadora selectiva (SCR)

La reducción catalizadora selectiva SCR lleva utilizándose desde hace décadas. Los primeros en introducir esta tecnología fueron los Japoneses en los años 70, ya que se trata de uno de los métodos más eficaces para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno se denomina así porque el aditivo utilizado en esta tecnología contiene amoníaco, que es sumamente reactivo con los NO_x, de ahí el término selectivo, la instalación de un catalizador SCR (conocido también como catalizador NO_x) reduce las emisiones de NO_x del vehículo hasta un 90%, las partículas un 30%-50% y el CO₂ un 3%-5%. Los sistemas SCR son

similares a los catalizadores, se trata de un dispositivo de flujo directo compuesto por un material cerámico con forma de nido de abeja, su única diferencia es el recubrimiento utilizado. Los sistemas SCR se consideran las siguiente fase de los catalizadores convencionales y los DPF, ya que no dependen tanto del calor para la conversión como estos últimos, en realidad se trata de la conversión final de los gases del vehículo antes de que se expulsen las emisiones desde el tubo de escape, una vez que los gases salen del DPF se pulverizan con un líquido inyectado en la corriente de escape al entrar en el SCR el líquido reacciona convirtiendo los NOx en nitrógeno y oxígeno el líquido utilizado se denomina líquido de escape Diésel o más conocido como AdBlue. El AdBlue es una disolución de urea compuesta por un 32.5% de Urea y un 67.5 de agua es un líquido, no tóxico, pero es corrosivo y seguro de manipular, en la figura 1.18, se muestra el proceso que tienen las emisiones de gases de escape (Campos, 2015, pág. 33).

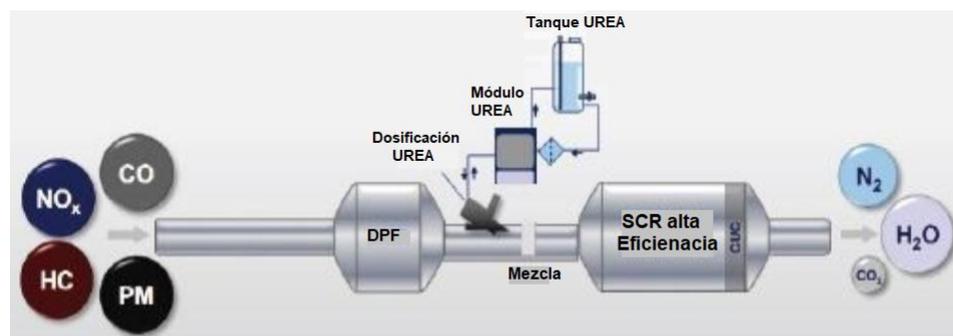


Figura 1.18 Proceso de las emisiones contaminantes en un motor Diésel

(Campos, 2015, pág. 34)

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 METODOLOGÍA

La investigación tuvo como propósito determinar los valores de las emisiones NO_x que producen los motores Diésel, su efecto en las personas y el medio ambiente, para el desarrollo de la investigación se utilizó el método investigativo, mismo que hace referencia en la formación de NO_x en los motores (MEC), para obtener los valores de emisiones NO_x se basó en protocolos establecidos para realizar las mediciones de este tipo de gases y se utilizó el analizador de gases portátil marca Kane y diferentes vehículos de prueba. Mediante el método analítico se procedió al análisis y comparación de los valores obtenidos durante las mediciones, haciendo referencia a la normativa internacional mexicana de la secretaria de medio ambiente y recursos naturales (SEMARNAT),

2.2 MATERIALES Y EQUIPOS

A continuación, se describen los equipos utilizados y el procedimiento para obtener los valores de emisiones NO_x en los diferentes vehículos de prueba.

2.2.1 ANALIZADOR DE GASES

Los porcentajes de concentración de los gases contaminantes emitidos por lo motores Diésel requieren ser medidos con la finalidad de evaluarlos y compararlos con parámetros preestablecidos, el analizador de gases muestra estos valores de medición, la interpretación de estos datos se hace en base a las normas internacionales vigentes, bajo parámetros preestablecidos (Paredes & Ichau, 2013, pág. 20).

2.2.1.1 Funcionamiento del analizador de gases

Los analizadores de gases son dispositivos ópticos-químicos que miden la concentración de gases en base a una muestra de gas tomado directamente del tubo de escape, basado en el principio de medición infrarrojo para determinar la concentración de CO, CO₂ y HC y para la medición de NO_x y O₂ se basa en la medición electroquímica que analiza la muestra y mide el contenido de cada componente indicándolo en el monitor de equipo (Mafla & Ortiz, 2007, pág. 22).



Figura 2.1 Analizador de gases Kane

Fuente: (Globaltech, 2018, pág. 1)

2.2.1.2 Características técnicas del analizador de gases Kane

Las pruebas de medición de emisiones de gases fueron realizadas con un analizador portátil marca Kane y sus características técnicas se describen en la tabla 2.1.

Tabla 2.1 Características técnicas del analizador de gases Kane

VARIABLE	RANGO DE MEDICIÓN	SISTEMA
Monóxido de carbono (CO)	0 - 10%	sistema infrarrojo
Dióxido de carbono	0 - 16%	sistema infrarrojo
Hidrocarburos (HC)	0 - 5000 ppm	sistema infrarrojo
Oxígeno (O ₂)	0 - 21%	celda electro-química
Óxido de nitrógeno (NO _x)	0 - 5000 ppm	con sensor
Lambda (λ)	0,8 - 1,2	
Temperatura	5°C - 45°C	
Humedad relativa	10% - 90%	

Fuente: (Globaltech, 2018, pág. 3)

Como se puede apreciar en la tabla 2.1, los rangos de medición del analizador portátil, marca Kane, cumple con los requerimientos y las condiciones ambientales de funcionamiento especificados en la norma técnica ecuatoriana INEN 2349, la cual hace referencia a los requerimientos técnicos de los analizadores de gases usados en el Ecuador.

2.2.2 LÍMITE DE EMISIONES PERMITIDAS EN EL ECUADOR

El límite permitido de emisiones NO_x (ppm), para los vehículos equipados con motor Diésel está dada por la norma técnica ecuatoriana INEN 2 207 gestión ambiental del aire, la mencionada norma establece lo siguiente: toda fuente móvil de diésel que se importe o se ensamble en el país, no podrá emitir al aire monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxido de nitrógeno (NO_x) y partículas en cantidades superiores a las indicadas (INEN, 2002, pág. 4)

2.2.3 LÍMITE DE EMISIONES PERMITIDAS EN MÉXICO

Mediante la norma mexicana NOM-167-SEMARNAT-2017, que establece de forma obligatoria los límites de gases de escape de vehículos automotores que utilicen: gas licuado de petróleo diésel, gas natural, gasolina u otros combustibles alternos, además que mencionada norma se aplicará a los propietarios de vehículos de servicio público, privado, federal y local (SEGOB, 2017, pág. 1)

Tabla 2.2 Límites máximos permitidos de emisiones contaminantes

Característica Vehicular	Hidrocarburos (HC) (hppm)	Monóxido de Carbono (CO) (% vol.)	Óxidos de Nitrógeno (NO _x) (ppm)	Oxígeno (O ₂) (% vol.)	Lambda
1994 y posteriores	100	1	1 000	2	1,05

Fuente: (SEGOB, 2017, pág. 4)

2.2.4 CLASIFICACIÓN DE LOS VEHÍCULOS DE PRUEBA

Según la norma mexicana NOM-042-SERMARNAT-2005 clasifica a los vehículos de la siguiente manera:

2.2.4.1 Vehículo de pasajeros (VP)

Automóvil o su derivado excepto el vehículo de uso múltiple o utilitario y remolque, diseñado para el transporte de hasta 10 personas (SEGOB, 2005, pág. 3)

2.2.4.2 Camiones ligeros (CL3)

Camiones ligeros cuyo peso bruto vehicular es mayor a 2 722 kg y hasta 3 857 kg (SEGOB, 2005, pág. 3). A diferencia de la norma ecuatoriana la norma mexicana no diferencia de vehículos americanos y europeos.

