

ESTUDIO ANALÍTICO Y EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL
NÚMERO DE CETANO EN EL DESEMPEÑO, EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
EMISIONES DE MOTORES DIÉSEL

JOHAN SEBASTIAN GARCIA RAMIREZ
MARLON JAHIR OSORIO VILLAMIZAR



UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2021

ESTUDIO ANALÍTICO Y EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL
NÚMERO DE CETANO EN EL DESEMPEÑO, EFICIENCIA ENERGÉTICA Y
EMISIONES DE MOTORES DIÉSEL

JOHAN SEBASTIAN GARCIA RAMIREZ
MARLON JAHIR OSORIO VILLAMIZAR

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Director:

JORGE LUIS CHACÓN VELASCO
PhD. INGENIERÍA MECÁNICA

Codirectores:

SANDRO FARUC GONZALEZ GARNICA
MSc. INGENIERÍA QUÍMICA
EDGAR FERNANDO CASTILLO MONROY
PhD. INGENIERÍA QUÍMICA

UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD INGENIERÍAS FÍSICO – MECÁNICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BUCARAMANGA

2021

DEDICATORIA

A mis padres, por brindarme su apoyo incondicional en todos los proyectos y metas que me he trazado a lo largo de mi vida, gracias por su amor y por sus enseñanzas.

A mi abuela, que en paz descanse, por quererme tanto mientras vivió, siempre deseando que cumpliera mis sueños.

A mis hermanos, por querer siempre lo mejor para mí, gracias por su apoyo.

A Dios, por darme la capacidad de seguir adelante pese a los obstáculos, brindándome la sabiduría e inteligencia que necesitaba.

A mis amigos, por permitirme compartir esta experiencia junto a ellos.

Sebastián

DEDICATORIA

A mis padres, Cesar Augusto y Luz Helena, por ser la principal motivación en mi vida, por sus incansables esfuerzos que me permiten terminar este sueño. Son ustedes las base de mi formación personal y profesional.

A mi hermano, Johan Sneider, por ser una de las razanos para crecer cada día como persona. Por todo su apoyo y compañía durante este proceso.

A mis abuelos, María Elena, Hernando y a los que están ahora en un mejor lugar, por sus consejos y apoyo infinito desde el comienzo de este gran sueño.

A mis amigos y compañeros, porque fueron el apoyo en los momentos de caídas durante el proceso de estudio.

A mis profesores, por el tiempo y conocimiento brindado para mi crecimiento.

Este triunfo no es solo mío, es por ustedes y para ustedes, gracias infinitas.

Marlon

AGRADECIMIENTOS

A Jorge Luis Chacón Velasco, Ingeniero Mecánico y nuestro director de proyecto, por darnos la confianza y brindarnos su apoyo en la realización de este trabajo.

A Sandro Faruc Gonzales y José Luis Sarmiento, un especial y emotivo agradecimiento por apoyarnos durante la realización del proyecto, por su dedicación para con nosotros, por sus consejos y enseñanzas.

Al ingeniero Edgar Fernando Castillo Monroy, por guiarnos en el planteamiento y enfoque de nuestro proyecto.

Al ingeniero Gabriel Fernando García, Ingeniero Mecánico, por permitirnos usar su programa de simulación y compartir su conocimiento con nosotros.

A la Universidad Industrial de Santander, a sus profesores y trabajadores, por contribuir con nuestra formación académica y profesional.

CONTENIDO

	pág.
INTRODUCCIÓN	14
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	17
2. OBJETIVOS.....	20
2.1 OBJETIVO GENERAL	20
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	20
3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN.....	22
4. MARCO REFERENCIAL	24
4.1 MOTORES DIESEL	24
4.1.1 Motores de Combustión Interna.....	24
4.1.2 Motores de Combustión Interna Alternativa.....	26
4.1.2.1 Ciclo diésel de 4 tiempos.	28
4.1.2.2 Inyección directa diésel.....	30
4.1.3 Parámetros de operación y desempeño.	31
4.1.3.1 Geometría del motor.	31
4.1.3.2 Potencia, torque y eficiencia.	32
4.1.3.3 Consumo específico de combustible y eficiencia térmica.	34
4.1.4 Combustible diésel.....	35
4.1.4.1 Número de cetano.	36
4.1.4.2 Punto de inflamación.....	36
4.1.4.3 Rango de ebullición.	36
4.1.4.4 Densidad.....	36
4.1.4.5 Azufre.....	37
4.1.4.6 Aditivos.	37
4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA	37
4.2.1 Desempeño en Motores Diesel.....	38
4.2.2 Modelos multi-dimensionales, cero-dimensionales y cuasi-dimensionales...	39

4.2.3 Número de cetano en el combustible.....	41
5. MODELO CERO-DIMENSIONAL IMPLEMENTADO.....	45
5.1 METODOLOGÍA	45
5.1.1 Descripción del modelo.....	45
5.1.2 Balance de energía.....	46
5.1.3 Calor liberado en la combustión.....	46
5.1.4 Tiempo de retardo en la ignición.....	47
5.1.5 Calor transferido en las paredes.....	48
5.1.6 Volumen, cilindrada y área de transferencia de calor.....	49
5.1.7 Relación de calores específicos de la mezcla de gases.....	49
5.1.8 Trabajo bruto, potencia y eficiencia térmica indicada.....	50
5.2 INTERFAZ DE USUARIO	50
5.3 SIMULACIONES EN EL MODELO CERO-DIMENSIONAL.....	52
5.3.1 Consideraciones principales.....	53
5.3.2 Validación del modelo para la Camioneta Pick Up 2008.....	56
5.3.2.1 Presión vs. ángulo de giro.....	57
5.3.2.2 Potencia indicada vs. Régimen de giro del motor.....	58
5.3.2.3 Eficiencia térmica indicada vs. Dosado.....	59
5.3.3 Validación del modelo para la Camioneta Pick Up 2020.....	60
5.3.3.1 Presión vs. ángulo de giro.....	61
5.3.3.2 Potencia indicada vs. Régimen de giro del motor.....	61
5.3.3.3 Eficiencia térmica indicada vs. Dosado.....	62
6. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMBUSTIBLE.....	64
6.1 CARACTERIZACIÓN DEL EXPERIMENTO.....	64
6.1.1 Combustible.....	64
6.1.2 Dinamómetro.....	65
6.1.3 Ciclo FTP.....	67
6.1.4 Horiba.....	70
6.2 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO.....	73
6.2.1 Montaje de los equipos.....	74
6.2.2 Pruebas Experimentales Camioneta Pick Up 2008.....	77

6.2.2.1 Pruebas de desempeño.....	78
6.2.2.2 Pruebas de emisiones y consumo.	81
6.2.3 Pruebas Experimentales Camioneta Pick Up 2020.	83
6.2.3.1 Pruebas de desempeño.....	84
6.2.3.2 Pruebas de emisiones y consumo.	88
7. ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	92
7.1 Camioneta Pick Up 2008	92
7.1.1 Análisis de desempeño.....	92
7.1.2 Análisis de consumo y emisiones.	92
7.2 Camioneta Pick Up 2020	94
7.2.1 Análisis de desempeño.....	94
7.2.2 Análisis de consumo y emisiones.	94
8. CONCLUSIONES	96
9. RECOMENDACIONES.....	98
BIBLIOGRAFÍA.....	99

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Requisitos de calidad del combustible diésel y sus mezclas con biocombustibles.	18
Tabla 2. Datos técnicos de los vehículos	53
Tabla 3. Propiedades del combustible usado en pruebas experimentales	54

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Relación de reducción de emisiones de MP y NOx	17
Figura 2. Reservas de petróleo colombiano	19
Figura 3. Resultados análisis desempeño número de cetano vs Bx.....	23
Figura 4. Dibujos de la patente de Otto Motor de gas.....	25
Figura 5. Clasificación de los motores de combustión interna.	26
Figura 6. Primer motor operativo diseñado por Diesel.....	27
Figura 7. Motor Diesel de Mercedes 260D	28
Figura 8. Ciclo de operación de 4 tiempos.....	29
Figura 9. Inyección directa e indirecta.	30
Figura 10. Geometría básica del motor.....	31
Figura 11. Rendimiento de un automóvil con motor de cuatro tiempos, acelerador completamente abierto.	34
Figura 12. Formulario de presentación	51
Figura 13. Formulario de introducción de datos.....	51
Figura 14. Formulario de resultados	52
Figura 15. Comparación entre curvas experimentales y simuladas de potencia vs. régimen de giro de la Camioneta 2008.....	56
Figura 16. Presión en cámara vs. Angulo de giro del cigüeñal para diferente número de cetano – Camioneta Pick Up 2008.....	57
Figura 17. Potencia vs. Régimen de giro para diferente número de cetano- Camioneta Pick Up 2008	58
Figura 18. Eficiencia térmica vs. Dosado para diferentes números de cetano – Camioneta Pick Up 2008.	59
Figura 19. Comparación entre curvas dada por el fabricante y simuladas de potencia vs. régimen de giro de la Camioneta 2020	60
Figura 20. Presión en cámara vs. Angulo de giro del cigüeñal para diferente número de cetano – Camioneta Pick Up 2020.....	61
Figura 21. Potencia vs. Régimen de giro para diferente número de cetano- Camioneta Pick Up 2020	62
Figura 22 Eficiencia térmica vs. Dosado para diferentes números de cetano – Camioneta Pick Up 2008.	63
Figura 23. Dinamómetro Mustang MD-AWD-150	65
Figura 24. Ciclo FTP-72.....	68
Figura 25. Ciclo FTP-75.....	69
Figura 26. OBS-ONE (Horiba)	70
Figura 27. Configuración del Sistema OBS-ONE.....	71

Figura 28. Esquema de funcionamiento del medidor de material particulado.....	72
Figura 29. Sistema de medición de combustible.....	74
Figura 30. Software de análisis del ciclo FTP	75
Figura 31. Distribución de las conexiones (Horiba).....	76
Figura 32. Sistema OBS-ONE (Horiba)	77
Figura 33. Montaje Camioneta Pick Up 2008	78
Figura 34. Ciclo FTP – Camioneta Pick Up 2008.....	79
Figura 35. Potencia vs. Régimen de giro del motor – Camioneta Pick Up 2008....	80
Figura 36. Torque vs Régimen de giro del motor – Camioneta Pick Up 2008.	81
Figura 37. Resultados con diferente número de cetano de la Camioneta Pick Up 2008 para: a) CO, b) CO ₂ , c) NO, d) NO _x , e) NO ₂ , f) Consumo, g) PN, h) PM, i) NMHC, j) THC.....	82
Figura 38. Montaje Camioneta Pick Up 2020.	84
Figura 39. Potencia vs. Régimen de giro del motor – Camioneta Pick Up 2020....	85
Figura 40. Torque vs Régimen de giro del motor – Camioneta Pick Up 2020	86
Figura 41. Curvas de torque y potencia Camioneta Pick Up 2020.....	87
Figura 42. Ciclo FTP Camioneta Pick Up 2020.....	88
Figura 43. Resultados con diferente número de cetano de la camioneta Pick Up 2020 para: a) CO, b) CO ₂ , c) NO, d) NO _x , e) NO ₂ , f) Consumo, g) PN, h) PM, i) NMHC, j) THC.....	89
Figura 44. Variación porcentual de CO, NO, NO _x y NO ₂ - Camioneta Pick Up 2008.	93
Figura 45. Variación porcentual de CO ₂ , NO, NO _x , NO ₂ y PN - Camioneta Pick Up 2020.....	95

RESUMEN

TÍTULO: ESTUDIO ANALÍTICO Y EXPERIMENTAL DEL EFECTO DE LA VARIACIÓN DEL NÚMERO DE CETANO EN EL DESEMPEÑO, EFICIENCIA ENERGÉTICA Y EMISIONES DE MOTORES DIÉSEL*

AUTORES: JOHAN SEBASTIAN GARCIA RAMIREZ, MARLON JAHIR OSORIO VILLAMIZAR**

PALABRAS CLAVE: DIESEL, MOTORES DE COMBUSTION INTERNA, EMISIONES, DESEMPEÑO, CONSUMO DE COMBUSTIBLE, NÚMERO DE CETANO.

DESCRIPCIÓN: En este documento se presenta el análisis analítico y experimental de la variación del número de cetano en el combustible en motores diésel de diferentes especificaciones. El análisis se desarrolló mediante la utilización del modelo cero-dimensional desarrollado por el grupo GIEMA de la EIM. Posteriormente se realizó la validación de los resultados de manera experimental en el laboratorio de motores del Centro de Innovación y Tecnología (ICP) donde se pudo identificar si el modelo podía representar la influencia de la variación del número de cetano en el combustible, en términos de desempeño y eficiencia energética medidos sobre un dinamómetro de rodillos. Adicionalmente se realizó el análisis de emisiones y consumo de combustible, mediante la utilización del analizador de gases HORIBA, donde fue posible medir la cantidad de emisiones contaminantes que emite cada combustible (CN 46, 48 y 51). Las pruebas fueron realizadas en dos vehículos pick up de diferente modelo y fabricante, con el objetivo de determinar si el tipo de tecnología utilizada en los motores podía influir directamente en los resultados. Finalmente se realizó el análisis de varianza ANOVA para determinar de manera estadística si los resultados en términos de consumo y emisiones, eran representativos para nuestro planteamiento.

El trabajo presenta inicialmente el contexto teórico de los motores diésel, posteriormente se presenta la revisión bibliográfica de investigaciones realizadas por la academia, continuando con la presentación de los resultados de las simulaciones y de las pruebas experimentales, para finalmente terminar con el análisis de resultados y conclusiones.

* Trabajo de grado.

** Facultad de Ingenierías Físico-Mecánicas. Escuela de Ingeniería Mecánica. Director: Jorge Luis Chacón Velasco, Doctor en Ingeniería Mecánica. Codirectores: Sandro Faruc Gonzales Garnica, Magister en Ingeniería Química; Edgar Fernando Castillo Monroy, Doctor en Ingeniería Química.

ABSTRACT

TITLE: ANALYTICAL AND EXPERIMENTAL STUDY OF THE EFFECT IN THE VARIATION OF THE CETANE NUMBER ON THE PERFORMANCE, ENERGY EFFICIENCY AND EMISSIONS OF DIESEL ENGINES*

AUTHORS: JOHAN SEBASTIAN GARCIA RAMIREZ, MARLON JAHIR OSORIO VILLAMIZAR**

KEY WORDS: DIESEL, INTERNAL COMBUSTION ENGINES, EMISSIONS, PERFORMANCE, FUEL CONSUMPTION, CETANE NUMBER.

DESCRIPTION: This document presents the analytical and experimental analysis of the variation of the cetane number in fuel in diesel engines of different specifications. The analysis was developed using the zero-dimensional model developed by the GIEMA group of the EIM. Subsequently, the results were validated experimentally in the engine laboratory of the Innovation and Technology Center (ICP) where it was possible to identify whether the model could represent the influence of the variation of the cetane number in the fuel, in terms of performance and energy efficiency measured on a roller dynamometer. Additionally, the analysis of emissions and fuel consumption was carried out, using the HORIBA gas analyzer, where it was possible to measure the amount of polluting emissions emitted by each fuel (CN 46, 48 and 51). The tests were carried out on two pick-up vehicles of different model and manufacturer, in order to determine whether the type of technology used in the engines could directly influence the results. Finally, the ANOVA analysis of variance was performed to determine statistically if the results in terms of consumption and emissions were representative for our approach.

The work initially presents the theoretical context of diesel engines, subsequently the bibliographic review of research carried out by the academy is presented, continuing with the presentation of the results of the simulations and experimental tests, to finally finish with the analysis of results and conclusions.

* Degree work .

** Faculty of Physical-Mechanical Engineering. School of Mechanical Engineering. Director: Jorge Luis Chacon Velasco, Doctor in Mechanical Engineering. Co-director: Sandro Faruc Gonzales Garnica, Master in Chemical Engineering; Edgar Fernando Castillo Monroy, Doctor in Chemical Engineering.

INTRODUCCIÓN

Durante muchos años la crisis por la que pasa el planeta en cuanto a contaminación por el uso de combustibles fósiles ha sido el detonante de una revolución de la industria en general. En la actualidad casi todos tenemos claro que muchos de los recursos que nos proporciona la naturaleza son limitados, pero ese no es el mayor problema, su sobreexplotación no es beneficioso para el planeta, debido a que puede provocar grandes afectaciones al ecosistema.