2.2.5 FICHAS TÉCNICAS DE LOS VEHÍCULOS DE PRUEBA

A continuación, se detallan las fichas técnicas de cada vehículo, mismos que se utilizaron para la ejecución de las pruebas.

Tabla 2.3 Fichas técnicas de los vehículos de prueba

Chevrolet D-Max CRDI 4x4			
Marca	Chevrolet	Modelo	D-Max 4x4
Potencia neta	134 hp @ 3 600 rpm	Cilindrada	3 000 cc
Torque neto	294 Nm @ 1 400-3 000 rpm	Combustible	Diésel
Chevrolet D-Max CRDI 4x2			
Marca	Chevrolet	Modelo	D-Max 4x2
Potencia neta	134 hp @ 3 600 rpm	Cilindrada	3 000 cc
Torque neto	294 Nm @ 1 400-3 000 rpm	Combustible	Diésel
Citroën C-elysee			
Marca	Citroën	Modelo	C-elysee
Potencia neta	90,7 hp @ 4 000 rpm	Cilindrada	1 560 cc
Torque neto	2 30 Nm @ 1 750 rpm	Combustible	Diésel

Fuente: (Automotores Continental , 2018, pág. 2)

2.2.6 PROCEDIMIENTO PARA REALIZAR LAS MEDICIONES DE GASES NO_x

Para dar inicio a las pruebas de medición, estas se efectúan cuando el vehículo este en la temperatura de funcionamiento y la transmisión del mismo se encuentre en neutro, mencionada prueba consiste en acelerar el automotor de manera constante hasta llegar a las

2 500 rpm, basándose en el siguiente protocolo que se describe a continuación: Verificar que el sistema de escape no presenta fugas, ni salidas de escape adicionales a las del diseño original (CICEV, 2016, pág. 10).



Figura 2.2 Verificación del sistema de escape

Verificar que la transmisión del vehículo se encuentre en posición neutro, así como también verificar el correcto funcionamiento y libre desplazamiento del acelerador, con la finalidad de purgar el sistema de escape se recomienda acelerar el vehículo hasta llegar al corte de revoluciones al menos 3 veces.



Figura 2.3 Colocación del analizador

Encender el analizador portátil Kane y esperar que inicie el proceso de auto calibración y posteriormente colocar la sonda a la salida del sistema de escape del vehículo, como punto final acelerar al vehículo hasta las 2 500 rpm y soltar el acelerador para que regrese a ralentí.



Figura 2.4 Medición de los gases NOx

El procedimiento descrito anteriormente se realizó a todos los vehículos de prueba mencionados en la tabla 2.3.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se realizó la recopilación de datos de los gases NO_x, mismos que fueron adquiridos en tres diferentes cantones de la provincia de Imbabura (Quiroga, Urcuquí e Ibarra), las pruebas fueron realizadas bajo el procedimiento anteriormente detallado de manera estática a dos diferentes regímenes del motor (ralentí y 2 500 rpm), con la finalidad de comparar y analizar los datos obtenidos con la normativa internacional mexicana.

3.1 MEDICIÓN DE GASES NO_x, Vehículo 1

Para la obtención de datos de emisiones NO_x se realizó en la localidad de Urcuquí, dichas mediciones fueron efectuadas en la mañana, medio día y en la noche obteniendo como resultado los valores que se muestran en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Valores obtenidos vehículo 1

	Camioneta Chevrolet Luv D-Max Nueva / Urcuquí					
	Ralentí mañana	2500 rpm mañana	Ralentí medio día	2500 rpm medio día	Ralentí noche	2500 rpm noche
Número de mediciones	NO _x (ppm)	NO _x (ppm)	NO _x (ppm)	NO _x (ppm)	NO _x (ppm)	NO _x (ppm)
1	144	147	5	130	10	102
2	144	7	5	132	11	98
3	144	8	22	118	44	94
4	144	7	70	95	110	92
5	144	44	102	89	144	91
6	144	116	104	85	156	90
7	143	133	110	80	166	90
8	144	139	113	-	172	89
9	144	140	117	71	175	89
10	144	148	119	70	177	89
11	144	137	119	70	178	89
12	143	102	119	70	179	89
13	143	81	120	71	181	89
14	143	79	121	71	182	89
15	144	75	121	73	183	88
16	145	74	123	74	184	88
17	144	75	124	-	184	89
18	145	75	124	74	184	89
19	145	76	125	75	185	89

Tabla 3.1 Valores obtenidos vehículo 1 (Continuación...)

20	145	76	125	76	185	88
21	145	77	125	-	186	88
22	145	78	125	76	186	87
23	145	78	124	76	186	87
24	145	79	126	75	186	88
25	144	79	126	76	186	88
26	145	79	127	76	188	88
27	145	79	126	75	188	88
28	145	80	126	75	188	88
29	145	80	126	76	188	88
30	146	80	126	-	188	89
31	146	81	127	76	188	89
32	145	81	128	76	188	89
33	145		128	76	189	89
34	145		128	77	189	89
35	145		127	76	189	89
36	146		127	76	189	90

En la tabla 3.2, se indica los valores promedio de las mediciones realizadas en la localidad de Urcuquí.

Tabla 3.2 Promedio de las pruebas realizadas vehículo 1

RPM	MAÑANA NOx (ppm)	MEDIO DÍA NOx (ppm)	NOCHE NOx (ppm)
Ralentí	144,5	111,38	166,44
2 500	84,06	80,81	89,58

En la figura 3.1, se puede visualizar que existe mayor cantidad de emisiones NOx en la prueba realizada en la noche con un valor promedio de 166,44 (ppm), a medida que las revoluciones del motor aumentan progresivamente hasta alcanzar las 2 500 rpm se observa que las emisiones NOx disminuyen un 46%, cabe recalcar que el vehículo Chevrolet Luv D-Max generó menor cantidad de NOx a medio día.

Según la Organización Mundial de la Salud estableció rangos de concentraciones de emisiones NO_x perjudiciales para la población, el valor obtenido del vehículo de prueba Chevrolet Luv D-Max generó un valor máximo de 166,44 (ppm) en la prueba a ralentí, mencionado resultado se encuentra ubicado en un rango establecido por la OMS de 150-282 (ppm), lo cual causa un efecto a la salud humana de tos y dolor de cabeza si el tiempo de exposición es de 1-3 horas, cabe recalcar que el valor obtenido en la prueba a 2 500 rpm no representa ningún riesgo a la salud de la población, en tanto las emisiones NO_x absorben la luz solar y disminuyen la visibilidad en la atmósfera además de aportar significativamente al cambio climático.

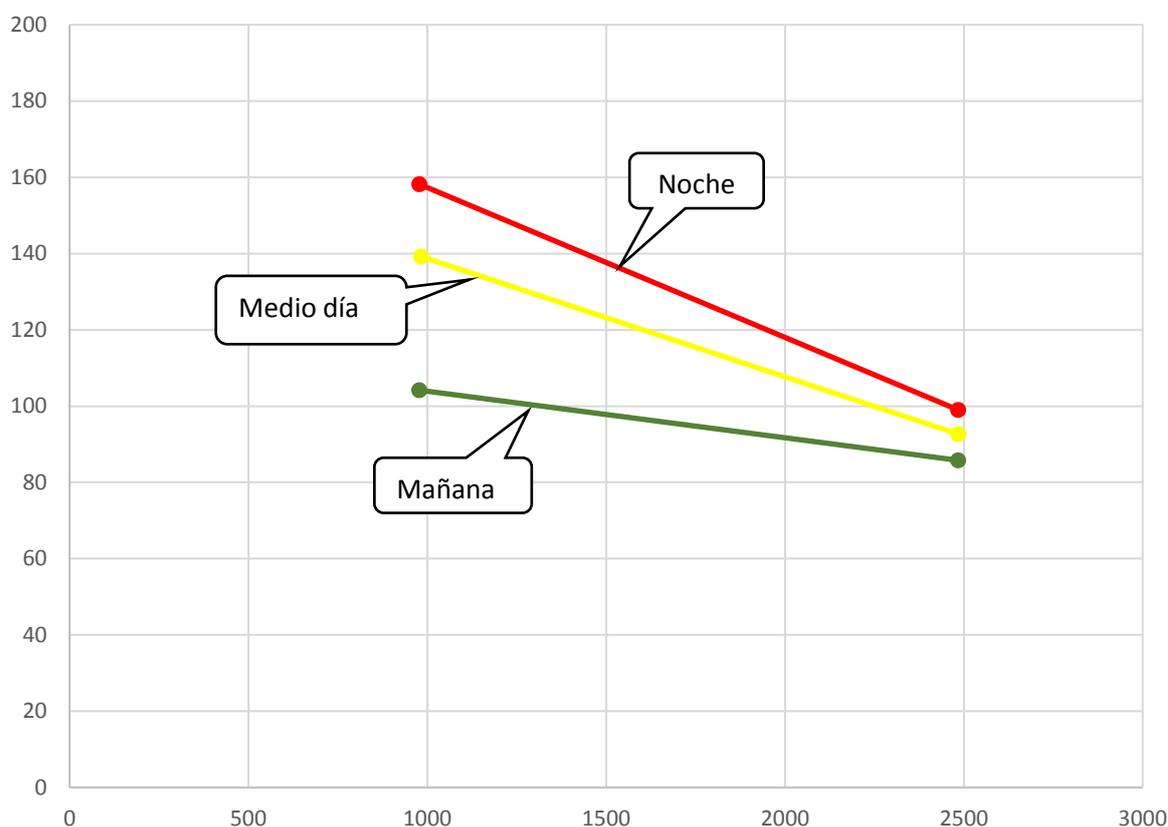


Figura 3.1 Variación de las emisiones NO_x vehículo 1

3.2 MEDICIÓN DE GASES NO_x, Vehículo 2

Para la obtención de los valores de los gases NO_x, se efectuaron las pruebas en la localidad de Quiroga, dichas mediciones fueron realizadas en diferentes horarios; en la mañana, medio día y en la noche obteniendo como resultado los valores que se muestran en la tabla 3.3.

Tabla 3.3 Valores obtenidos vehículo 2

Número de mediciones	Camioneta Chevrolet Luv D-Max 35 000 km / Quiroga					
	Ralentí mañana	2500 rpm mañana	Ralentí medio día	2500 rpm medio día	Ralentí noche	2500 en la noche
	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)
1	21	163	83	163	169	125
2	84	172	118	174	173	112
3	118	142	140	147	176	106
4	130	108	143	119	179	104
5	140	98	149	103	182	101
6	147	93	153	100	184	101
7	152	91	156	98	185	100
8	154	91	157	98	185	99
9	155	92	159	97	186	99
10	157	92	160	97	188	100
11	159	92	162	96	189	100
12	160	92	163	97	189	100
13	161	92	164	97	190	99
14	161	93	165	97	190	99
15	165	93	166	97	190	99
16	172	92	166	96	191	99
17	174	92	166	96	191	100
18	170	92	167	97	191	100
19	167	92	167	97	192	99
20	167	92	168	99	192	99
21	167	92	168	99	193	98
22	167	92	169	99	193	98
23	167	92	169	98	194	97
24	167	92	170	98	195	98
25	167	92	170	97	195	97
26	167	92	171	97	195	98
27	167	92	171	98	196	97
28	167	92	170	98	197	98
29	168	92	171	98	197	98
30	169	92	171	98	198	98
31	169	93	172	98	197	98
32	169	93	173	98	198	98

Tabla 3.3 Valores obtenidos vehículo 2 (Continuación...)

33	170	93	173	97	198	98
34	170	93	172	98	198	99
35	170	93	172	98	199	98
36	170	93	173	98	199	98
37	171	93	173	97	199	98
38	171	92	173	97	200	99
39	172	92	173	97	200	99
40	172	93	174	98	200	99
41	171	94	175	97	200	99
42	171	95	175	98	200	99
43	172	95	174	97	200	99
44	172	94	174	98	200	99
45	172	95	174	98	201	100

En la tabla 3.4, se puede observar los valores promedios obtenidos en las mediciones realizadas con el analizador portátil, en la localidad de Quiroga.

Tabla 3.4 Promedio de las pruebas realizadas vehículo 2

RPM	MAÑANA NOx (ppm)	MEDIO DÍA NOx (ppm)	NOCHE NOx (ppm)
Ralentí	158,86	163,82	192,31
2 500	97,44	102,42	99,95

En la figura 3.2, se puede apreciar que los NOx alcanzan un valor máximo de 192,31 (ppm) a ralentí en la prueba efectuada en la noche, por el contrario el valor máximo de NOx a 2 500 rpm se obtuvo en la prueba realizada a medio día, por el contrario se observó que hay una menor cantidad de emisiones NOx en la prueba realizada en la mañana tanto a ralentí como a 2 500 rpm.

Como se puede apreciar en la tabla 3.4, el valor máximo generado de emisiones NOx del vehículo de prueba Chevrolet Luv D-Max 4x2, según los parámetros de la OMS el valor obtenido, deteriora la salud humana provocando irritación en el sistema respiratorio así

como una sensación incómoda en el pecho, cabe recalcar que estas afecciones se generan en un tiempo de exposición de 1-3 horas, los NOx son considerados contaminantes primarios de alta trascendencia en los problemas de lluvia ácida y daños a las plantas.