Hoy en día hay una gran preocupación a causa del creciente calentamiento global, el cual de acuerdo al Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), probablemente fue más fuerte durante el siglo XX que durante los 10 siglos anteriores.¹ La quema de combustibles fósiles provoca un aumento en la emisión de dióxido de carbono que provoca un exceso de temperatura que tiene como consecuencia el cambio climático, además, estos combustibles liberan una gran cantidad de óxidos de azufre y nitrógeno que reaccionan con gases de la atmósfera, y se precipitan en forma de ácidos (sulfúrico y nítrico) incrementando la acidificación de agua en general. Esta precipitación, denominada lluvia ácida, causa daños en la vegetación, acelera la contaminación de la tierra y el agua, corroe los edificios, las estructuras metálicas y los vehículos.²

De acuerdo con la ONU “las ciudades consumen el 78% de la energía mundial y producen más del 60% de las emisiones de gases de efecto invernadero”.³ Por lo

¹ RUOSTEENOJA, Kimmo. Future climate in world regions: An intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios. Helsinki. Finnish Environment Institute, 2003. [Consultado: 08/06/19].

² TWENERGY. Principales problemas del uso de combustibles fósiles. Medio Ambiente. 2019. [Consultado: 09/06/19]. [En línea]. Disponible en <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/medio-ambiente/la-electricidad-frente-al-combustible-2734>

³ ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Las ciudades y la contaminación contribuyen al cambio climático. 2019. [Consultado: 09/06/19]. [En línea]. Disponible en <https://www.un.org/es/climatechange/cities-pollution.shtml>

tanto, es necesario que se busquen alternativas para poder controlar el nivel de emisión de estos gases contaminantes.

Existen principalmente dos tipos de combustibles para motores de combustión interna: el diésel y la gasolina; ambos son derivados del petróleo, pero hay diferencias entre ellos. “El diésel es más pesado que la gasolina y se evapora más lentamente por su número de carbonos, pero tiene más poder calorífico y un mejor proceso de combustión. El diésel es 30% más eficiente que la gasolina, comparando la misma cantidad. El diésel produce una mayor cantidad de dióxido de carbono (CO₂), que contribuye al efecto invernadero, mientras que la gasolina produce óxidos de nitrógeno (NO_x), los cuales son causantes de la lluvia ácida y smog”⁴.

El Informe Mundial de la Calidad del Aire 2018, compilado por Greenpeace e IQAir AirVisual, utilizó datos de contaminación del aire de decenas de miles de estaciones de monitoreo públicas y privadas en todo el mundo para clasificar a más de 3,000 ciudades desde las más sucias hasta las más limpias. Entre los países más contaminados del mundo según el informe, Colombia tiene el puesto 50 ofreciendo como anfitrión una de las ciudades con peor calidad de aire, Bogotá, ocupando el puesto 44 entre las ciudades capitales con mayor contaminación⁵. Por otro lado, por quinto año consecutivo, el instituto de hidrología, meteorología y estudios ambientales (IDEAM), presento el informe actualizado de la calidad de aire en Colombia, en este informe se evalúa partículas menores a 2.5 micras ($PM_{2,5}$) y las menores a 10 micras (PM_{10}), los que mayor potencial de afectación vienen registrando a nivel nacional; como lo son el dióxido de nitrógeno, el ozono, el monóxido de carbono y el dióxido de azufre⁶.

⁴ “Derivados del petróleo – El Diesel”. 2017. [Consultado: 08/06/19]. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/241728/DieselFT.pdf>

⁵ IQAIR & GREENPEACE. 2018 world air quality report. AirVisual. 2019. [Consultado: 18/08/19]. [En línea]. <https://www.airvisual.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2018-en.pdf>

⁶ IDEAM. Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2017. Min. Ambiente. 2018. [Consultado: 18/08/19]. [En línea]. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023844/Informe_ECalidadl_Aire_2017.pdf

Por su parte, según el último informe de la calidad del aire en el Área metropolitana de Bucaramanga (AMB)⁷ y a pesar de que se han presentado mejoras, los índices en cuanto a contaminación deben seguir siendo controlados, ya que, debido al aumento del parque automotor, estos niveles contaminantes podrían aumentar provocando alteraciones a la salud de los habitantes.

De acuerdo a lo anterior mencionado, el proyecto que desarrollaremos, pretende hacer un estudio del efecto de la variación del número de cetano presente en combustibles utilizados en motores diésel y como esta variación beneficia no solo las condiciones de desempeño del motor, sino también las características energéticas y el impacto ambiental de estos motores. El efecto se estudiará mediante la simulación de un modelo cero-dimensional de la combustión en motores diésel de diferentes tecnologías, donde se medirán distintos parámetros para determinar su desempeño (potencia y par), consumo de combustible y emisiones contaminantes producidos por los gases de escape.

Posteriormente se hará la validación del modelo cero-dimensional, a través de un análisis experimental en el banco de rodillos del laboratorio de motores en el Centro de Innovación y tecnología (ICP), donde podremos evidenciar la validez del modelo implementado. Se espera al finalizar el proceso de investigación, realizar las conclusiones respectivas, y de esta manera presentar un informe concreto y completo de la influencia del número de cetano en el comportamiento de los motores diésel.

⁷ AMB. Informe de la calidad del aire. 2019. [Consultado: 25/08/19]. [En línea]. <https://www.amb.gov.co/calidad-del-aire/>

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad existen varias entidades a nivel mundial que trabajan para disminuir tanto el consumo de diésel, como los límites máximos de emisiones del motor diésel. Una de estas iniciativas es la normativa EURO, creada en la Unión Europea, cuyo objetivo es disminuir las emisiones de CO₂ de los vehículos. Desde 1988 con la EURO 0, hasta la actualidad con la normativa EURO VI, separando los límites de emisiones para vehículos a gasolina y diésel, la normativa EURO les exige a los fabricantes de vehículos en general, una reducción del consumo de carburante, que a su vez lleva a la disminución de emisiones de este compuesto. Dentro de esta normativa se controlan las emisiones potencialmente peligrosas para la salud de las personas: óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos inquemados (HC) y partículas contaminantes.

Figura 1. Relación de reducción de emisiones de MP y NO_x



Fuente: NORMA NACIONAL DE CALIDAD DE COMBUSTIBLES DIESEL Y BIODIESEL. Ministerio de ambiente y desarrollo y ministerio de minas y energía.

Tecnologías vehiculares de muy baja emisión contaminante, tales como EURO VI, requieren de una combinación de parámetros de combustible para el funcionamiento óptimo de las mismas. El número de cetano ideal para la implementación de tecnologías EURO VI es de 51. Sin embargo, es una condición que depende de la naturaleza de los crudos de la región, razón por la cual en Estados Unidos se encuentra regulado de forma diferente para cada estado federado.⁸ Por otro lado en Colombia el número de cetano reglamentado es de 45, establecido de acuerdo a la Resolución 9 0963 de 2014.

Tabla 1. Requisitos de calidad del combustible diésel y sus mezclas con biocombustibles.

	PARÁMETRO	UNIDAD	ESPECIFICACIÓN (Fecha de Vigencia)		MÉTODO DE ENSAYO
1	Azufre, máximo	% masa	0,005		ASTM D4294 (1)
2	Aromáticos, máximo(2)	% Vol.	35 32 (jul. 31 de 2016 en adelante)		ASTM D5186 o ASTM D1319 (3)
3	Número de Cetano, mínimo (2) (4)	---	43 Resto País	45 Bogotá	ASTM D 613
			45 (jul. 31 de 2016 en adelante)		
4	Índice de Cetano, mínimo (5)	---	45		ASTM D976 o ASTM D4737
5	Contenido de Biocombustible (máximo), (6)	% volumen	10		EN 14078
6	Corrosión al cobre, 3h a 50°C, máximo	Clasificación	2		ASTM D130
7	Color ASTM, máximo	---	2		ASTM D1500
8	Residuos de Carbón micro, máximo (10% fondos)	% masa	0,2		ASTM D4530
9	Gravedad API, mínimo	°API	Reportar		ASTM D4052 o ASTM D1298 o ASTM D287
10	Viscosidad a 40°C (2) (9) Mínimo Máximo	mm ² /s	1,9		ASTM D445
			4,1 Bogotá	5,0 Resto País	

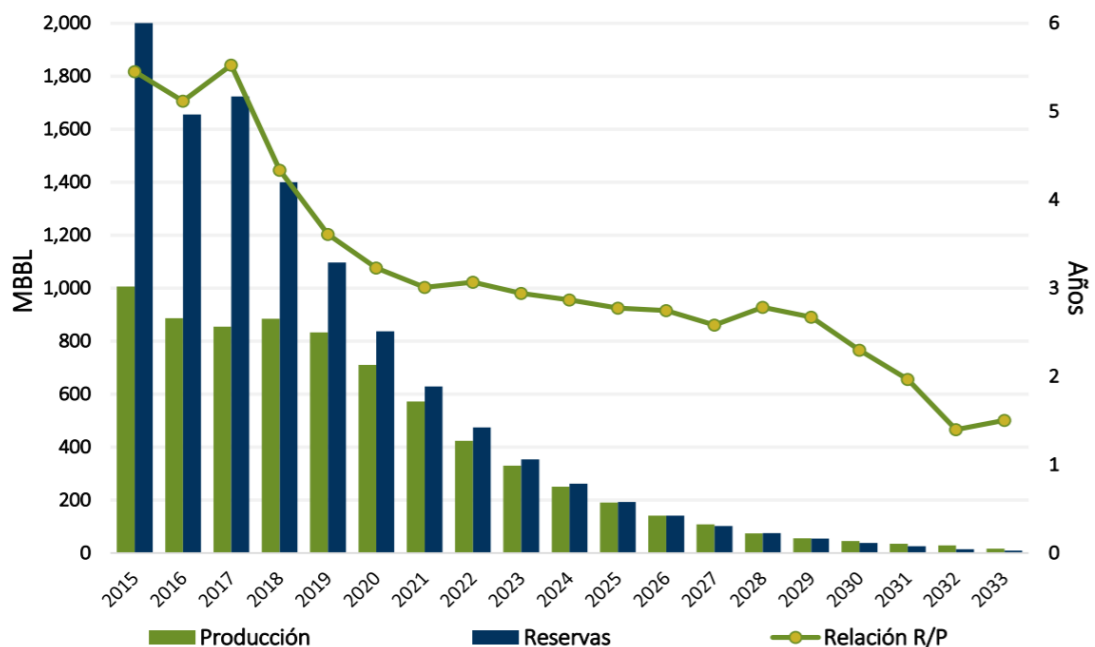
Fuente: RESOLUCIÓN 9 0963 DE 2014. Ministerio de minas y energía y el ministerio de ambiente y desarrollo sostenible.

⁸ MINISTERIO DE AMBIENTE Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Norma nacional de calidad de combustibles Diesel y biodiesel. Bogotá D.C. 2019.

La academia colombiana⁹ realizó estudios acerca de la calidad de los combustibles distribuidos a nivel nacional, en donde se presentan estadísticas que sugieren que la capacidad actual del país referente al número de cetano, sin aplicar ningún aditivo es de 46, esto se debe principalmente a la naturaleza pesada de los crudos presentes en el país.

De igual forma las reservas de crudo en Colombia cada vez es más escaso, esto indicaría que en un futuro no muy lejano el país deberá afrontar un proceso de importación del crudo, asumiendo sobrecostos. La evidente pérdida de capacidad de reservas de petróleo en Colombia se ve reflejada en la siguiente curva, donde se ilustra una relación de las reservas de crudo proyectada para años próximos en nuestro país.

Figura 2. Reservas de petróleo colombiano



Fuente: PLAN INDICATIVO DE ABASTECIMIENTO DE COMBUSTIBLES LÍQUIDOS. UPME, 2019.

⁹ UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Ministerio de Minas y Energía. 2016.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar de formar analítica y experimental, el efecto de la variación del número de cetano en el desempeño, eficiencia energética y el impacto ambiental de motores diésel.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Estudiar y analizar las diferentes variables de desempeño (potencia y par), economía (consumo específico de combustible, rendimiento térmico) y emisiones (CO₂, CO, HC, NO_x, PM y PN), cuando se varía el número de cetano en combustibles utilizados en motores diésel de diferentes especificaciones a través de una revisión bibliográfica (tesis, artículos, revistas nacionales e internacionales, bases de datos, etc.).
- Mediante la utilización de un modelo cero-dimensional de la combustión en motores diésel desarrollado en el grupo GIEMA de la EIM, realizar las simulaciones del desempeño (potencia y par), del consumo de combustible y de la eficiencia energética variando el número de cetano en el combustible para diferentes configuraciones de motores diésel (potencia, cilindrada, velocidad de giro, etc.). Las simulaciones a realizar serán:
 - ✓ Variación de la presión en cámara vs. Angulo de giro.
 - ✓ Variación de la potencia vs. Régimen de giro.
 - ✓ Eficiencia térmica indicada vs. Dosado.

- Validación del modelo cero-dimensional implementado, a partir de un análisis experimental en el banco de rodillos del laboratorio de motores en el Centro de Innovación y tecnología (ICP).
- Estudiar el efecto de la variación del número de cetano en el desempeño de dos motores diésel de baja potencia con diferentes especificaciones, al igual que sobre la economía de combustible y la emisión de contaminantes.

3. JUSTIFICACIÓN DE LA SOLUCIÓN

El fin de la era del motor de combustión interna no es tan cercana como piensa la humanidad, “El motor diésel aún tiene mucho tiempo para seguir recorriendo el mundo, y el cambio a la electrificación está sobrevalorado”, dice Klaus Fröhlich, miembro de la junta directiva de desarrollo de BMW Group. Ahora bien, si pensamos en esto como una posibilidad para generar nuevas tecnologías que nos permitan mejorar el rendimiento de un motor de combustión interna, tendremos muchas cosas que ganar y pocas para perder; una de estas cosas será la contribución al medio ambiente, reduciendo el efecto invernadero y los daños causados por los gases de escape.

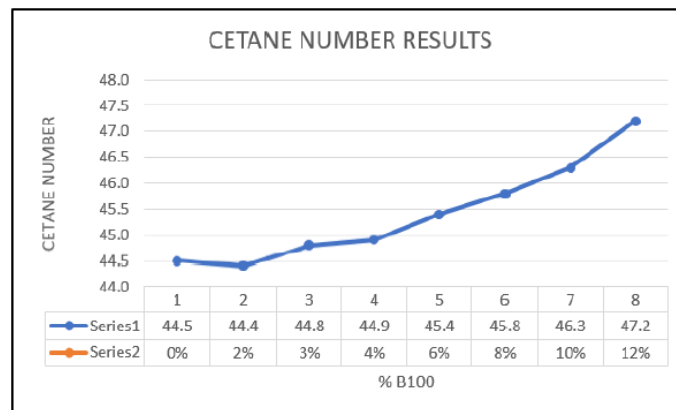
Sabiendo esto, es importante entender que el número de cetano proporciona una medida del comportamiento del encendido por compresión del combustible diésel; números altos de cetano permiten una ignición más rápida. En materia ambiental, el número de cetano tiene una influencia significativa en la disminución de la concentración de Óxidos de Nitrógeno (NOx) e Hidrocarburos (HC) presentes en las emisiones de escape⁸.

Por otro lado, cada día la humanidad crece de manera exponencial, esto da entrada al desempleo y la falta de oportunidades laborales. Si se desarrollan estas nuevas alternativas, se necesitará personal para la obtención de nuevas fuentes de energía y a su vez el desarrollo de tecnologías para poder usarlas. La implementación de aspectos nuevos en un motor de combustión interna diésel implica algo más que mano de obra, es necesario ingenieros investigadores que se interesen en este campo y que estén dispuestos a trabajar en la optimización de los recursos ya existentes, a su vez como ya mencionamos, la búsqueda tecnológica revolucionaria.

Ahora bien, para lograr aumentar el número de cetano del combustible diésel existen básicamente dos métodos para lograr este objetivo. En primer lugar,

tenemos la mezcla de diésel convencional con biodiesel, entre mayor sea la cantidad de biodiesel mayor será el número de cetano, esto se puede evidenciar por el estudio de caracterización desarrollado por un laboratorio para muestras de combustibles y biocombustibles colombianos en 2019, a continuación, se ilustran los resultados de dicha caracterización.

Figura 3. Resultados análisis desempeño número de cetano vs Bx.



Fuente: Informe Resultados ASTM D 613. Camin Cargo Control. 2019.

La segunda posibilidad para aumentar el número de cetano en el combustible diésel es la implementación de aditivos para mejorar sus propiedades, este será el método que usaremos en el desarrollo de nuestro proyecto. Varios estudios en todo el mundo han demostrado que añadiendo algún tipo de aditivo al combustible diésel, se pueden aumentar sus propiedades tanto físicas como químicas, entre ellas el número de cetano.

Por lo tanto, se hace a día de hoy una alternativa muy funcional y practica la implementación de aditivos o biodiesel en el combustible diésel, en lo que se refiere a fuentes de energía, no solo en Colombia sino en muchos países. Rudolf Diesel afirmaba que "el uso de aceites vegetales como combustible y fuente energética podrá ser insignificante hoy, pero con el curso del tiempo será tan importante como el petróleo y el carbón".

4. MARCO REFERENCIAL

4.1 MOTORES DIESEL

Para comprender el impacto de la variación del número de cetano en el combustible diésel, es importante entender el funcionamiento de un motor de este tipo. Y es que, existen diferentes configuraciones para los motores de combustión interna, además, se pueden realizar diferentes modificaciones y adecuaciones según las necesidades de los fabricantes, por lo tanto, a continuación, se detalla de manera resumida el funcionamiento de los motores diésel en general, sus características físicas y los parámetros que más influyen en su operación.

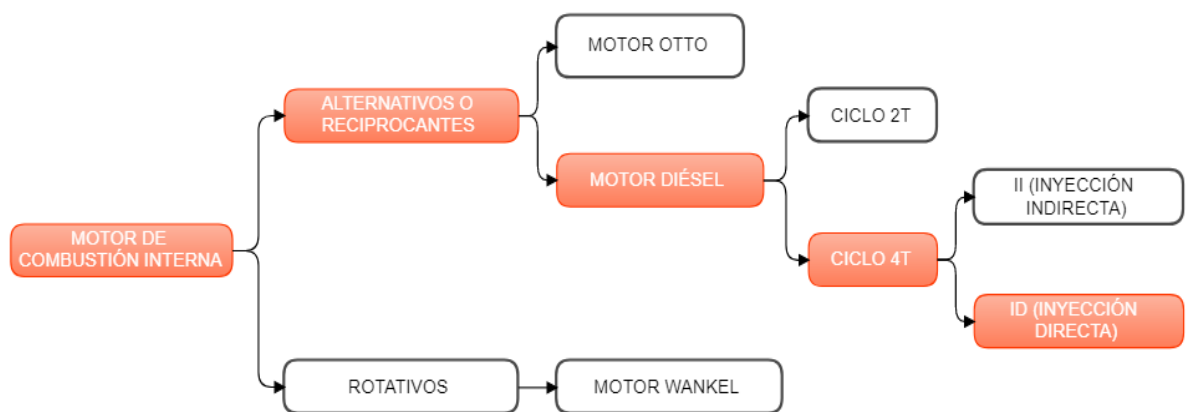
4.1.1 Motores de Combustión Interna. El propósito de los motores de combustión interna es la producción de energía mecánica a partir de la energía química contenida en el combustible. En los motores de combustión interna, a diferencia de los motores de combustión externa, esta energía se libera al quemar u oxidar el combustible dentro del motor. La mezcla de aire y combustible antes de la combustión y los productos quemados después de la combustión son los fluidos de trabajo reales. Las transferencias de trabajo que proporcionan la potencia deseada se producen directamente entre estos fluidos de trabajo y los componentes mecánicos del motor¹⁰.

Los motores de combustión interna se pueden diferenciar entre los motores de encendido por chispa (también llamados motores Otto, o motores a gasolina, aunque se pueden usar otros combustibles) y los motores diésel o encendidos por compresión. Debido a su simplicidad, robustez y alta relación potencia/peso, estos dos tipos de motores han encontrado una amplia aplicación en el transporte (tierra, mar y aire) y en la generación de energía.

¹⁰ HEYWOOD, John. Internal Combustion Engines Fundamentals. 1 st, ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

Las máquinas de vapor se pueden considerar los primeros ingenios capaces de producir, con rendimientos aceptables, energía mecánica no natural, teniendo por tal la que no procede del aprovechamiento de energías existentes en la naturaleza, como la hidráulica o la eólica. Todos los motores térmicos actuales se derivan, en mayor o menor medida, de las máquinas de vapor.¹¹ Estos motores se pueden clasificar de diversas maneras, una de ellas es según su diseño y dentro de ella existen otras clasificaciones, como se observa en la figura 5.

Figura 5. Clasificación de los motores de combustión interna.



Fuente: Autor

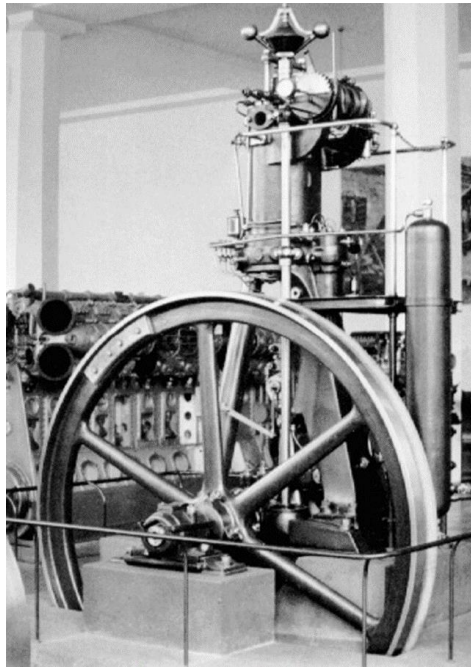
Las casillas resaltadas en la figura 5 muestran la tipología del motor a tratar durante el desarrollo del proyecto, es decir, un motor de 4T diésel de inyección directa.

4.1.2 Motores de Combustión Interna Alternativa. El motor diésel, también llamado motor por compresión o motor de combustión interna alternativo (MCIA), fue una creación del francés Rudolf Diésel. Durante los primeros años de su investigación hacia la creación de un nuevo motor que mejorara el ciclo propuesto por Otto, el francés tenía la intención de producir un motor capaz de trabajar en el ciclo ideal de Carnot.

¹¹ PAYRI, Francisco y DESANTES, Jose. Motores de combustión interna alternativos. 1 st ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2011.

Tras la publicación de su patente en 1893, dedicó varios años a la construcción de un prototipo funcional, que vio la luz en 1897 (Figura 6) y fue presentado por la casa MAN en la exposición universal de París de 1900. El motor tenía un rendimiento del 26,2 % que, aunque alejado de sus predicciones iniciales, era muy elevado para la época.

Figura 6. Primer motor operativo diseñado por Diesel.

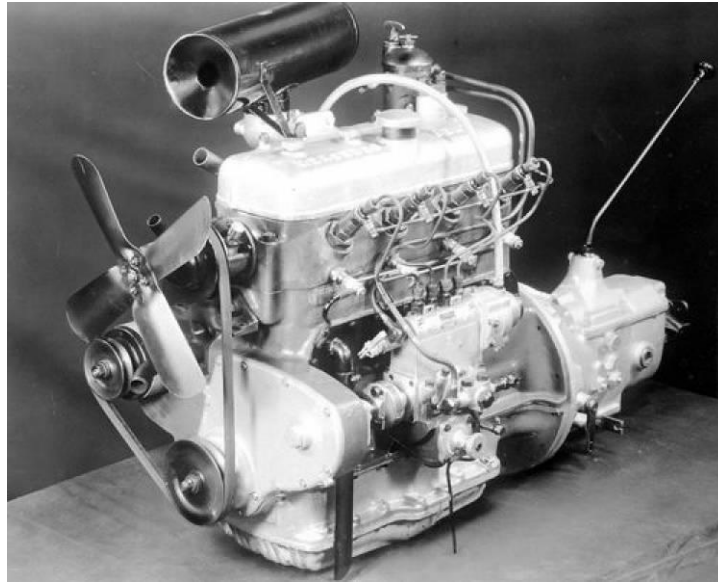


Fuente: PAYRI, Francisco y DESANTES, José. Motores de combustión interna alternativos. 1 st ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2011.

En el motor Diesel original el combustible era inyectado por medio de aire comprimido, el cual atomizaba el combustible y lo introducía al motor a través de una tobera que se abría y cerraba por medio de una leva. La revolución de los sistemas de inyección Diesel llegó de la mano de Bosch cuando en el año 1927 se fabricaron las primeras bombas de inyección en línea, esto permitió que Mercedes, en 1937, fabricara el primer automóvil de serie con motor Diesel, el 260D (Figura 7), equipado con un motor de 4 cilindros y 2,5 litros, precámara de combustión, válvulas

en culata, que entregaba 34 kW a 3000 rpm, con un consumo aproximado de 9 litros/100 km¹¹.

Figura 7. Motor Diesel de Mercedes 260D



Fuente: Mercedes 260 D de 1936, el primer turismo diésel de la historia [En línea] Revista Diario Motor. (Recuperado el 28 de noviembre de 2020). Disponible en: <https://www.diariomotor.com/>

En la actualidad, la eficiencia de los motores diésel, es mayor que en cualquier motor otto, llegando a superar el 40%. Como el grado de compresión de estos motores es aproximadamente de 14 a 1, son por lo general más pesados que los motores Otto. Esta desventaja se compensa con una mayor eficiencia y el hecho de utilizar combustibles más baratos¹².

4.1.2.1 Ciclo diésel de 4 tiempos. La mayoría de los motores alternativos funcionan con lo que se conoce como ciclo de cuatro tiempos. Cada cilindro requiere cuatro golpes de su pistón, dos revoluciones del cigüeñal para completar la secuencia de eventos que produce uno golpe de poder:

¹² R. STONE. Introduction to internal combustion engines. U.S.A, 1999.

- **Admisión**, comienza con el pistón en PMS (punto muerto superior) y termina con el pistón en PMI (punto muerto inferior), que extrae mezcla fresca en el cilindro. Para aumentar la masa inducida, la válvula de entrada se abre poco antes de que comience la carrera y se cierra después.
- **Compresión**, cuando ambas válvulas están cerradas y la mezcla dentro del cilindro se comprime a una pequeña fracción de su volumen inicial. Hacia el final de la carrera de compresión, se inicia la combustión y la presión del cilindro sube más rápido.
- **Potencia o carrera de expansión**, que comienza con el pistón en PMS y termina en PMI cuando los gases de alta temperatura y alta presión empujan el pistón hacia abajo y obligan a la manivela a girar.
- **Escape**, donde los gases quemados restantes salen del cilindro: primero, porque la presión del cilindro puede ser sustancialmente más alta que la presión en el escape; luego, a medida que son arrastrados por el pistón a medida que avanza hacia PMS.

Figura 8. Ciclo de operación de 4 tiempos.

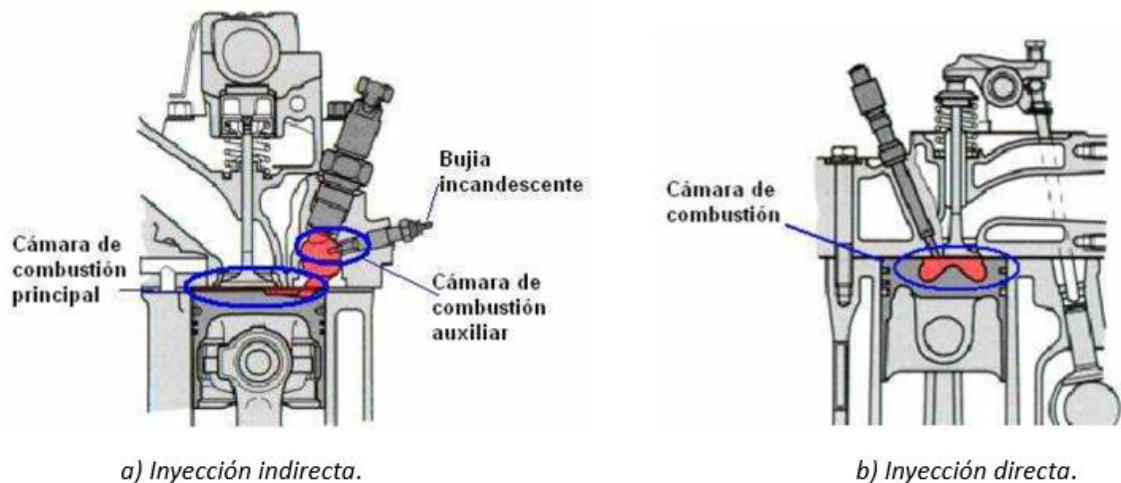


Fuente: J.B Heywood. Internal combustion engines Fundamentals.1 st, ed.

4.1.2.2 Inyección directa diésel. El motor diésel nació como un motor de inyección directa, es decir el combustible era directamente inyectado en la cámara de combustión, sin embargo, debido a las bajas velocidades de combustión su uso estaba limitada a grandes motores girando a bajo régimen de giro.¹¹

Actualmente existen dos tipos de cámaras: inyección directa, empleada en motores de bajas revoluciones e inyección indirecta, utilizadas en motores de mediana, alta velocidad y poco robustos. *La cámara de inyección indirecta* puede ser con un pistón casi plano o un pistón con una cavidad de poco fondo, se utiliza una bujía incandescente para ayudar el arranque en frío. La cámara principal de combustión está formada entre la parte superior del pistón y la culata de cilindros, pero también hay una cámara separada más pequeña, en la culata, en la cual se inyecta el combustible. *La cámara de inyección directa*, tiene culata de cilindros con superficie plana y la cámara está formada por una cavidad en la parte superior del pistón.¹³

Figura 9. Inyección directa e indirecta.



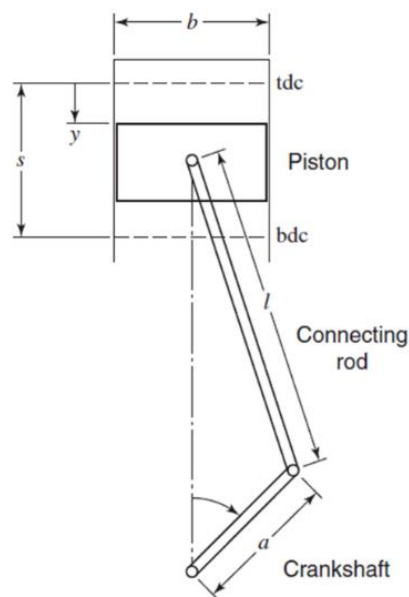
Fuente: Taylor. The internal combustion engine in theory and practice.

¹³ TAYLOR. The internal combustion engine in theory and practice. The MIT Press. 1997.

4.1.3 Parámetros de operación y desempeño. Para facilitar la comprensión del funcionamiento de un motor de combustión interna, es importante conocer y diferenciar las variables más relevantes dentro de la operación y el desempeño de los motores diésel, y es que, estos parámetros definen el comportamiento de los motores mediante la caracterización geométrica y física del equipo.

4.1.3.1 Geometría del motor. Para cualquier cilindro, el cigüeñal, la biela, el pistón y el conjunto de la cabeza se pueden representar mediante el mecanismo que se muestra en la figura 10. De particular interés se muestran los siguientes parámetros geométricos: diámetro interior, b ; longitud de la biela, l ; radio de la manivela, a ; carrera del pistón, s y ángulo de manivela, θ . El radio de la manivela es la mitad de la carrera.¹⁴

Figura 10. Geometría básica del motor.



Fuente: Colin R. Ferguson, Allan T. Kirkpatrick. Internal combustion engines: Applied thermosciences.

¹⁴ FERGUSON, Colin and KIRKPATRICK, Allan. Internal combustion engines: Applied thermosciences.3 Ed. Colorado: John Wiley & Sons, 2016.