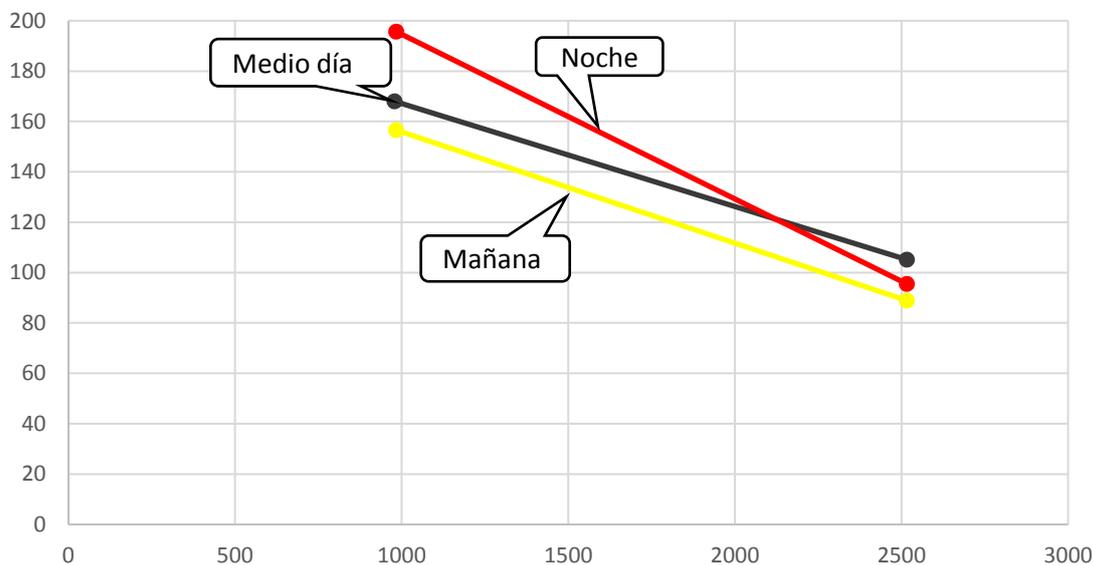


Figura 3.2 Variación de las emisiones NOx, vehículo 2

3.3 MEDICIÓN DE GASES NOx, Vehículo 3

Para la obtención de datos de emisiones NOx del vehículo Chevrolet Luv D-Max, se llevó a cabo en la localidad de Quiroga a distintos horarios; mañana, medio día y noche, cabe recalcar que este vehículo de prueba tenía un recorrido de 221 000 Km y los datos obtenidos en las pruebas se pueden visualizar en la tabla 3.5.

Tabla 3.5 Valores obtenidos vehículo 3

	Camioneta Chevrolet Luv D- Max 221 000 km /Quiroga					
	Ralentí mañana	2500 rpm mañana	Ralentí medio día	2500 rpm medio día	Ralentí noche	2500 rpm noche
Número de mediciones	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)
1	36	144	0	167	87	126
2	72	144	26	140	121	130
3	103	144	98	125	133	132
4	117	153	114	120	137	147
5	122	161	124	114	141	121

Tabla 3.5 Valores obtenidos vehículo 3 (Continuación...)

6	128	128	133	108	143	96
7	132	104	140	108	144	87
8	135	97	142	107	144	81
9	137	92	145	107	145	80
10	138	90	146	107	145	79
11	139	88	148	107	145	77
12	139	87	149	107	145	78
13	139	87	149	106	145	78
14	140	86	151	107	145	78
15	140	87	151	107	145	79
16	140	87	151	107	145	79
17	141	87	152	108	145	80
18	141	88	153	107	145	80
19	142	88	153	108	144	81
20	142	88	154	107	144	81
21	143	88	154	107	144	82
22	143	88	155	108	144	82
23	144	89	155	108	144	82
24	144	89	155	107	143	82
25	144	89	156	107	143	83
26	144	89	156	107	143	83
27	144	88	157	108	143	83
28	144	89	156	108	143	84
29	144	89	156	107	143	84
30	145	89	156	107	143	84
31	145	89	157	107	143	84
32	145	90	157	105	143	85
33	145	90	157	105	142	85
34	145	90	158	104	142	85
35	146	90	158	104	142	85
36	145	90	158	104	142	85
37	145	90	159	104	142	85
38	145	91	159	104	142	85
39	145	90	159	104	142	85
40	145	91	158	104	142	85
41	145	91	158	104	142	85
42	145	91	159	105	141	85
43	146	91	159	105	142	86

En la tabla 3.6, se puede ver los promedios obtenidos en las mediciones de los gases NOx realizadas con el analizador, en la localidad de Quiroga.

Tabla 3.6 Promedio de las pruebas realizadas vehículo 3

RPM	MAÑANA NOx (ppm)	MEDIO DÍA NOx (ppm)	NOCHE NOx (ppm)
Ralentí	137,32	145,83	141,22
2 500	96,57	108,83	88,14

La figura 3.3, permite visualizar el comportamiento de las emisiones NOx a diferentes horarios, obteniendo la mayor concentración de NOx en la prueba realizada a medio día con un valor de 145,83 (ppm) y 108,83 (ppm) tanto a ralentí como a 2 500 rpm respectivamente. Cabe mencionar que existe una diferencia del 11,26% entre la prueba realizada al medio día en referencia a la prueba realizada en la mañana a 2 500 rpm, dicha diferencia puede ser causada por mezclas de aire-combustible pobre.

El valor registrado de 145,83 (ppm) obtenidos en las pruebas realizadas al vehículo Chevrolet Luv D- Max, no representa efectos secundarios a la salud humana y medio ambiente debido a que su valor está por debajo de los parámetros considerados como perjudiciales según la OMS.

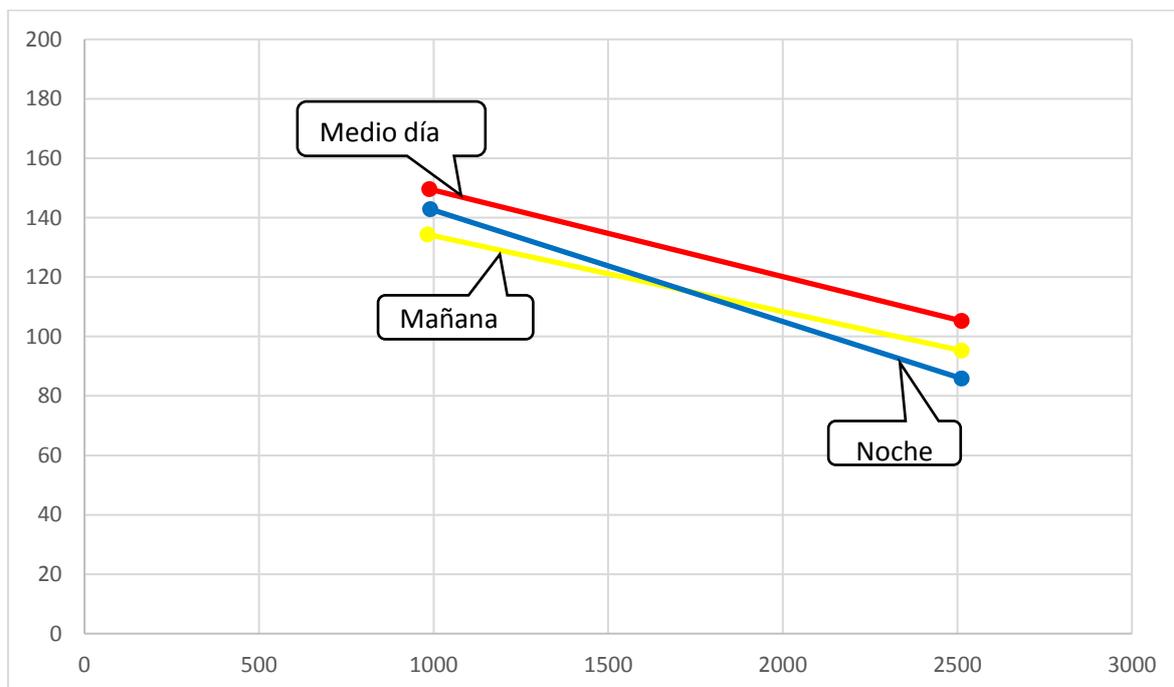


Figura 3.3 Variación de las emisiones NOx, vehículo 3

3.4 MEDICIÓN DE GASES NO_x, Vehículo 4

A continuación, se muestra en la tabla 3.7, los valores obtenidos en las pruebas de emisiones NO_x del vehículo Citroën C-elysee, realizados en la ciudad de Ibarra en dos horarios diferentes, mencionado vehículo de prueba es 0 Km.