El punto muerto superior (**tdc**) de un motor se refiere a que el cigüeñal está en una posición tal que $\theta=0^\circ$. El volumen del cilindro en esta posición es mínimo y también se llama volumen de aclaramiento, V_c . El punto muerto inferior (**bdc**) se refiere a que el cigüeñal está en $\theta=180^\circ$. El volumen del cilindro en el punto muerto inferior V_1 es máximo. La relación de compresión, r , se define como la relación entre el volumen máximo y mínimo.

$$r = \frac{V_{bdc}}{V_{tdc}} = \frac{V_1}{V_c} \quad (1)$$

El volumen de desplazamiento, V_d , es la diferencia entre el volumen máximo y mínimo; para un solo cilindro.

$$V_d = V_1 - V_c = \frac{\pi}{4} * b^2 * s \quad (2)$$

Para motores multi-cilíndricos, el volumen de desplazamiento total es el producto de la cantidad de cilindros, n_c y el volumen de un solo cilindro.

$$V_d = n_c * \frac{\pi}{4} * b^2 * s \quad (3)$$

La velocidad media del pistón U_p es un parámetro importante en el diseño del motor. Dado que el pistón recorre una distancia del doble de la carrera por revolución, debe quedar claro que:

$$U_p = 2 * N * s \quad (4)$$

La velocidad del motor, N , se refiere a la velocidad de rotación del cigüeñal y se expresa en revolución por minuto.¹⁴

4.1.3.2 Potencia, torque y eficiencia. La potencia al freno, W_b , es la potencia a la que se realiza el trabajo; y el par motor, τ , es una medida del trabajo realizado por unidad de rotación (radianes) de la manivela. La potencia al freno es la potencia de salida del motor y medida con un dinamómetro, es menor que la tasa límite de trabajo realizado por el combustible, llamado potencia indicada, en parte debido a la fricción. La potencia al freno y el par están relacionados por:

$$W_b = 2\pi * \tau * N \quad (5)$$

La potencia neta proviene del motor completo, mientras que la potencia bruta proviene de un motor sin el ventilador de enfriamiento, el silenciador y el tubo de escape. El trabajo indicado W_i , es el trabajo neto transferido del combustible al pistón durante un ciclo, que es la integral de la presión sobre el volumen del cilindro:

$$W_i = \int P dV \quad (6)$$

y la potencia indicada W_i , para un motor con cilindros n_c , es:

$$\text{Motor cuatro tiempos) } W_i = \frac{n_c * W_i * N}{2} \quad (7)$$

La potencia al frenado es menor que la potencia indicada debido a la fricción mecánica del motor, pérdidas de bombeo en la admisión y escape, y necesidades de potencia de los accesorios, que se agrupan como pérdida de potencia por fricción, W_f :

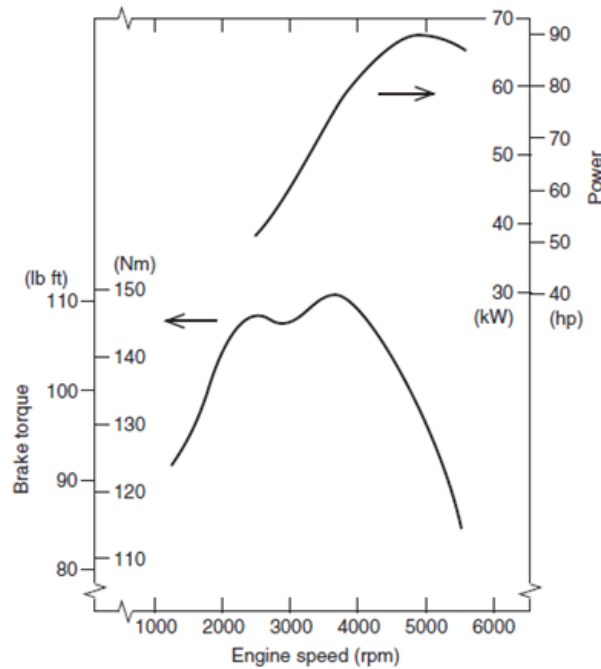
$$W_f = W_i - W_b \quad (8)$$

La relación entre la potencia de frenado y la potencia indicada es la eficiencia mecánica, η_m :

$$\eta_m = \frac{W_b}{W_i} = 1 - \frac{W_f}{W_i} \quad (9)$$

En la figura 11, se traza el rendimiento de un automóvil con el acelerador completamente abierto de 2.0 L. Como con la mayoría de los motores, el par y la potencia exhiben máximos a diferentes velocidades del motor. Los efectos de la fricción viscosa aumentan cuadráticamente con la velocidad del motor, lo que hace que la curva del par disminuya a altas velocidades del motor. El par máximo se produce a una velocidad inferior que, a la potencia máxima, ya que la potencia es producto del par y la velocidad. Note que la curva del torque está ondulada. Esto se debe a la dinámica del flujo de aire de entrada y de escape y a la fricción.¹⁴

Figura 11. Rendimiento de un automóvil con motor de cuatro tiempos, acelerador completamente abierto.



Fuente: Colin R. Ferguson, Allan T. Kirkpatrick. Internal combustion engines: Applied thermosciences.

4.1.3.3 Consumo específico de combustible y eficiencia térmica. El consumo específico de combustible es una métrica comparativa de la eficiencia de convertir la energía química del combustible en el trabajo producido por el motor. Al igual que con la presión media efectiva, hay dos parámetros específicos de consumo de combustible, freno e indicado. El consumo específico de combustible al freno (**bsfc**) es el caudal de combustible m_f , dividido por la potencia al freno W_b . Tiene tres términos que son medidas estándar en una prueba de motor: el caudal de combustible, el par y la velocidad del motor:

$$bsfc = \frac{m_f}{W_b} = \frac{m_f}{2\pi * \tau * N} \quad (10)$$

El consumo específico de combustible y la eficiencia del motor están inversamente relacionados, de modo que cuanto menor sea el consumo específico de combustible, mayor será la eficiencia del motor. Los ingenieros utilizan bsfc en lugar de la eficiencia térmica, principalmente debido a una aceptación más o menos universal no existe una definición de eficiencia térmica. Tenga en cuenta solo por ahora que hay un problema con la asignación de un valor al contenido de energía del combustible. Llamemos a esa energía el calor de combustión q_c ; la eficiencia térmica del freno es entonces:

$$n_t = \frac{W_b}{m_f * q_c} = \frac{1}{bsfc * q_c} \quad (11)$$

La ecuación 11 muestra que bsfc es una medida válida de eficiencia siempre que q_c permanece constante. Por lo tanto, se pueden comparar dos motores diferentes sobre una base bsfc siempre que funcionan con el mismo combustible.³⁴

4.1.4 Combustible diésel. Los combustibles diésel, también llamados aceite combustible para motor (ACPM), esta constituidos por un gran número de hidrocarburos, los cuales tienen rangos de ebullición entre 180 °C y 380 °C. Ellos son obtenidos por procesos de destilación atmosférica del petróleo crudo. Algunas refinerías incrementan la producción de ACPM incorporando productos del craqueo catalítico, previamente tratados para eliminar compuestos indeseables, tales como azufre y las olefinas. Las diferentes propiedades del ACPM tienen incidencia sobre la calidad de la combustión, es decir sobre la cantidad de compuestos nocivos emitidos al ambiente.¹⁵

¹⁵ URIBE, Yenny. Software para la simulación del comportamiento de un motor diésel trabajando con mezcla (Diésel-Gas natural) Simudual 1.0. Tesis de Pregrado, Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander, 2008.

4.1.4.1 Número de cetano. Está relacionado con la calidad de la ignición. El ACPM debe iniciar su combustión fácilmente, es decir su auto ignición, por temperaturas, sin necesidad de una fuente externa de ignición. A mayor número de cetano, más fácil es iniciar la combustión. Los números de cetano típicos que se encuentran en el mercado están entre 45 y 50, los cuales satisfacen las tecnologías actuales de los motores. A mayor contenido de hidrocarburos parafínicos se obtienen más altos números de cetano, mientras que lo contrario sucede con los aromáticos.

4.1.4.2 Punto de inflamación. El punto de inflamación es aquella temperatura a la cual un líquido produce suficiente cantidad de vapores para formar una mezcla aire/combustible capaz de encenderse bajo la presencia de una fuente de ignición o chispa. Esta propiedad se controla normalmente, por razones de seguridad en el manejo del producto, en valores superiores a 51 °C.³⁵

4.1.4.3 Rango de ebullición. El rango de ebullición es determinado por la curva de destilación, debe estar muy bien balanceado para no comprometer el buen desempeño de los motores. Los compuestos de bajo rango de ebullición son deseables para facilitar una buena operación a baja temperatura, buenos patrones de dispersión, combustible más fácil; pero pueden disminuir el número de cetano y desmejorar las propiedades de lubricación. Por otra parte, los compuestos de alto rango de ebullición son deseables para mejorar el rendimiento de los crudos, aumentar la densidad calórica, la lubricidad; pero son más difíciles de quemar, aumentando las emisiones de material particulado y los depósitos sobre las boquillas.³⁵

4.1.4.4 Densidad. El valor calorífico del ACPM depende en alto grado de su densidad, manteniendo una relación directa. Las bombas de inyección de combustible inyectan volúmenes fijos, por lo tanto, si la densidad varía ampliamente se presentan fluctuaciones notorias en la masa de entrada, y, por ende, en la energía disponible.³⁵

4.1.4.5 Azufre. El azufre está presente en el combustible diésel en proporciones que dependen de los crudos de origen. En las refinerías el azufre es retirado mediante tratamientos con hidrogeno. Las regulaciones sobre calidad de combustible son muy exigentes con el contenido de azufre por dos razones fundamentales:

- La combustión del azufre genera SO₂, responsable de la formación de lluvias acidad y de smog foto-químico por reacción con otros productos de la combustión.
- Los nuevos sistemas de tratamiento de gases de escape para reducir las emisiones de NO_x y de material particulado son muy sensibles al azufre, perdiendo actividad en su presencia.³⁵

4.1.4.6 Aditivos. Para mejorar el desempeño del combustible diésel se utilizan productos químicos en pequeñas cantidades, llamados aditivos, cuyo nombre se asocia a la propiedad que mejoran. Entre ellos se encuentran; antioxidantes, inhibidores de herrumbe y corrosión, antiespumantes, mejoradores de cetano, mejoradores de combustión, depresores de punto de fluidez, detergentes, dispersantes y mejoradores de lubricidad, entre otros.³⁵ En la *tabla 1* se observan las propiedades del combustible diésel en Colombia.

4.2 REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Uno de los objetivos de este proyecto es la revisión académica y científica de los estudios que se han realizado hasta la fecha, y que son relevantes para el desarrollo del proyecto. Y es que, es importante comprender y analizar los mayores avances dentro de la ciencia y la academia que han servido como referentes en el análisis de la variación del número de cetano en los motores diésel.

Para poder interpretar correctamente el planteamiento y la posterior ejecución de las pruebas tanto analíticas como experimentales, debemos abordar cada uno de estos estudios, y revisar a detalle los planteamientos que se han realizado,

relacionando los que mayor relevancia tienen con el nuestro. A continuación, se mencionan los artículos, proyectos, documentales e investigaciones más relevantes para el proyecto, y que guardan bastante similitud con el tema propuesto tanto por los planteamientos como por los resultados obtenidos por cada uno de ellos.

4.2.1 Desempeño en Motores Diesel. Durante los últimos años, en el mundo se han realizado una serie de pruebas y experimentos relacionados con los combustibles como principal fuente de energía en motores de combustión interna, específicamente en motores Diesel. Por ejemplo, Gonzales¹⁶ realizó un estudio, en donde se analizó el consumo de combustibles en diferentes motores de combustión interna diésel y gasolina, en función de la potencia desarrollada. En él se establecieron los factores determinantes en el consumo de combustible.

Por otro lado, Torres¹⁷ diseñó un sistema de reducción de emisiones contaminantes procedentes de motores de combustión interna mediante la disminución de óxidos de nitrógeno, separando las moléculas contaminantes y convirtiéndolas en moléculas inofensivas para el planeta. En Colombia, los estudiantes Quintero y Moreno¹⁸ realizaron la caracterización del desempeño del motor Diesel a partir de la implementación de diferentes mezclas biocombustible/diésel. Mientras que Altamar¹⁹ hizo una revisión en la opacidad de las emisiones generadas por motores Diesel usando biocombustibles como fuente de energía.

¹⁶ GONZÁLEZ, Roberto; RODRÍGUEZ, Yanara; GARCIA, Yelene y FERNÁNDEZ, Lucía. Consumo de combustible de los motores de combustión interna. Revista ciencias técnicas y agropecuarias, La Habana-Cuba; Vol. 19, No 1, 2010.

¹⁷ TORRES, Alexander y MEDINA, Andrés. Sistema de reducción de emisiones contaminantes procedentes de motores de combustión interna mediante tratamientos post combustión por descarga de barrera dieléctrica. (Proyecto Técnico). Cuenca, Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. 2017.

¹⁸ QUINTERO, Carlos y MORENO, Saul. Caracterización del desempeño de un motor diésel a partir de la implementación de diferentes mezclas biocombustible/diésel. (Tesis de pregrado). Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomas; 2014.

¹⁹ ALTAMAR, Andrés. Revisión del efecto del uso de biocombustibles en la opacidad de emisiones generadas por motores diésel. (Tesis de Posgrado). Bogotá, Colombia: Universidad Libre; 2014.

4.2.2 Modelos multi-dimensionales, cero-dimensionales y cuasi-dimensionales. Expertos en el campo de la programación han realizado simulaciones que cuantifican los efectos de los procesos fundamentales en los sistemas del motor. Sabemos que el proceso de combustión es el aspecto más importante de un motor de combustión interna²⁰, por lo que su modelado es de gran relevancia al simular el comportamiento global de un motor Diesel. Los modelos de la combustión se suelen clasificar de acuerdo a la representación espacial del proceso. De acuerdo a Heywood²¹ hay dos grandes grupos en los cuales se pueden clasificar los modelos de combustión en motores Diésel: los modelos flui-dinámicos y los modelos termodinámicos, a su vez estos últimos se pueden clasificar como multidimensionales, cero-dimensionales y fenomenológicos o cuasi dimensionales.

Para el caso este proyecto, hay que comprender que los modelos cero-dimensionales están basados principalmente en la ley de la conservación de la energía, en ellos se asume homogeneidad espacial de las variables implicadas en el proceso. El más conocido de estos es la función de Wiebe²² que se ha utilizado desde los años 70. Esta función se ha adaptado a los distintos motores, por ejemplo, en motores Diesel de inyección directa donde se presenta una fuerte liberación de calor en la combustión premezclada. Otro caso son los motores Diesel modernos, en donde se ha incorporado nuevas tecnologías y avanzados sistemas de combustión para disminuir las emisiones y el consumo de combustible, donde se han utilizado no solo una o dos ecuaciones de Wiebe, sino que ha sido necesario utilizar tres, cuatro o inclusive más ecuaciones para tal fin. Recientemente se han realizado varios modelos cero-dimensionales que buscan predecir el desempeño de motores Diesel alimentados con diferentes tipos de biocombustibles; En 2010 Gogoi

²⁰ WATSON, N. Turbocharging the Internal Combustion Engine. John Wiley & Sons Inc; 1982.

²¹ HEYWOOD, John. Modeling Real Engine Flow and Combustion Processes. In: Internal Combustion Engine Fundamentals. EE. UU: McGraw-Hill; 1988. p. 748-816.

²² VIBE, Ivan Ivanovic. Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren. VEB Verlag Technik. 1970.

y Baruah²³ desarrollaron un modelo que predice el desempeño de un motor Diesel mono cilíndrico de 4 tiempos alimentado con mezclas de biodiesel de aceite de Naranja.

En Colombia también se han desarrollado modelos cero-dimensionales, en el año 2000, Corredor *et al.*²⁴ presentaron una metodología para la simulación del proceso de combustión en un motor encendido por compresión de aspiración natural o turboalimentado; En 2008, Agudelo *et al.*²⁵ diseñaron un modelo diagnóstico exergético de una zona y dos especies que se utiliza para caracterizar la operación de un motor. Mientras que, Chacón²⁶ utilizó el método Levenberg-Marquardt (LM) para identificar los parámetros de la ecuación de Wiebe. Por su parte, Garcia²⁷ diseñó una herramienta computacional cero-dimensional para el cálculo de los parámetros de desempeño de un motor Diesel cuatro tiempos determinando las características energéticas utilizando un Bio-oíl hidrotratado, todo esto basado en la primera ley de la termodinámica, que permitía conocer las condiciones de operación y las propiedades del combustible utilizado. Gracias al trabajo realizado por Garcia, el proyecto que realizaremos continuará con la investigación propuesta por él, pero con la diferencia de que, gracias a su programa de simulación, comprobaremos y analizaremos como es el comportamiento del motor cuando se varía el número de cetano en el combustible mediante el proceso de aditivación, verificando experimentalmente el comportamiento y los parámetros más importantes en el proceso de combustión del motor Diesel.