Tabla 3.7 Valores obtenidos vehículo 4

	Citroën C-elysee 0 km / Ibarra			
	Ralentí medio día	2500 rpm medio día	Ralentí noche	2500 rpm noche
Número de mediciones	NO _x (ppm)	NO _x (ppm)	NO _x (ppm)	NO _x (ppm)
1	98	124	7	187
2	108	126	12	188
3	114	135	75	188
4	118	138	135	199
5	120	101	158	190
6	120	73	166	155
7	121	62	174	135
8	122	60	179	133
9	123	62	183	127
10	123	63	184	126
11	124	66	184	124
12	124	68	186	126
13	124	71	187	130
14	125	73	188	133
15	125	76	188	132
16	126	79	188	130
17	126	81	188	131
18	125	82	187	132
19	125	85	188	133
20	126	88	188	135
21	126	90	188	135
22	126	92	188	137
23	127	96	188	139
24	127	98	188	140
25	127	101	188	142
26	127	102	189	143
27	127	104	189	144
28	128	106	190	146
29	128	108	189	147

Tabla 3.7 Valores obtenidos vehículo 4 (**Continuación...**)

30	128	110	189	148
31	128	111	189	149
32	128	114	189	150
33	128	116	189	151
34	128	117	188	151
35	129	118	189	152
36	129	119	188	153
37	129	121	188	154
38	129	123	188	155
39	129	125	188	157
40	129	127	188	158
41	129	128	188	158
42	129	129	188	159
43	129	131	188	160
44	129	132	188	161
45	130	133	188	161
46	130	135	188	162
47	129	133	188	162
48	130	135	188	163

En la tabla 3.8, se muestra un análisis estadístico básico, con la finalidad de obtener valores promedios de las pruebas realizadas a diferentes regímenes del motor y horarios.

Tabla 3.8 Promedio de las pruebas realizadas vehículo 4

RPM	MEDIO DÍA NOx (ppm)	NOCHE NOx (ppm)
Ralentí	125,18	175,39
2 500	103,47	149,39

Mediante la figura 3.4, se demuestra que existe mayor concentración de emisiones NOx en la prueba realizada en la noche, con un valor de 175,39 (ppm) a ralentí y existe una disminución del 14,82% cuando las revoluciones aumentaron a 2 500 rpm, en tanto la prueba realizada a medio día generó una diferencia del 17,34% entre los dos regímenes de giro del motor.

Los efectos producidos por la contaminación atmosférica dependen principalmente de la concentración de contaminantes, en este caso el valor obtenido en las pruebas realizadas al

vehículo Citroën C-elysee registró un valor de 175,39 (ppm), descrito valor afecta a la función pulmonar y empeora las enfermedades crónicas como el enfisema y bronquitis en un lapso de tiempo de 2-5 horas, los períodos de exposición cambian según el tipo y concentración del contaminante, referente al cambio climático habrá variación en los ecosistemas acuáticos y terrestres.

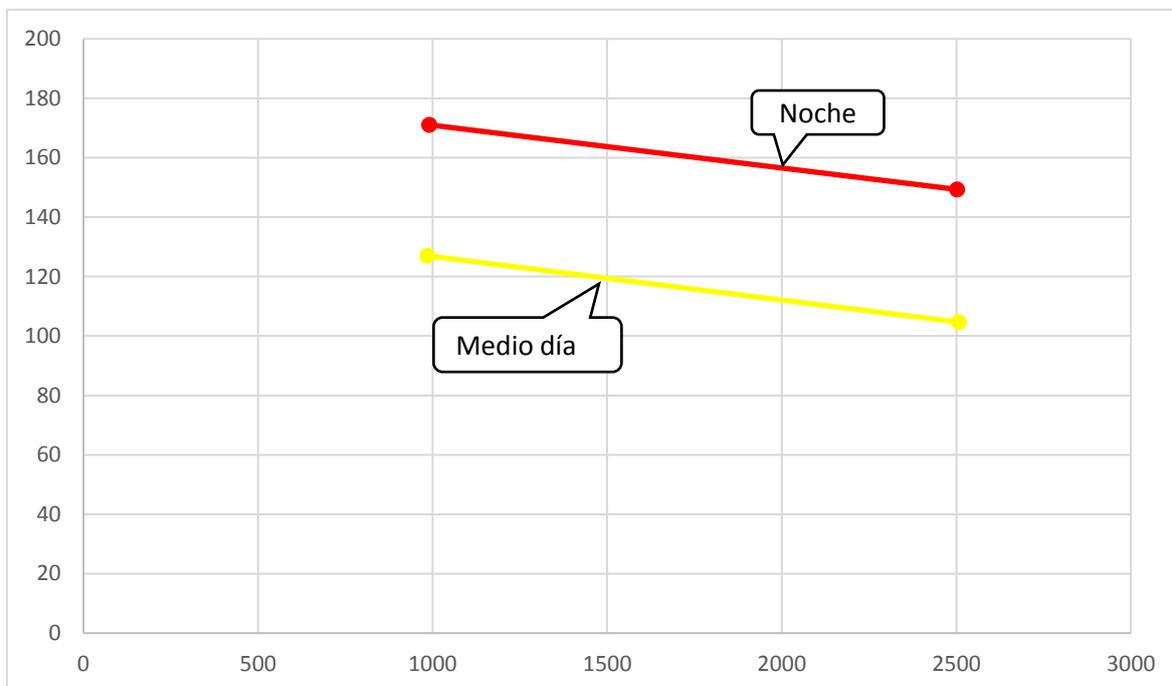


Figura 3.4 Variación de las emisiones NOx, vehículo 4

3.5 MEDICIÓN DE GASES NOx, Vehículo 5

En la siguiente tabla 3.9, se detallan los datos obtenidos de las mediciones NOx realizadas al vehículo Citroën C-elysee en la ciudad de Ibarra, el cual posee un kilometraje de recorrido de 109 000 Km, datos que servirán para la comparación con el vehículo de prueba número 4.

Tabla 3.9 Valores obtenidos vehículo 5

	Citroën C-elysee 109 000 km / Ibarra			
	Ralentí mañana	2500 rpm mañana	Ralentí medio día	2500 rpm medio día
Número de mediciones	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)
1	214	122	122	171
2	217	121	166	170
3	249	125	186	181

Tabla 3.9 Valores obtenidos vehículo 5 (Continuación...)