²³ GOGOI, Tapan and BARUAH, Debendra Chandra. "A cycle simulation model for predicting the performance of a diesel engine fuelled by diesel and biodiesel blends". Energy vol. 35, no.3, 2010. pp. 1317-23.

²⁴ CORREDOR, Lesmes; AGUDELO, John and HERNÁNDEZ, Jaime. "Simulación del proceso de Combustión en Motores de encendido por compresión" Energética, vol.23. 2000. pp. 103-11.

²⁵ AGUDELO, Andrés; AGUDELO, John and BENJUMEA, Pedro. "Exergy diagnosis of the combustion process in a Diesel Engine, "Rev. Fac. Ing. Universidad de Antioquia, no. 45, 2008. pp. 41-53.

²⁶ CHACÓN, Jorge Luis. "Identificación de un motor Diesel", presentado en el IX Congreso Latinoamericano de Control Automático. Colombia. 2000.

²⁷ GARCIA, Gabriel. Herramienta computacional para el cálculo de los parámetros de desempeño de un motor diésel ID de cuatro tiempos (Tesis de posgrado). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2013.

4.2.3 Número de cetano en el combustible. En el campo de la investigación, muchas han sido las personas que han analizado el comportamiento del número de cetano en el combustible, esto se debe principalmente a que cuanto más elevado es el número de cetano, menor es el retraso de la ignición y mejor es la calidad de combustión. Por el contrario, aquellos carburantes con un bajo número de cetano requieren mayor tiempo para que ocurra la ignición y después queman muy rápidamente, produciendo altos índices de elevación de presión. Es por esto, que el número de cetano en el combustible ha sido un tema de mucho análisis y estudio dentro del campo de la ciencia y la investigación, no solo por la importancia dentro del desempeño del motor, sino también por estar directamente asociado con la disminución de emisiones contaminantes al medio ambiente.

Por mencionar algunos ejemplos, Kidoguchi *et al.*²⁸ realizaron un estudio en donde se investigaron los efectos de las propiedades del combustible en las características de combustión y emisiones como NO_x, HC, humo y partículas en un motor diésel de inyección directa. Los resultados mostraron que la reducción del número de cetano resultó en el aumento de NO_x y la disminución de partículas de alta carga. Por otro lado, Icingur y Altiparmak²⁹, analizaron los efectos de diferentes números de cetano de combustible (CN) y presiones de inyección de combustible en un motor diésel. Para este propósito, los combustibles con 46, 51, 54.5 y 61.5 CN fueron probados en un motor DI Diesel de cuatro cilindros. Los resultados mostraron que las emisiones de NO_x, SO₂ y CO se reducen aproximadamente un 15% y un 5%, respectivamente, cuando el número de cetano en el combustible aumenta para la presión de inyección estándar, pero el valor del humo aumenta dramáticamente cuando la presión de inyección se reduce a 100 bar. En contraste, con la presión más baja, NO_x aumenta y el humo disminuye cuando la presión de inyección

²⁸ KIDOGUCHI, Yoshiyuki; YANG, Changlin; KATO, Ryoji and MIWA, Kei. Effects of fuel cetane number and aromatics on combustion process and emissions of a direct-injection diesel engine. Ecosystem Engineering. The University of Tokushima. Japan. 2000.

²⁹ ICINGUR, Yackup and ALTIPARMAK, Duran. Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions. Technical Education Faculty, Gazi University. Turkey. 2002.

aumenta a 250 bar. Aumenta el par motor en un 5% y la potencia de salida en un 4%, se observó a la velocidad de torque máxima de 2500 min⁻¹ cuando se aumenta el CN de 46 a 54.5. Sin embargo, al aumentar el CN por encima de 54.5, no hay aumentos significativos en el rendimiento del motor.

En el año 2011, Dijkstra *et al.*³⁰ mostraron la influencia del número de cetano (CN) y oxígeno del combustible en el rendimiento general del motor durante el encendido de compresión de la carga premezclado (PCCI) en el modo de combustión. Los resultados sugieren que no es posible atribuir rendimiento favorable para el Número de cetano u oxígeno de combustible, sino más bien, a la combinación de ambas propiedades en el combustible.

Ruina *et al.*³¹ realizaron un estudio donde se eligieron tres tipos de mejoradores del número de cetano con diferentes componentes químicos. Los mejoradores del número de cetano son nitrato de 2-etilhexilo, nitrato de ciclohexilo y éter de 2-metoxietilo, que se agregan a la mezcla de metanol / biodiesel con una proporción de 0.3%, 0.3% y 3% respectivamente. El resultado muestra que los mejoradores, especialmente el nitrato de ciclohexilo, tienen una función positiva al acortar el período de retardo de encendido y prolongar la duración de la combustión. En condiciones nominales, los tres mejoradores reducen el NO 58% a 9,94% y la tasa máxima de liberación de calor de la mezcla con mejoradores aumenta de 1,38% a 6,78%.

³⁰ DIJKSTRA, Rutger; DI BLASIO, Gabriele; BOOT, Michael; CARLO, Beatrice and BERTOLI, Claudio. Assessment of the Effect of Low Cetane Number Fuels on a Light Duty CI Engine: Preliminary Experimental Characterization in PCCI Operating Condition. SAE International. 2011.

³¹ LI, Ruina; WANG, Zhong; NI, Peiyong; ZHAO, Yang; LI, Mingdi and LI, Lilin. Effects of cetane number improvers on the performance of diesel engine fuelled with methanol/biodiesel blend. School of Automobile and Traffic Engineer, Jiangsu University, Zhenjiang, China. 2013.

Adicionalmente, uno de los estudios más relevantes para la realización de este proyecto fue el documento que desarrollaron Ahmed y Chaichan³², donde fue propuesto y probado un tipo de mejorador del número de cetano para ser utilizado con combustible diesel como medio para la reducción de emisiones. La adición de (nitrato de 2-etilhexilo) se diseñó para aumentar el número de cetano en tres etapas, 50, 52 y 55 en comparación con el combustible diesel convencional usado cuyo CN era 48.5. La adición del mejorador CN da como resultado una disminución en el consumo de combustible específico al freno en aproximadamente un 12,55% y aumentan la eficiencia térmica del freno en aproximadamente un 9%. Simultáneamente, las características de emisión de cuatro combustibles se determinan en un motor diesel. A altas cargas, un poco de penalización de las emisiones de CO y HC en comparación con el combustible diesel de referencia. Las emisiones de NOx de los combustibles con mayor CN disminuyen 6%, y el CO de estos combustibles se reduce a aproximadamente 30.7%. El ruido del motor se redujo al aumentar el CN a aproximadamente el 10.95%. Los resultados indican el potencial de la reforma diesel para una combustión limpia en motores diesel.

Mientras, LABECKAS *et al.*³³ realizaron un estudio que se ocupó de los efectos producidos por la variación individual del número de cetano, el contenido de oxígeno del combustible sobre el retardo de encendido, el fenómeno de combustión, la liberación máxima de calor tasa y la variación cíclica de un motor diesel CRDI turboalimentado. El análisis se realizó sobre bases comparativas con los valores correspondientes medidos con mezclas de 'línea base' con CN = 51.2 o contenido de oxígeno cero y un diésel puro para revelar las posibles tendencias en desarrollo.

³² AHMED, Sabah Tarik and CHAICHAN, Miqdam Tariq. Effect of Fuel Cetane Number on Multi-Cylinders Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions. Department of Machines and Equipment Engineering /University of Technology. Al-Khwarizmi Engineering Journal, Vol. 8, No. 1. 2012. pp. 65 -75.

³³ LABECKAS, Gvidonas; SLAVINSKAS, Stasys and KANAPKIENE, Irena. The individual effects of cetane number, oxygen content or fuel properties on the ignition delay, combustion characteristics, and cyclic variation of a turbocharged CRDI (common rail direct injection) diesel engine. Kaunas Academy, Lithuania. 2017.

El índice de cetano mejorado de los combustibles oxigenados mejoró la combustión y redujo la variación cíclica cuando se opera a alta velocidad, principalmente a 2500 rpm. Esta investigación tuvo continuación en una segunda parte donde se analizaron las diferentes propiedades del combustible en el etanol o el biodiésel. Se utilizaron tendencias en desarrollo en las características de combustión para interpretar los cambios resultantes en el rendimiento del motor, las emisiones y el humo.

Finalmente, KUMAR *et al.*³⁴ presentaron un artículo que llevó a cabo una investigación para estudiar los efectos del mejorador de cetano (nitrato de 2-etilhexilo) (2-EHN) sobre el rendimiento, las características de combustión y emisión de un motor CI mono cilíndrico de velocidad constante alimentado con E20 (bioetanol (20%) - petrodiesel (80%)). Se utilizó un mejorador de cetano, 2-EHN a una concentración de 1000 ppm y 2000 ppm con el combustible de prueba (E20) y los resultados se compararon con el petrodiesel. Los resultados mostraron que E20EHN1000 tenía un 3,8% más de potencia al freno (BP) a la del petrodiesel y el consumo de combustible específico del freno (BSFC) fue similar con E20 y petrodiesel.

³⁴ KUMAR, Himansh; KUMAR, Anil Sarma and KUMAR, Pramod. A novel approach to study the effect of cetane improver on performance, combustion and emission characteristics of a CI engine fuelled with E20 (diesel – bioethanol) blend. (Artículo de investigación). Mechanical Engineering Department, NIT Jalandhar, Punjab, India. 2019.

5. MODELO CERO-DIMENSIONAL IMPLEMENTADO

En el presente capítulo se presentará el modelo cero-dimensional que será usado en el proyecto, recordando que uno de los objetivos presentados consiste en la validación del modelo.

Para lograr lo anterior, partimos del proyecto de maestría realizado por el *Ing. Gabriel Fernando García* y el *Grupo GIEMA (de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad Industrial de Santander)* llamado: "Herramienta computacional para el cálculo de los parámetros de desempeño de un motor diésel ID de cuatro tiempos", en el cual se formuló un software a partir del análisis cero dimensional de la combustión; dicha herramienta computacional fue nombrada "ABA". A continuación, se hará la descripción de los factores que se tuvieron en cuenta para su realización, al igual que una explicación de la interfaz y de los parámetros más importantes dentro del programa.

5.1 METODOLOGÍA

5.1.1 Descripción del modelo. Se realizó un balance de energía en la cámara de combustión del motor, para ello se tuvieron en cuenta las siguientes suposiciones:

- Presión uniforme en la cámara de combustión.
- El fluido en cámara está constituido por una mezcla de aire, combustible gaseoso y productos resultantes de una combustión estequiométrica.
- El fluido se comporta como un gas ideal.
- La temperatura utilizada para el cálculo de las propiedades del gas, es la temperatura media del cilindro.
- El cilindro se considera como un sistema cerrado durante el proceso de compresión y expansión.

5.1.2 Balance de energía. Para la realización del balance de energía el Ingeniero Gabriel tuvo en cuenta que en la cámara de combustión se consideró un sistema cerrado y además que el gas se comportaba como un gas ideal. De acuerdo a lo anterior se planteó la siguiente ecuación 12 la cual es la base del modelo desarrollado ya que permite predecir el comportamiento de la presión durante el ciclo motor:

$$\frac{dQR}{d\theta} = \left(\frac{1}{\gamma - 1}\right) * V * \frac{dP}{d\theta} + \left(\frac{\gamma}{\gamma - 1}\right) * P * \frac{dV}{d\theta} + \Sigma \frac{dQw}{d\theta} \quad (12)$$

Donde:

- $\frac{dQR}{d\theta}$: Tasa de calor liberado en la combustión [KJ/°]
- $\frac{dQw}{d\theta}$: Tasa de transferencia de calor a las paredes del cilindro [KJ/°]
- γ : Relación de calores específicos de la mezcla
- V: Volumen en cámara
- P: Presión en cámara

5.1.3 Calor liberado en la combustión. Se determino la tasa de calor liberado en la combustión ($\frac{dQR}{d\theta}$) por la siguiente ecuación 13, llamada ecuación doble de Wiebe ³⁵

$$\begin{aligned} \frac{dQR}{d\theta} = & 6.9 \frac{dQp}{\theta p} (Mp + 1) \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta p}\right)^{Mp} * \exp \left[-6.9 \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta p}\right)^{(Mp+1)} \right] \\ & + 6.9 \frac{Qd}{\theta d} (Md + 1) \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta p}\right)^{Md} \exp \left[-6.9 \left(\frac{\theta - \theta_0}{\theta p}\right)^{(Md+1)} \right] \end{aligned} \quad (13)$$

³⁵ N. MIYAMOTO, T. CHIKAHISA, T. MURAYAMA, and R. SAWYER, "Description and Analysis of Diesel Engine Rate of Combustion and Performance Using Wiebe's Functions," SAE International, Warrendale, PA, 850107, Feb. 1985.

Donde:

- θ_p : Ángulo de duración de la combustión premezclada.
- θ_d : Ángulo de duración de la combustión por difusión.
- θ_o : Ángulo de inicio de la combustión.
- Q_p : Calor liberado en la combustión premezclada.
- Q_d : Calor liberado en la combustión por difusión.
- M_p : Factor de forma de la ecuación de Wiebe premezclada.
- M_d : Factor de forma de la ecuación de Wiebe por difusión.

5.1.4 Tiempo de retardo en la ignición. Es necesario conocer el tiempo de retraso de ignición para calcular el ángulo de inicio de la combustión (θ_o). Este es definido como el tiempo que transcurre entre el momento en que se inyecta el combustible y el momento en que empieza la combustión. Para determinar ese tiempo usaron la ecuación de Hardenberg y Hase³⁶:

$$t_{ing} = \left[\frac{0.36 + 0.22C_m}{0.006n_m} \right] * \exp \left[EA \left(\frac{1}{R_u T} - \frac{1}{17190} \right) \left(\frac{21.2}{p - 12.4} \right)^{0.63} \right] \quad (14)$$

Donde:

- $EA=618840/(CN+25)$: Energía de activación aparente
- CN : Numero de cetano
- C_m : Velocidad media del pistón [m/s]
- R_u : Constante universal de los gases [J/mol*K]
- T : Temperatura media del gas [K]
- n_m : Régimen de giro del motor [min-1]
- P : Presión del gas [KPa]

³⁶ H. O. HARDENBERG and F. W. HASE, "An Empirical Formula for Computing the Pressure Rise Delay of a Fuel from Its Cetane Number and from the Relevant Parameters of Direct-Injection Diesel Engines," SAE International, Warrendale, PA, 790493, Feb. 1979.

5.1.5 Calor transferido en las paredes. La ecuación usada abarca la convección y la radiación en un solo coeficiente, dicha ecuación fue propuesta por Woschini ³⁷

$$\frac{dQ_w}{dt} = h_g * A * (T - T_w) \quad (15)$$

$$h_g = 3.26D^{-0.2}P^{0.8}T^{-0.55} \left[C_1 C_m + \frac{C_2 V_d T_{ref}}{P_{ref} V_{ref}} (P - P_m) \right]^{0.8} \quad (16)$$

Donde:

- h_g : Coeficiente de transferencia de calor [W/m²*K]
- T : Temperatura media del gas [K]
- A : Área de transferencia de calor [m²]
- D : Diámetro del cilindro [m]
- P : Presión del gas [KPa]
- V_d : Volumen desplazado en la carrera del pistón [m³]
- P_m : Presión del motor en arrastre [KPa]
- C_1 y C_m : Coeficientes de la ecuación de Woschni.

Para determinar la temperatura media en las paredes (T_w) utilizaron la ecuación planteada por Armas³⁸.

$$T_w = T_{ref} + a * (\rho_c * C_m)^{0.8} + b * pme \quad (17)$$

Donde:

- T_w : Temperatura media de las paredes.
- T_{ref} : Temperatura del refrigerante.
- ρ_c : Densidad de la carga en el colector de admisión [kg/m³]

³⁷ G. WHOSCHNI, "A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine," SAE International, Warrendale, PA, 670931, Feb. 1967.

³⁸ O. ARMAS Vergel and F. P. GONZALEZ, *Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores diesel de inyección directa*. Universidad Politécnica de Valencia, 1998.

- p_{me} : Presión media efectiva [bar]
- a y b: Constantes de ajuste.

5.1.6 Volumen, cilindrada y área de transferencia de calor. Partiendo de la geometría general del cilindro del motor, se calcularon el volumen instantáneo de la cámara de combustión $V(\theta)$, el área de transferencia de calor $A(\theta)$ y la variación del volumen de la cámara con respecto al ángulo de avance del cigüeñal $\frac{dV(\theta)}{d\theta}$. De aquí se obtiene:

$$V(\theta) = \frac{\pi}{180} \left(V_d \left[\frac{1 - \cos\theta}{2} + \frac{L}{S} - \frac{1}{2} \sqrt{\left(\frac{2L}{S}\right)^2 - (\text{sen}\theta)^2} \right] + \frac{V_d}{r-1} \right) \quad (18)$$

$$A(\theta) = \frac{\pi D^2}{4} + \frac{4V(\theta)}{D} \quad (19)$$

$$\frac{dV(\theta)}{(d\theta)} = \frac{V_d}{S} \left[\frac{\text{sen}2\theta}{2\sqrt{\left(\frac{2L}{S}\right)^2 - (\text{sen}\theta)^2}} + \text{sen}\theta \right] \quad (20)$$

5.1.7 Relación de calores específicos de la mezcla de gases. Como se había mencionado anteriormente se asumió que el gas en la cámara de combustión está compuesto por una mezcla de aire y gases residuales, esto es posible gracias que en el trabajo se consideró al cilindro como un sistema cerrado con adición de calor. Por lo tanto, la relación de calores específicos de la mezcla de gases para cada ángulo de giro del cigüeñal, fue calculado mediante la siguiente ecuación:

$$\gamma(\theta) = \frac{[1 - (mfb(\theta) + f)]c_{pa} + (mfb(\theta) + f)c_{pr}}{[1 - (mfb(\theta) + f)]c_{va} + (mfb(\theta) + f)c_{vr}} \quad (21)$$

Donde:

- $mfb(\theta)$: Fracción de combustible quemado.
- f : Fracción de gas residual en el cilindro.
- Cp : Calores específicos [KJ/Kg*K] (Donde los subíndices a y r hacen referencia al aire y a los gases residuales, respectivamente.)

5.1.8 Trabajo bruto, potencia y eficiencia térmica indicada. Se usaron las ecuaciones (5, 6 y 9) para la determinación del trabajo bruto indicado por ciclo, potencia indicada y eficiencia térmica indicada, respectivamente.

5.2 INTERFAZ DE USUARIO

El diseño de la interfaz de “ABA” realizado por el Ing. Gabriel Fernando García es bastante amigable e intuitivo, de igual manera la entrega de los resultados y gráficos se pueden percibir claramente. A continuación, se enseñarán algunas ilustraciones de lo que se encuentra el usuario cuando hace uso del programa. De este modo el programa cuenta con cinco formularios, a saber: Presentación, Información, Introducción de Datos, Resultados Gráficos y Resultados Tabulados.²⁷

El formulario de presentación (figura 12) nos permite observar la interfaz principal del programa, desde este punto podemos acceder a: información del programa (*Acerca del programa*), Salir de la interfaz (*Salir*) y dar inicio al simulador (*iniciar*) donde el usuario pasaría al formulario de introducción de datos figura 13.

Figura 12. Formulario de presentación



Fuente: Autor

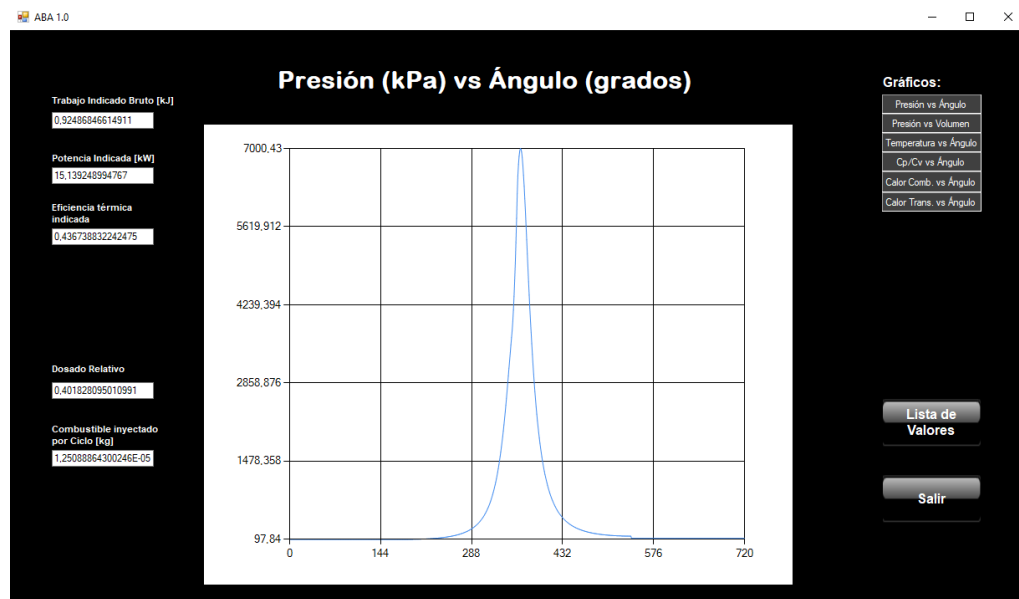
Figura 13. Formulario de introducción de datos

Fuente: Autor

En esta plantilla encontramos todos los datos que se necesitan ser introducidos en el programa para que este pueda realizar las simulaciones, en pocas palabras es aquí donde van todos los datos de entrada. Por lo tanto, y como se observa en la figura 13, hay tres secciones o tres tipos de datos de entrada: condiciones de operación, propiedades del combustible y tipo de motor.

Ahora bien, dentro de esta misma plantilla existe la opción de acceder a los resultados de la simulación (*Calcular*); desde aquí tenemos acceso tanto al formulario de Resultados gráficos, como al formulario de Resultados tabulados, (figura 14).

Figura 14. Formulario de resultados



Fuente: Autor

5.3 SIMULACIONES EN EL MODELO CERO-DIMENSIONAL

Para poder desarrollar correctamente las simulaciones en el programa, fue necesario verificar que todos los datos que se ingresarán estuviesen correctos y que aplicaran a los dos tipos de motores utilizados según el caso. Es por esto que guiándonos del proyecto desarrollado por el ingeniero Gabriel García, pudimos verificar los rangos, valores de Wiebe y otros parámetros necesarios para el desarrollo de las simulaciones.

Es importante mencionar que durante el desarrollo de las pruebas experimentales en el laboratorio de motores para el caso de la camioneta pick up 2020, los resultados obtenidos por el dinamómetro fueron inconsistentes ya que la camioneta poseía un sistema automático de tracción que interfería en la recolección de datos

durante la prueba, por lo que los resultados no fueron los esperados. Debido a esta situación fue necesario validar las simulaciones obtenidas por el modelo matemático, con las curvas de desempeño suministradas por el fabricante (Figura 41) y así obtener conclusiones respecto al porcentaje correlación en los resultados.

5.3.1 Consideraciones principales. Para comenzar con la simulación es necesario establecer las especificaciones técnicas de los vehículos a utilizar, además de formular las condiciones del combustible usado en la fase experimental, la cual serán aplicadas para la realización de las simulaciones. En la tabla 2 se observa los datos técnicos tanto de la camioneta pick up 2008 como de la 2020.

Tabla 2. Datos técnicos de los vehículos

	Camioneta A	Camioneta B
Modelo	2008	2020
Combustible	Diésel	Diésel
Tipo de motor	4 tiempos	4 tiempos
Arreglo del motor	En línea	En línea
Numero de cilindros	4	4
Volumen desplazado	2,953 [cm3]	2,776 [cm3]
Relación de compresión	17,9:1	16,5:1
Diámetro x Carrera	96 x 102 [mm]	94 x 100 [mm]
Longitud de la biela	183,6 [mm]	180 [mm]
Angulo de avance	11°	14°
Válvulas por cilindro	2	4
Tipo de inyección	Directa	Directa

Fuente: Fabricantes

Ahora bien, en cuanto a las propiedades del combustible, que es uno de los parámetros de entrada en las simulaciones (que no serán modificados independientemente de las especificaciones del motor a excepción del número de cetano), en la tabla 3 se presentan dichas propiedades del combustible diésel usado en las pruebas experimentales de laboratorio.

Tabla 3. Propiedades del combustible usado en pruebas experimentales

Laboratorio	Método	Componente	Unidad	Tipo de combustible		
				Diésel CN 46	Diésel CN 48	Diésel CN 51
Catálisis	Azufre en HC Líquidos CAT D5453	Azufre	ng/microlitro	7,9	7,9	7,9
Catálisis	Densidad Digital D4052_01	Densidad 60°F	g/mL	0,858	0,858	0,858
Catálisis	Densidad Digital D4052_02	Gravedad API a 60°F	°API	33,27	33,26	33,25
Motores	CN Derivado - ASTM D 6890	Número de Cetano Derivado	CN	46	48	51
Formula Molecular				C₁₀H₂₂		
Poder Calorífico				42,5 [MJ/Kg]		

Fuente: ICP

Los datos que observamos en la tabla 3 fueron suministrados por el Centro de Innovación y Tecnología ICP, la formula molecular y el poder calorífico del combustible se obtuvo de [27]; aclarando que para efecto de las simulaciones no será modificado, esto es posible gracias a que el aumento del número de cetano se realizó mediante aditivos por lo que su composición química y poder calorífico varía muy poco.

Para la realización de las simulaciones en el programa, se tuvieron en cuenta los rangos límite para los valores de la ecuación de Wiebe, es decir los ángulos de duración de la combustión (θ_p , θ_d y $\Delta\theta$) y los factores de forma de dicha ecuación (M_p y M_d), que fueron ajustados a partir de los datos experimentales realizados en el laboratorio de motores del Centro de Innovación y Tecnología ICP, además se utilizó como guía el artículo de investigación “*Description and Analysis of Diésel Engine Rateo of Combustión and Performance Using Wiebe’s Functions*”³⁵ donde se encuentran los rangos comunes de la ecuación de Wiebe para motores diésel de inyección directa.

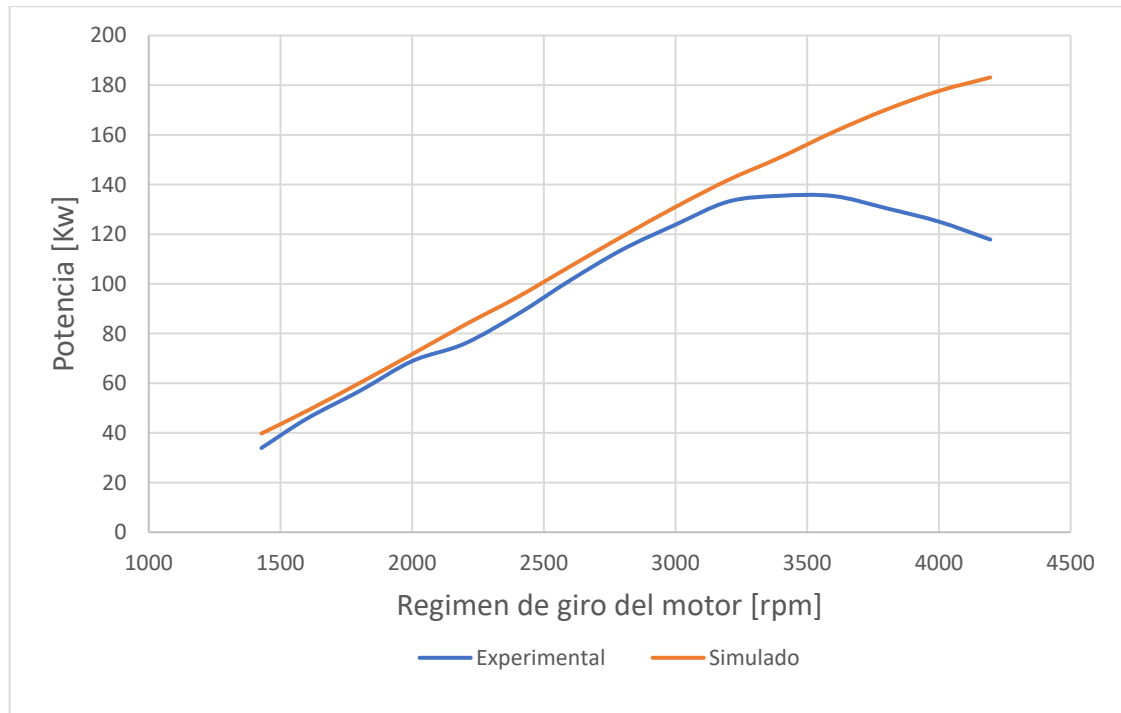
Ahora bien, a partir de este análisis se obtuvieron los siguientes valores para la Camioneta 2008: $\theta_p = 8$, $\theta_d = 40$, $\Delta\theta = 32$, $M_p = 5$ y $M_d = 0.5$. Mientras que para el caso de la Camioneta 2020, los valores fueron: $\theta_p = 7$, $\theta_d = 70$, $\Delta\theta = 63$, $M_p = 3,5$ y $M_d = 0,68$.

La validación de los datos se obtuvo mediante una comparación entre los valores experimentales y los simulados. Esta comparación se hizo por medio de los valores de potencia obtenidos de la camioneta Pick Up 2008, para ello, se tuvo en cuenta el dosado como dato de entrada en el *programa ABA*, el cual varía a medida que aumentan las rpm, teniendo en cuenta que en un motor de combustión interna la inyección de combustible depende de la velocidad del giro a la cual se quiera llevar el motor. Para la camioneta 2008 el dosado varió desde [0.02273 – 0.0311], valores que representan la relación aire/combustible que ingresa a la cámara de combustión en el motor. Mientras que para la camioneta 2020 el dosado varió desde [0.02061 – 0.3142].

Posteriormente se realizarán las simulaciones de Presión vs. ángulo de giro, Potencia indicada vs. Régimen de giro del motor y Eficiencia térmica indicada vs. Dosado, para así dar cumplimiento al planteamiento dado en este proyecto.

5.3.2 Validación del modelo para la Camioneta Pick Up 2008. Se puede observar en la figura 15, los resultados de potencia obtenidos tanto de manera experimental como simulada. Recordando que para los datos simulados ya fueron ajustados los parámetros de Wiebe.

Figura 15. Comparación entre curvas experimentales y simuladas de potencia vs. régimen de giro de la Camioneta 2008



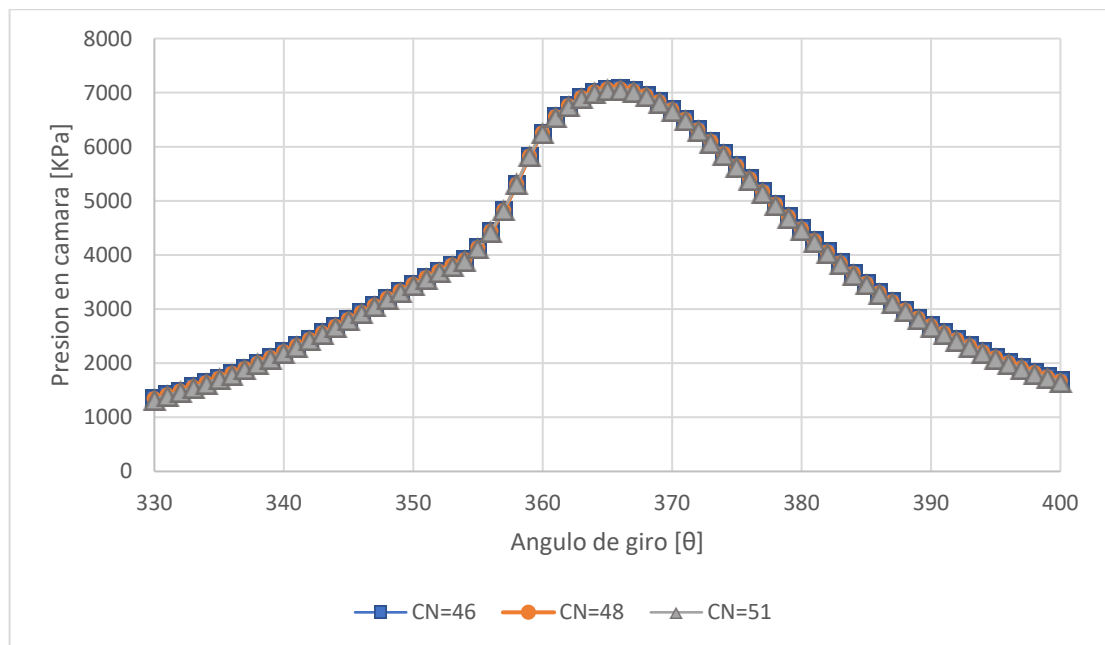
Fuente: Autor

La correlación obtenida fue del 93.4%; considerando que la comparación se está realizando entre datos experimentales y datos simulados mediante un modelo matemático, el resultado está por encima del 90%, que significa que el modelo es capaz de predecir el comportamiento del motor con los parámetros de entrada suministrados.