4	379	133	194	178
5	316	111	197	148
6	270	79	197	122
7	237	67	197	111
8	222	63	196	108
9	203	63	195	108
10	190	64	195	110
11	187	65	195	110
12	195	67	194	113
13	203	68	194	115
14	206	70	194	116
15	214	71	192	118
16	210	73	190	120
17	211	76	189	123
18	210	78	189	124
19	205	80	188	125
20	194	82	187	127
21	188	85	186	129
22	184	87	185	131
23	190	89	184	133
24	201	91	184	135
25	203	92	184	136
26	205	96	184	135
27	207	98	183	137
28	209	99	182	139
29	206	101	181	141
30	201	104	180	141
31	190	105	180	142
32	182	107	180	144
33	191	107	179	144
34	199	108	178	145
35	200	109	178	146
36	176	110	178	148
37	129	111	177	149
38	149	113	177	150
39	180	115	176	152
40	276	117	176	153

Posteriormente se puede observar en la tabla 3.10, los promedios obtenidos mediante la ejecución de las mediciones de los gases NOx, en la ciudad de Ibarra.

Tabla 3.10 Promedio de las pruebas realizadas vehículo 5

RPM	MAÑANA NOx (ppm)	MEDIO DÍA NOx (ppm)
Ralentí	209,95	184,22
2 500	93,05	135,7

Como se puede observar en la figura 3.5, los NOx muestran un decrecimiento del 55,6% en referencia a la variación de las revoluciones de giro del motor en la prueba realizada en la mañana, por el contrario, existe una reducción del 12,25% entre la prueba de la mañana y medio día a ralentí y un aumento del 31% en concentraciones NOx a 2 500 rpm.

La salud humana se ve afectada cuando se encuentra expuesta por largos períodos a las emisiones contaminantes que producen los motores Diésel, estos efectos dependen de la concentración y la susceptibilidad de las personas expuestas, provocando enfermedades cardiovasculares y la disminución de la función pulmonar en niños y adultos, y afectando seriamente a la producción alimenticia mundial debido al impacto generado en el cambio climático.

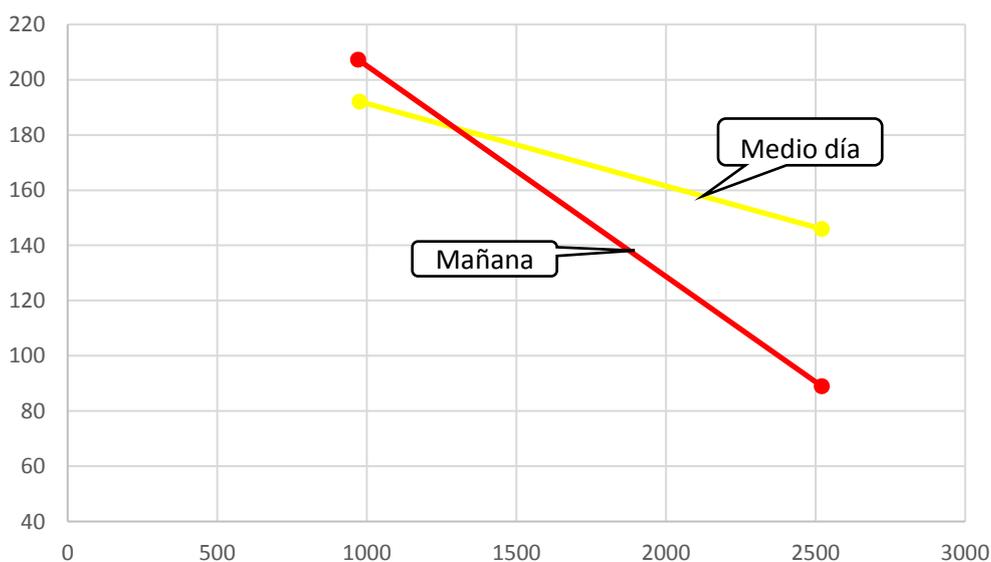


Figura 3.5 Variación de las emisiones NOx, vehículo 5

Mediante las pruebas realizadas y una vez obtenidos los valores de emisiones NOx, se demostró que el vehículo de marca Chevrolet, modelo Luv D-Max 4x4 CRDI 3 000 cc, misma que tenía un recorrido de 35 000 Km, denominada categoría (CL3) por la normativa internacional mexicana, registró la mayor concentración de emisiones NOx con un valor de 192,31 (ppm) en la prueba estática a ralentí, en comparación a los valores obtenidos de los vehículos de prueba de la misma categoría.

Por el contrario, la mayor concentración de NOx a 2 500 rpm, registro un valor de 108,83 (ppm) correspondiente al vehículo Chevrolet, modelo Luv D-Max 4x2 CRDI con un kilometraje de 221 000 Km, categoría (CL3) como se indica en la tabla 3.11.

Tabla 3.11 Valores máximos de NOx según su categoría

RPM	CATEGORÍA		NORMA MEXICANA
	(CL3) NOx (ppm)	(VP) NOx (ppm)	NOM-167-SEMARNAT NOx (ppm)
Ralentí	192,31	209,95	1 000
2 500	108,83	149,39	

Para el vehículo de prueba marca Citroën, modelo C-elysee el cual tenía un recorrido de 109 000 Km, categorizado bajo las siglas (VP) según la normativa mexicana, registro un valor máximo de 209,95 (ppm) de emisiones NOx en la prueba a ralentí, por el contrario, el vehículo de la misma categoría nuevo registro un valor de 149,39 (ppm) a 2 500 rpm como se muestra en la tabla 3.11.

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1 CONCLUSIONES

- Las propiedades que influyen directamente en la formación de NO_x, en el proceso de combustión son; la temperatura del gas, la cantidad de oxígeno y la presión en el cilindro, siendo la presión la propiedad que menos influye en relación a la temperatura, ya que la cantidad de NO_x depende directamente de la concentración de oxígeno y la temperatura.
- Mediante la realización de las pruebas estáticas de emisiones NO_x, se determinó que los vehículos de prueba categoría (VP) generaron mayores concentraciones de NO_x en relación a los vehículos de prueba categoría (CL3) en un 8,40% en la prueba a ralentí, mientras que en la prueba realizada a 2 500 rpm se obtuvo una disminución en las emisiones NO_x del 27% en los vehículos de categoría (CL3)
- En la actualidad las normas ambientales vigentes registran una disminución del 93% en emisiones NO_x, logrando reducir las afectaciones a la salud humana por resistencia de las vías respiratorias.