A continuación, se presentará la comparación entre valores de presión, potencia indicada y eficiencia térmica indicada obtenidas mediante el programa *ABA* para diferentes valores de números de cetano (46, 48 y 51).

5.3.2.1 Presión vs. ángulo de giro. El diagrama de presión en cámara vs. ángulo de giro del cigüeñal es usado generalmente para conocer el comportamiento térmico del motor, permitiendo conocer la variación de la presión en cámara al cambiar las propiedades del combustible. En la figura 16 se presenta el diagrama de comparación de presión en cámara para combustible diésel con diferentes valores de número de cetano con el motor girando a 3750 rpm y un dosado de 0.038.

Figura 16. Presión en cámara vs. Angulo de giro del cigüeñal para diferente número de cetano – Camioneta Pick Up 2008.

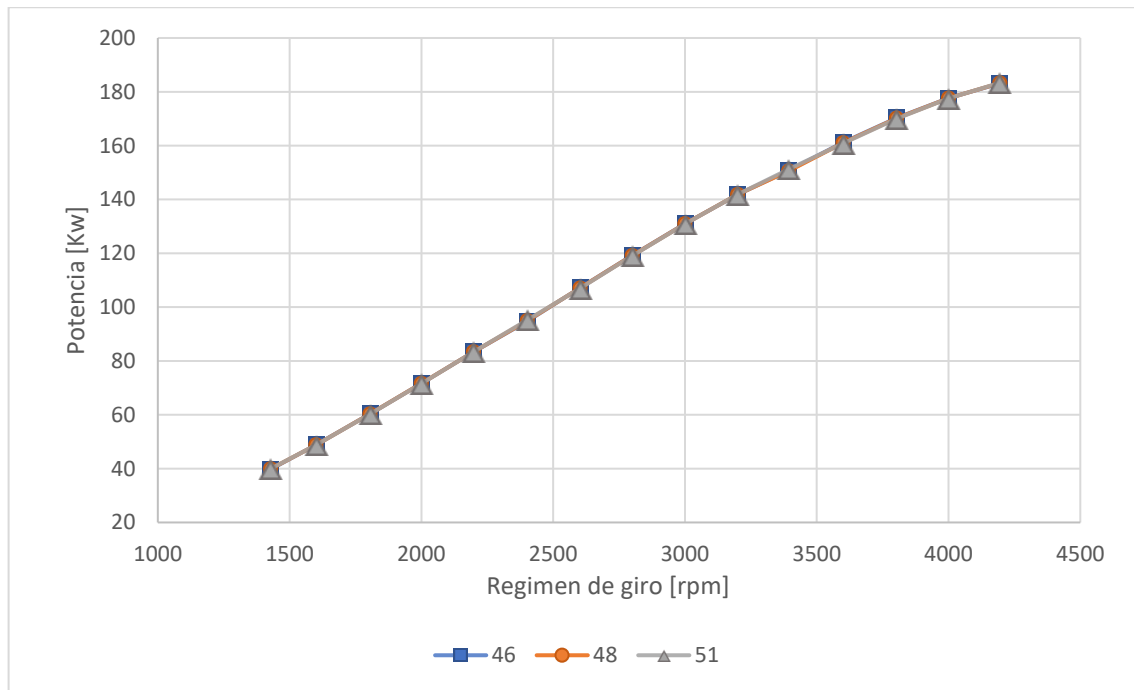


Fuente: Autor

Se observa una clara tendencia similar entre las gráficas, esto indica que, según las simulaciones, la variación del número de cetano no afecta en la presión en cámara dentro del cilindro. Por otro lado, se pueden precisar los valores exactos de presión máxima alcanzada para cada diagrama: 7067 [KPa], 7069 [KPa] y 7071 [KPa] para número de cetano de 46, 48 y 51 respectivamente, esta presión máxima en cada caso se consiguió para un ángulo de giro de 366 [°].

5.3.2.2 Potencia indicada vs. Régimen de giro del motor. La potencia indicada es la característica más representativa ya que la podemos comparar con un valor experimental como se realizó en la sección 5.3.2. En la figura 17 se observa el diagrama simulado de la potencia indicada vs. régimen de giro para diferentes valores de número de cetano.

Figura 17. Potencia vs. Régimen de giro para diferente número de cetano- Camioneta Pick Up 2008

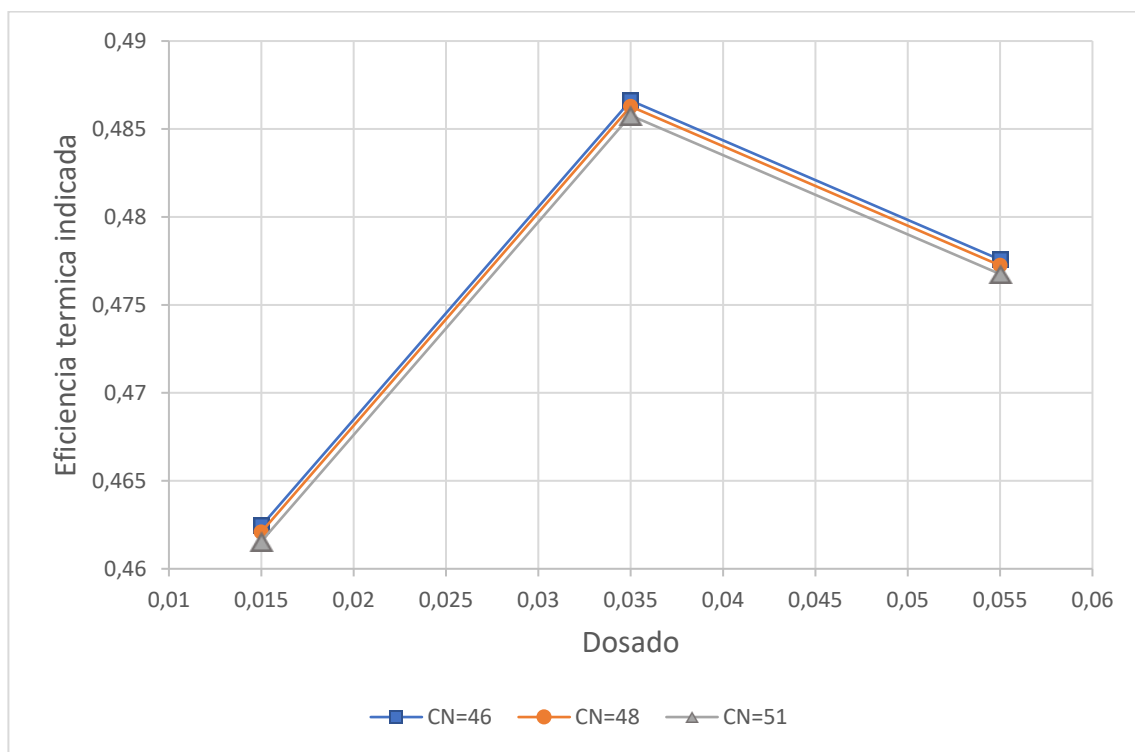


Fuente: Autor.

Al igual que la presión en cámara, la potencia indicada para diferente número de cetano tiene la misma tendencia; esto nos indica que la variación del número de cetano según las simulaciones no afecta directamente a la potencia indicada del motor, tendencia que era predecible debido a que como se mostrara más adelante, la misma tendencia se tuvo en las pruebas experimentales, donde el aumento del número de cetano no afecta en la potencia del vehículo.

5.3.2.3 Eficiencia térmica indicada vs. Dosado. En la figura 18 se presenta el diagrama de eficiencia térmica contra dosado, donde se podrá observar el cambio en la eficiencia según el dosado de combustible en el motor que será estudiado para tres dosados específicos [0.015, 0.035 y 0.055], además se observará el impacto de la variación del número de cetano en la eficiencia térmica. Las simulaciones se realizaron para un régimen de giro fijo de 3750 rpm.

Figura 18. Eficiencia térmica vs. Dosado para diferentes números de cetano – Camioneta Pick Up 2008.



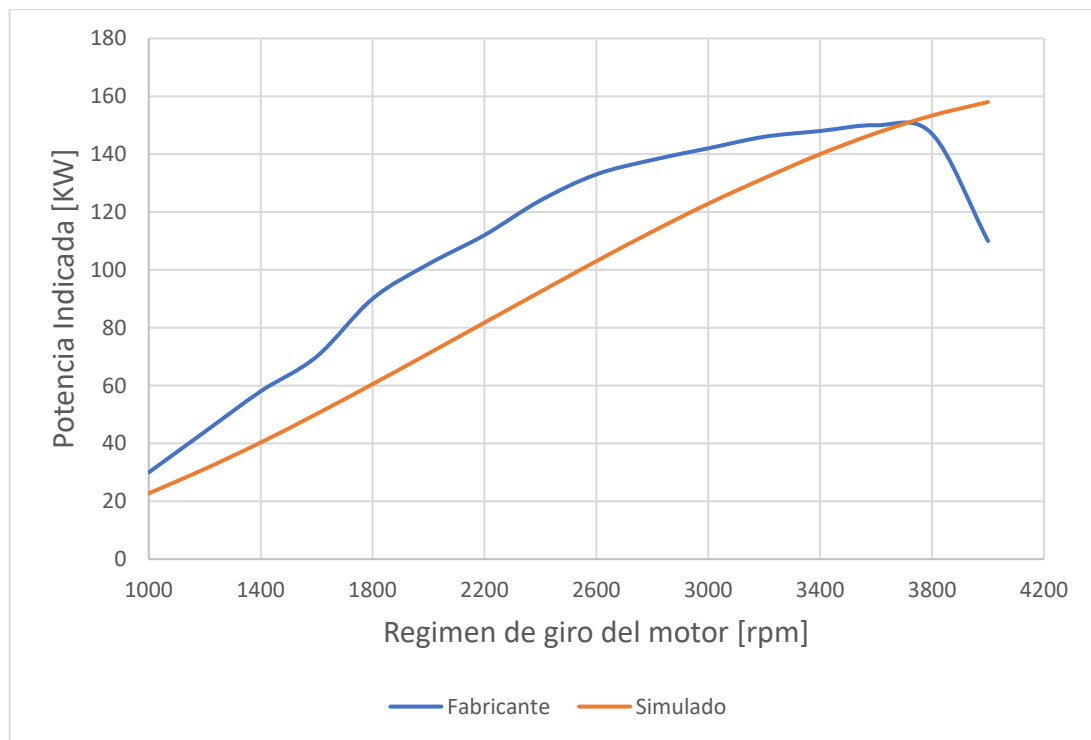
Fuente: Autor

En esta figura hay dos aspectos para analizar, uno de ellos es el aumento de la eficiencia del motor cuando el dosado aumenta, obteniéndose para los datos simulados y en los tres casos de número de cetano, una eficiencia máxima cuando el dosado corresponde a 0.035. Por otro lado, y como era de esperarse debido a los dos diagramas anteriores, según la simulación realizada la variación del número de cetano no tiene un impacto significativo en la eficiencia térmica indicada.

5.3.3 Validación del modelo para la Camioneta Pick Up 2020. Para el caso de las simulaciones de la camioneta modelo 2020, como fue mencionado al inicio de este capítulo, fue necesario validar los resultados obtenidos, con los dados por el fabricante.

Se puede observar en la figura 19, los resultados de potencia dados por el fabricante y los obtenidos de manera simulada. Recordando que para los datos simulados ya fueron ajustados los parámetros de Wiebe.

Figura 19. Comparación entre curvas dada por el fabricante y simuladas de potencia vs. régimen de giro de la Camioneta 2020

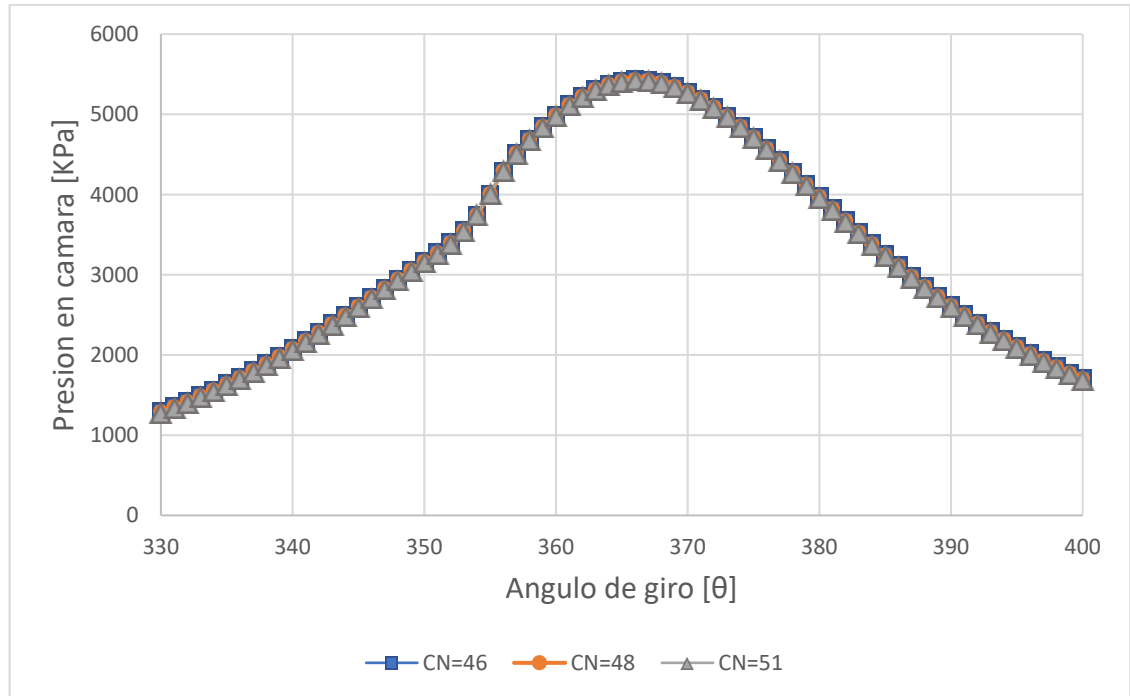


Fuente: Autor

La correlación obtenida para este caso fue del 90,1%; igualmente como con la camioneta 2008, el modelo tiene un porcentaje mayor al 90%, lo que significa que el modelo es capaz de predecir el comportamiento del motor con los parámetros de entrada suministrados.

5.3.3.1 Presión vs. ángulo de giro. Se observa en la figura 20 una clara tendencia similar entre las gráficas como el caso anterior, esto indica que, según las simulaciones, al igual que con la camioneta 2008 la variación del número de cetano no afecta la presión en cámara dentro del cilindro. Por otro lado, se pueden precisar los valores de presión máxima alcanzada para cada diagrama: 5426 [KPa], 5429 [KPa] y 5434 [KPa] para número de cetano de 46, 48 y 51 respectivamente, esta presión máxima en cada caso se consiguió para un ángulo de giro de 366 [°].