4.2 RECOMENDACIONES

- Ampliar el conocimiento de los procesos de formación de NOx asociados a combustibles alternativos.
- Se recomienda efectuar pruebas dinámicas para el control de emisiones del motor Diésel en referencia a la gestión ambiental del aire de la Norma Técnica Ecuatoriana.
- Se recomienda no exponerse a las emisiones contaminantes del vehículo por largos lapsos de tiempo.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acevedo, C. (Enero de 2007). Determinación experimental de factores de emisión en vehículos pesados de transporte público. Santiago de Chile , Chile: Universidad de Chile.
2. Amorim, R. (Noviembre de 2010). Combustión por difusión de baja temperatura en motores Diésel de pequeña cilindrada . *Universidad politécnica de Valencia* . Valencia, España .
3. Automotores Continental . (2018). *Chevrolet* . Obtenido de <https://automotorescontinental.com.ec/vehiculos/d-max-diesel-3-0-cd-4x4>
4. Bartsch, C. (2001). *Revolucion del motor Diesel* . Barcelona: CEAC.
5. Blasco, V. (2012). *Tecnilibros Historia de motor Diesel*. Obtenido de http://www.geocities.ws/tecnilibros/articulos/Biografia_Diesel.pdf
6. Bosch. (27 de Abril de 2018). *Bosch Service*. Obtenido de <http://www.automocionjovimar.com/noticias-taller-torre vieja-alicante/bosch-car-service-logro-la-nueva-tecnologia-diesel-de-bosch-puede-solucionar-el-problema-del-nox-103392>
7. Bosch, R. (2005). Sistemas de inyección Diésel por acumulador Common Rail. En R. Bosch, *Sistemas de inyección Diésel por acumulador Common Rail*. Madrid: Reverte.
8. Boza, A. (11 de Agosto de 2016). *The motor home*. Obtenido de <https://themotorhome.net/cuidar-filtro-particulas-dpf/>
9. Campos, G. (2015). Desarrollo y evaluación de un filtro de partículas. *Universidad Autónoma de nuevo León*. México, México.
10. Campos, G. (Julio de 2015). *Tesis*. Obtenido de http://eprints.uanl.mx/11789/1/1080215623.pdf?fbclid=IwAR2aEGJdp4apelNugl_C2B_UDBhLV8bgfSTCgEmmrLROPB2uEqM01Yu0U8I
11. Carnicer, J. (2008). *Contaminación atmosférica* . Obtenido de <https://www.eoi.es/es/file/18607/download?token=DQeBhR8t>
12. Castillejo, A. (2014). Sistemas de inyección en motores Diésel . Sevilla , España : Universidad de Sevilla .

13. CICEV. (2016). Evaluación de la factibilidad de colocación de dispositivos reductores de emisiones en el parque automotor. Quito , Pichincha , Ecuador .
14. Cortés, P. (Noviembre de 2010). Teoría y desarrollo de un sistema de dilución para la medición de emisiones de motores ciclo Diésel. Quito, Ecuador : Escuela Politécnica Nacional .
15. Denso Corporation . (21 de Enero de 2019). *DENSO Crafting the Core* . Obtenido de <https://www.denso.com/es/es/innovation/story/i-art/>
16. Dominguez, & Ferrer. (2013). Transporte y mantenimiento de vehiculos . En Dominguez, & Ferrer, *Transporte y mantenimiento de vehiculos*. Madrid: Editex.
17. Escuela de organización industrial. (08 de Octubre de 2015). *E.O.I.* Obtenido de <https://www.eoi.es/blogs/redinnovacionEOI/2015/10/08/los-motores-diesel-y-la-contaminacion/?fbclid=IwAR3z4vjMSXRrC5Wx-8vFe1L15h-qz-3Io3qjGGe5VA9jMwl0WPjDgLNgVkU>
18. García del Río, J. (2017). Mantenimiento de los sistemas auxiliares del motor de ciclo Diésel . España: Elearning.
19. García, A. (27 de Noviembre de 2009). Estudio de los efectos de la postinyección sobre el proceso de combustión y la formación de hollín en motores Diésel. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia.
20. Gil, H. (2002). Sistemas de Inyección Diésel . En H. Gil, *Sistemas de Inyección Diésel* (pág. 8). Barcelona: CEAC.
21. Globaltech. (2018). *Analizador de gases Kane*. Obtenido de <https://www.globaltechla.com/product/analizador-de-gases-portatil-kane/>
22. GM Colmotores. (17 de Julio de 2017). Obtenido de https://automovilescolombia.com/noticias/colombia-ya-ruedan-vehiculos-comerciales-motores-euro-v_2023
23. Gonzalez, D. (2015). Mantenimiento de motores térmicos de dos y cuatro tiempos . En D. Gonzalez, *Mantenimiento de motores térmicos de dos y cuatro tiempos*. Madrid: Paraninfo .
24. INEN. (2002). *Norma Técnica Ecuatoriana* . Obtenido de <http://www.competencias.gob.ec/wp-content/uploads/2017/06/03NOR2000-INEN04.pdf>
25. Luna, & Mier. (Junio de 2014). *Tesis*. Obtenido de <http://repositorio.uide.edu.ec/bitstream/37000/881/1/T-UIDE->

- 0746.pdf?fbclid=IwAR0X8Bm7hdvjGzB5oWuSlh91naTBo84Jvs6-6WId9DMs3Sd-mxY30eOc-Eo
26. Mafla, M., & Ortiz, M. (2007). Metodología para certificar la calibración de los analizadores de gases y opacímetros . Quito , Pichincha , Ecuador .
 27. Molina, S. (2005). influencia de los parametros de inyeccion y la recirculacion de gases de escape sobre el proceso de combustion en un motor Diésel. Barcelona: Reverté.
 28. Moreno, B. (23 de Marzo de 2009). Análisis del proceso de la recirculación de los gases de escape de baja presión en motores Diésel sobrealimentados . *Universidad Politécnica de Valencia* . Valencia, España.
 29. Muñoz, A., Quiroz, C., & Paz, J. (2006). Efectos de la contaminación atmosférica sobre la salud en adultos que laboran a diferentes niveles de exposición. *Universidad de Antioquia*. Medellín, Colombia.
 30. Ortiz, M. (2014). Estudio comparativo del diesel entre Europa y Ecuador . Quito, Pichincha, Ecuador .
 31. Paredes, R., & Ichau, M. (2013). Investigación de emisiones contaminantes . Ibarra, Imbabura, Ecuador .
 32. Parera, A. (2002). Inyección electrónica en motores Diésel . En A. Parera, *Inyección electrónica en motores Diésel* . Barcelona: Boada.
 33. Peiró, P. (2015). Modelado CFD del proceso de combustión en un motor Diésel de pequeña cilindrada. Valencia, España: Universidad Politécnica de Valencia .
 34. Querol, X. (2018). *La calidad del aire en las ciudades*. Obtenido de <http://www.fundacionnaturgy.org/wp-content/uploads/2018/06/calidad-del-aire-reto-mundial.pdf?fbclid=IwAR3RELqn6vEChxbtvtm-2EXSpOdETJJebMEFFqwLUBxsYOcHZ9ZpoKITts>
 35. Rojas, D. (3 de Octubre de 2015). *El diario.es*. Obtenido de https://www.eldiario.es/sociedad/diesel-contaminacion-salud_0_436406893.html
 36. Sanz, S. (2017). Motores. En S. Sanz, *Motores* (pág. 54). Madrid: Editex S.A.
 37. SEGOB. (7 de Septiembre de 2005). *Normas mexicanas* . Obtenido de <http://www.profepa.gob.mx/innovaportal/file/1208/1/nom-042-semarnat-2003.pdf>
 38. SEGOB. (7 de Junio de 2017). *Normas mexicana* . Obtenido de http://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5440157&fecha=07/06/2016

39. Total. (Enero de 2019). *Tecnología e innovación normas Euro*. Obtenido de <https://www.total.es/nuestros-productos/tecnologia-e-innovacion/las-normas-euro-de-control-de-emisiones-contaminantes>
40. Villegas, A. (18 de enero de 2007). *Motor de combustión interna* . Obtenido de <http://kimerius.com/app/download/5783856817/Motores+de+combusti%C3%B3n+interna.pdf>
41. Zbarcea, O., & tal, e. (2016). *Enviromental pollution by Diesel engines* . *University of Galati* , 5.

ANEXOS

ANEXO I

PRUEBAS REALIZADAS EN EL VEHÍCULO CHEVROLET LUV- D MAX



Figura AI. 1 Colocación de la sonda de medición.

ANEXO II



Figura AII.2 Obtención de valores de las mediciones NOx

ANEXO III

PRUEBAS REALIZADAS EN EL VEHÍCULO CITROEN C-ELYSEE



Figura AIII.3 Colocación del analizador portátil

ANEXO IV



Figura AIV.4 Obtención de datos

ANEXO V

Camioneta Chevrolet Luv D-Max Nueva / Urcuquí					
Ralentí mañana	2500 rpm mañana	Ráleri medio día	2500 rpm medio día	Ralentí noche	2500 rpm noche
NOx ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)
144	147	5	130	10	102
144	7	5	132	11	98
144	8	22	118	44	94
144	7	70	95	110	92
144	44	102	89	144	91
144	116	104	85	156	90
143	133	110	80	166	90
144	139	113	-	172	89
144	140	117	71	175	89
144	148	119	70	177	89
144	137	119	70	178	89
143	102	119	70	179	89
143	81	120	71	181	89
143	79	121	71	182	89
144	75	121	73	183	88
145	74	123	74	184	88
144	75	124	-	184	89
145	75	124	74	184	89
145	76	125	75	185	89
145	76	125	76	185	88
145	77	125	-	186	88
145	78	125	76	186	87
145	78	124	76	186	87
145	79	126	75	186	88
144	79	126	76	186	88
145	79	127	76	188	88
145	79	126	75	188	88
145	80	126	75	188	88
145	80	126	76	188	88
146	80	126	-	188	89
146	81	127	76	188	89
145	81	128	76	188	89

Figura AV.5 Valores obtenidos Camioneta Chevrolet Luv D-Max/Urcuquí

ANEXO VI

Camioneta Chevrolet Luv D-Max 35 000 km / Quiroga					
Ralentí mañana	2500 rpm mañana	Ralentí medio día	2500 rpm medio día	Ralentí noche	2500 en la noche
NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)
21	163	83	163	169	125
84	172	118	174	173	112
118	142	140	147	176	106
130	108	143	119	179	104
140	98	149	103	182	101
147	93	153	100	184	101
152	91	156	98	185	100
154	91	157	98	185	99
155	92	159	97	186	99
157	92	160	97	188	100
159	92	162	96	189	100
160	92	163	97	189	100
161	92	164	97	190	99
161	93	165	97	190	99
165	93	166	97	190	99
172	92	166	96	191	99
174	92	166	96	191	100
170	92	167	97	191	100
167	92	167	97	192	99
167	92	168	99	192	99
167	92	168	99	193	98
167	92	169	99	193	98
167	92	169	98	194	97
167	92	170	98	195	98
167	92	170	97	195	97
167	92	171	97	195	98
167	92	171	98	196	97
167	92	170	98	197	98
168	92	171	98	197	98
169	92	171	98	198	98
169	93	172	98	197	98
169	93	173	98	198	98
170	93	173	97	198	98
170	93	172	98	198	99

Figura AVI.6 Valores obtenidos Camioneta Chevrolet Luv D-Max/Quiroga

ANEXO VII

Camioneta Chevrolet Luv D- Max 221 000 km /Quiroga					
Ralentí mañana	2500 rpm mañana	Ralentí medio día	2500 rpm medio día	Ralentí noche	2500 rpm noche
NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)
36	144	0	167	87	126
72	144	26	140	121	130
103	144	98	125	133	132
117	153	114	120	137	147
122	161	124	114	141	121
128	128	133	108	143	96
132	104	140	108	144	87
135	97	142	107	144	81
137	92	145	107	145	80
138	90	146	107	145	79
139	88	148	107	145	77
139	87	149	107	145	78
139	87	149	106	145	78
140	86	151	107	145	78
140	87	151	107	145	79
140	87	151	107	145	79
141	87	152	108	145	80
141	88	153	107	145	80
142	88	153	108	144	81
142	88	154	107	144	81
143	88	154	107	144	82
143	88	155	108	144	82
144	89	155	108	144	82
144	89	155	107	143	82
144	89	156	107	143	83
144	89	156	107	143	83
144	88	157	108	143	83
144	89	156	108	143	84
144	89	156	107	143	84
145	89	156	107	143	84
145	89	157	107	143	84
145	90	157	105	143	85
145	90	157	105	142	85
145	90	158	104	142	85
146	90	158	104	142	85
145	90	158	104	142	85
145	90	159	104	142	85
145	91	159	104	142	85
145	90	159	104	142	85
145	91	158	104	142	85

Figura AVII.7 Valores obtenidos Camioneta Chevrolet Luv D-Max/Quiroga

ANEXO VIII

Citroën C-elysee 0 km / Ibarra			
Ralentí medio día	2500 rpm medio día	Ralentí noche	2500 rpm noche
NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)
98	124	7	187
108	126	12	188
114	135	75	188
118	138	135	199
120	101	158	190
120	73	166	155
121	62	174	135
122	60	179	133
123	62	183	127
123	63	184	126
124	66	184	124
124	68	186	126
124	71	187	130
125	73	188	133
125	76	188	132
126	79	188	130
126	81	188	131
125	82	187	132
125	85	188	133
126	88	188	135
126	90	188	135
126	92	188	137
127	96	188	139
127	98	188	140
127	101	188	142
127	102	189	143
127	104	189	144
128	106	190	146
128	108	189	147
128	110	189	148
128	111	189	149
128	114	189	150
128	116	189	151
128	117	188	151
129	118	189	152
129	119	188	153
129	121	188	154
129	123	188	155
129	125	188	157
129	127	188	158

Figura AVIII.8 Valores obtenidos en el vehículo Citroën C-elysee/Ibarra

ANEXO IX

Citroën C-elysee 109 000 km / Ibarra			
Ralentí mañana	2500 rpm mañana	Ralentí medio día	2500 rpm medio día
NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)	NOx (ppm)
214	122	122	171
217	121	166	170
249	125	186	181
379	133	194	178
316	111	197	148
270	79	197	122
237	67	197	111
222	63	196	108
203	63	195	108
190	64	195	110
187	65	195	110
195	67	194	113
203	68	194	115
206	70	194	116
214	71	192	118
210	73	190	120
211	76	189	123
210	78	189	124
205	80	188	125
194	82	187	127
188	85	186	129
184	87	185	131
190	89	184	133
201	91	184	135
203	92	184	136
205	96	184	135
207	98	183	137
209	99	182	139
206	101	181	141
201	104	180	141
190	105	180	142
182	107	180	144
191	107	179	144
199	108	178	145
200	109	178	146
176	110	178	148
129	111	177	149
149	113	177	150
180	115	176	152
276	117	176	153

Figura AIX.9 Valores obtenidos en el vehículo Citroën C-elysee/Ibarra