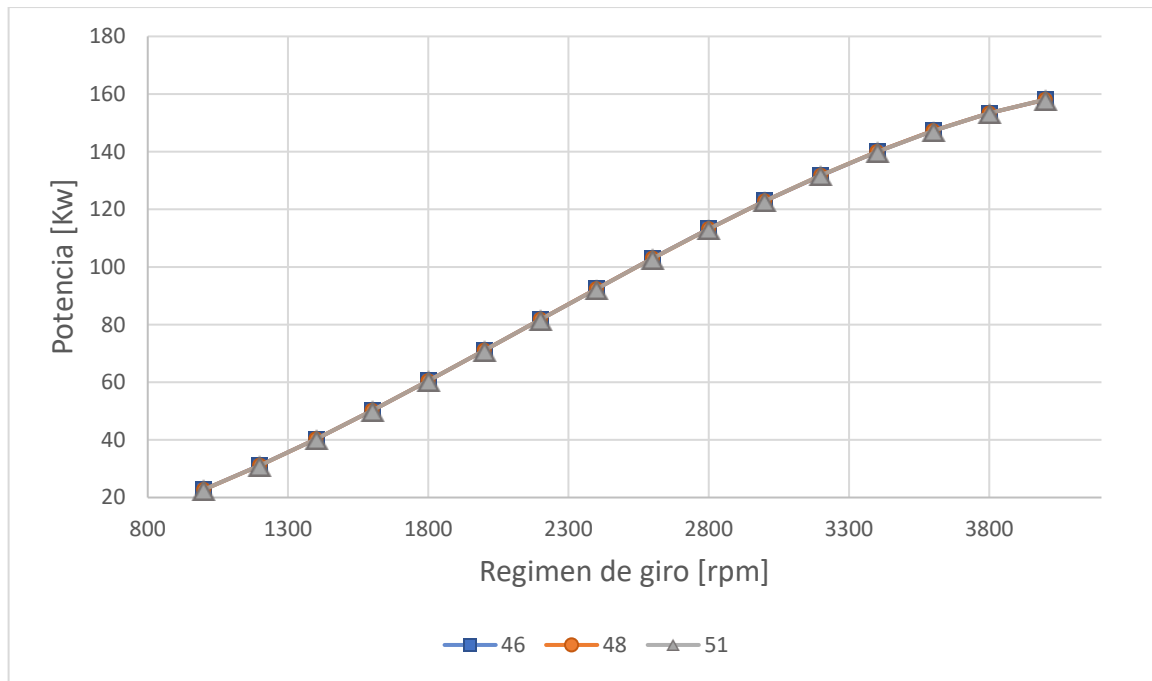
Figura 20. Presión en cámara vs. Angulo de giro del cigüeñal para diferente número de cetano – Camioneta Pick Up 2020.



Fuente: Autor

5.3.3.2 Potencia indicada vs. Régimen de giro del motor. En la figura 21, se observa que el número de cetano no tiene incidencia significativa en la potencia del motor y al igual que las simulaciones con la camioneta modelo 2008 esta potencia no varía de manera considerable cuando se modifica en número de cetano.

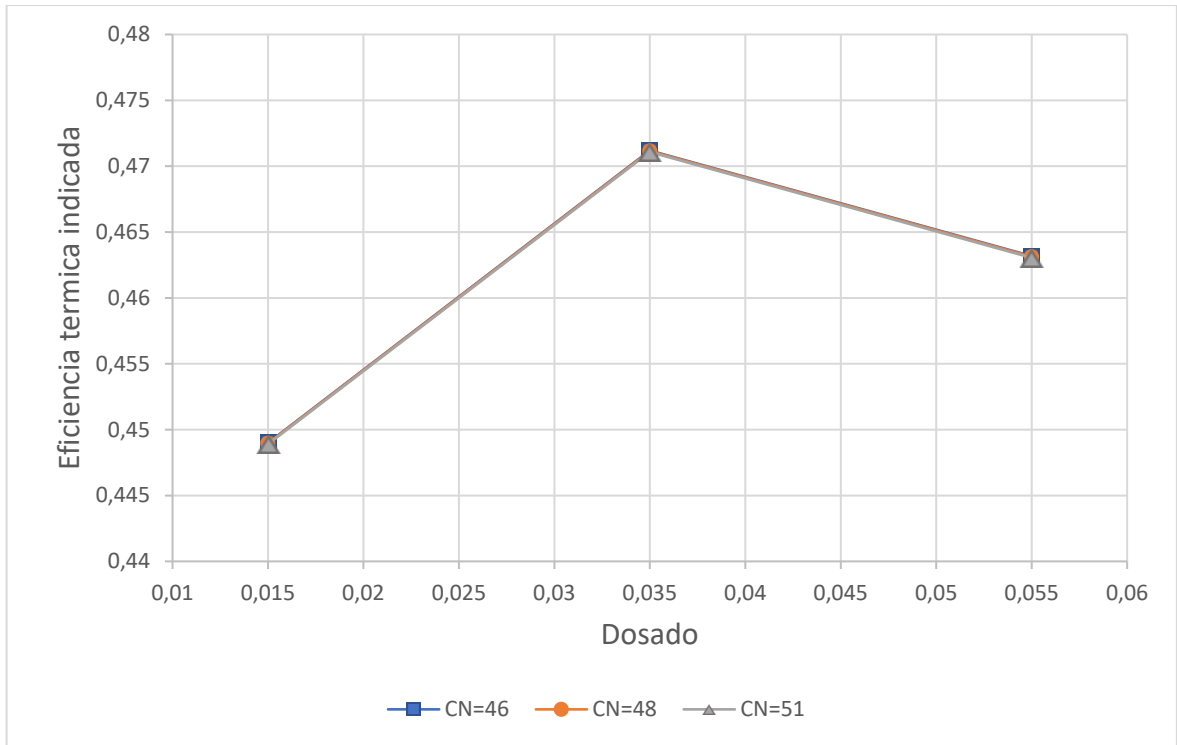
Figura 21. Potencia vs. Régimen de giro para diferente número de cetano-
Camioneta Pick Up 2020



Fuente: Autor.

5.3.3.3 Eficiencia térmica indicada vs. Dosado. En la figura 22 igualmente que en la camioneta modelo 2008, la eficiencia térmica es mayor cuando el dosado es de 0.035, de igual manera y como se ha observado durante todas las simulaciones, el número de cetano no tiene influencia directa en la eficiencia térmica del motor.

Figura 22 Eficiencia térmica vs. Dosado para diferentes números de cetano – Camioneta Pick Up 2008.



Fuente: Autor.

6. ANÁLISIS EXPERIMENTAL DEL COMBUSTIBLE

6.1 CARACTERIZACIÓN DEL EXPERIMENTO

Para poder establecer un análisis experimental bien fundamentado y con bases sólidas, contamos con el apoyo del Centro de Innovación y Tecnología (ICP) que sirve como laboratorio de pruebas de ECOPETROL; este instituto está enfocado en el análisis y desarrollo de tecnologías del petróleo y sus derivados.

Para la realización de las pruebas experimentales planteadas, fue necesario contar con equipos de la más alta tecnología, no solo en el país, sino de Latinoamérica. Equipos como el dinamómetro Mustang MD-AWD-150 o el Sistema de medición de emisiones a bordo OBS-ONE (Horiba) hicieron parte del desarrollo de nuestro proyecto. Pero antes de abordar las pruebas que se realizaron, es importante contextualizar al lector sobre la metodología de desarrollo y los protocolos que se tuvieron en cuenta para poder validar correctamente los datos obtenidos.

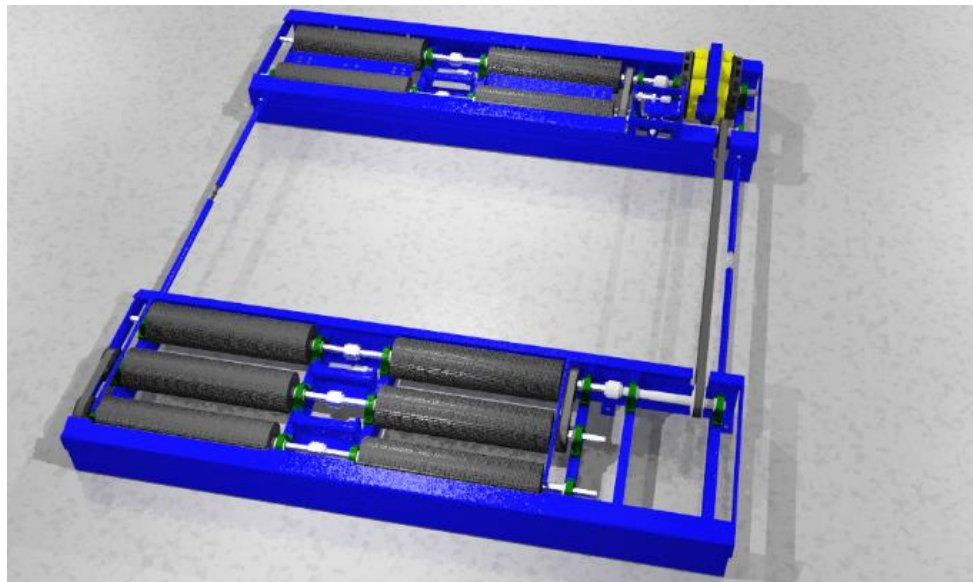
6.1.1 Combustible. Hay que partir del planteamiento que se realizó en este proyecto para poder ejecutar las pruebas correctamente, y es que la decisión que fue tomada en conjunto con el director y codirectores del proyecto, fue desarrollar el análisis variando el número de cetano del combustible diésel mediante un proceso químico llamado aditivación. Este proceso consiste básicamente en añadir aditivos químicos al combustible base provocando un aumento en el número de cetano del combustible diésel. Para este proyecto, con la idea de que fuese representativo, el combustible utilizado para realizar las pruebas fue el diésel B10, es decir que posee un 10% de biocombustibles en su composición. Este proceso de aditivación fue realizado internamente en el laboratorio del ICP, por lo que los detalles de su procedimiento son confidenciales. Pero para poder comprender en términos sencillos el resultado, los valores de cetano que se obtuvieron mediante este proceso fueron de 46, 48 Y 51.

6.1.2 Dinamómetro. El dinamómetro de chasis Mustang MD-AWD-150 (Figura 23) es un equipo resistente que se utiliza para aplicar carga a un vehículo de prueba.

Es un conjunto integrado de subsistemas mecánicos, electromecánicos y eléctricos/electrónicos que funcionan en conjunto para brindar la capacidad de simular cargas reales en carretera, mientras el vehículo se está probando, permanece en los confines seguros y controlados de un centro de pruebas. Adicionalmente durante una prueba, el dinamómetro está en la capacidad de conectar instrumentos de prueba y equipos de diagnóstico al motor del vehículo para controlar las características específicas de rendimiento del motor.

Esto le permite realizar pruebas en un vehículo mientras los instrumentos de diagnóstico de prueba están conectados al motor y al sistema de escape del vehículo, por ejemplo, los equipos de diagnóstico de emisiones como el OBS-ONE Horiba.

Figura 23. Dinamómetro Mustang MD-AWD-150



Fuente: Manual Mustang Dynamometer MD-AWD-150 [En línea]. (Recuperado el 3 de diciembre de 2020). Disponible en: <https://www.mustangdyne.com/>

Como el torque de las ruedas motrices del vehículo de prueba hacen que los rodillos del Dinamómetro giren, la unidad de absorción de energía (PAU) se opone a esta fuerza al convertir la energía cinética del vehículo en calor. Una unidad de control basada en una microcomputadora, que utiliza un circuito cerrado de control de retroalimentación, regula la cantidad de energía que es absorbida por el PAU y, da como resultado, la cantidad de carga que se impone al vehículo de prueba.³⁹ El subsistema dinamómetro se define aquí como compuesto principalmente por aquellos componentes del sistema que son de naturaleza "mecánica" o "estructural.

El PAU absorbe esta carga energizando bobinas de campo eléctrico estacionarias con una corriente continua. Estas bobinas establecen campos magnéticos a través de los cuales giran los rotores de hierro del PAU. Esta rotación genera corrientes parásitas en los rotores, que producen una fuerza contraria a la dirección del movimiento de rotación. La potencia absorbida por el PAU depende de la cantidad de potencia de CC aplicada a las bobinas de campo y las RPM de los rotores giratorios. La velocidad de rotación de los rotores se mide mediante un dispositivo magnético llamado captador magnético y se transmite al sistema de control. Cuando se conocen tanto el par (de la señal de la celda de carga) como la velocidad (de la señal de captación magnética), los caballos de fuerza se pueden determinar fácilmente.

Es importante mencionar que gracias a que el laboratorio de motores del ICP cuenta con las instalaciones adecuadas, se pudieron realizar las pruebas correspondientes siguiendo las recomendaciones del fabricante y con todas las indicaciones de uso según el manual de operación, en el capítulo 6.2 se explican a detalle los resultados de las pruebas.

³⁹ MD-150-SERIES_Manual [Consultado: 09/12/20]. [En línea]. Disponible en: https://www.mustangdyne.com/wp-content/uploads/2020/09/MD-150-SERIES_Manual.pdf

6.1.3 Ciclo FTP. Para poder estandarizar las pruebas en el laboratorio fue necesario utilizar una metodología reglamentada por los entes reguladores, que permitiera validar los datos correctamente y que se aproximaran al ciclo real de un vehículo. Uno de estos procedimientos es el ciclo FTP, que simula el recorrido del vehículo en carretera, variando la velocidad según los parámetros asignados por el usuario, permitiendo acercarse a un trayecto real del vehículo en carretera.

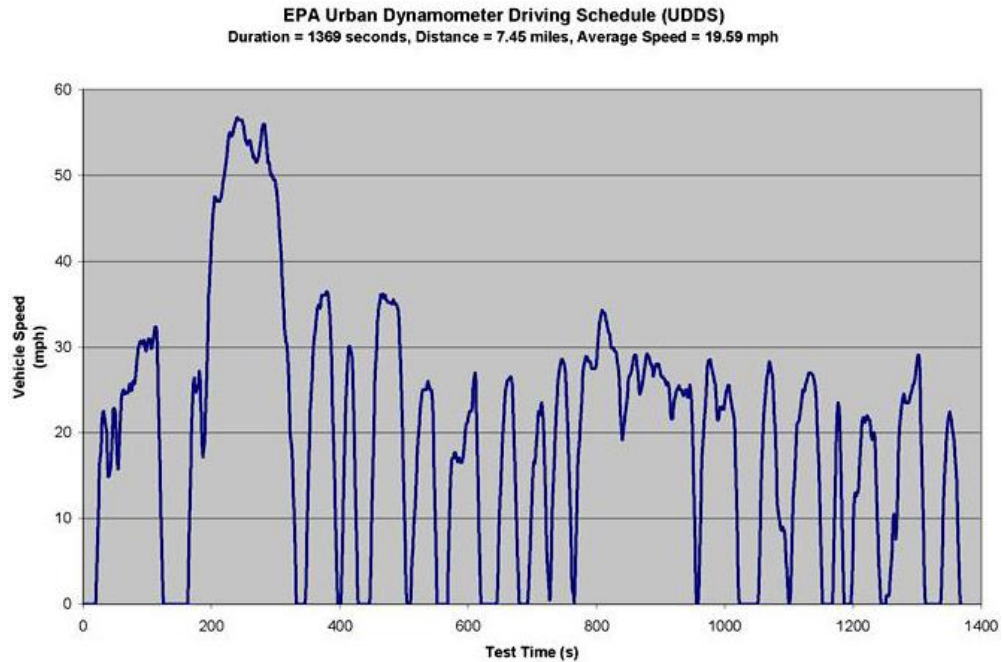
El Procedimiento de prueba federal, comúnmente conocido como FTP-72 para el ciclo de conducción en ciudad, es una serie de pruebas definidas por la Agencia de Protección Ambiental de los EE. UU. (EPA) para medir las emisiones del tubo de escape y la economía de combustible de los automóviles de pasajeros (excluyendo camiones livianos, pesados y vehículos de servicio). Este ciclo también se denomina UDDS (Urban Dynamometer Driving Schedule) o ciclo LA-4 (CFR 40, 86, Apéndice I)⁴⁰. El ciclo FTP-72 es una prueba de dinamómetro obligatoria sobre las emisiones del tubo de escape de un automóvil que representa las condiciones de conducción de la ciudad⁴¹. Este ciclo se ha utilizado para la certificación de emisiones y pruebas de ahorro de combustible de vehículos ligeros en los Estados Unidos. La prueba a menudo se denomina simplemente 'FTP'.

El ciclo simula una ruta urbana de 12,07 km (7,5 millas) con paradas frecuentes. La velocidad máxima es de 91,2 km/h (56,7 mi/h) y la velocidad media es de 31,5 km/h (19,6 mi/h). El ciclo tiene dos fases: una fase de "arranque en frío" de 505 segundos sobre una distancia proyectada de 5,78 km a una velocidad media de 41,2 km/h, y una "fase transitoria" de 864 segundos, para una duración total de 1369 segundos (*Figura 24*). Se aplican factores de ponderación de 0,43 y 0,57 a la primera y segunda fase, respectivamente. Las emisiones se expresan en g/milla o g/km.

⁴⁰ FTP 72 Cycle. [Consultado: 15/12/20]. [En línea]. Disponible en: <https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp72.php>

⁴¹ Fuel Economy Estimates [Consultado: 15/12/20]. [En línea]. Disponible en: <https://www.fueleconomy.gov/feg/info.shtml#guzzler>

Figura 24. Ciclo FTP-72



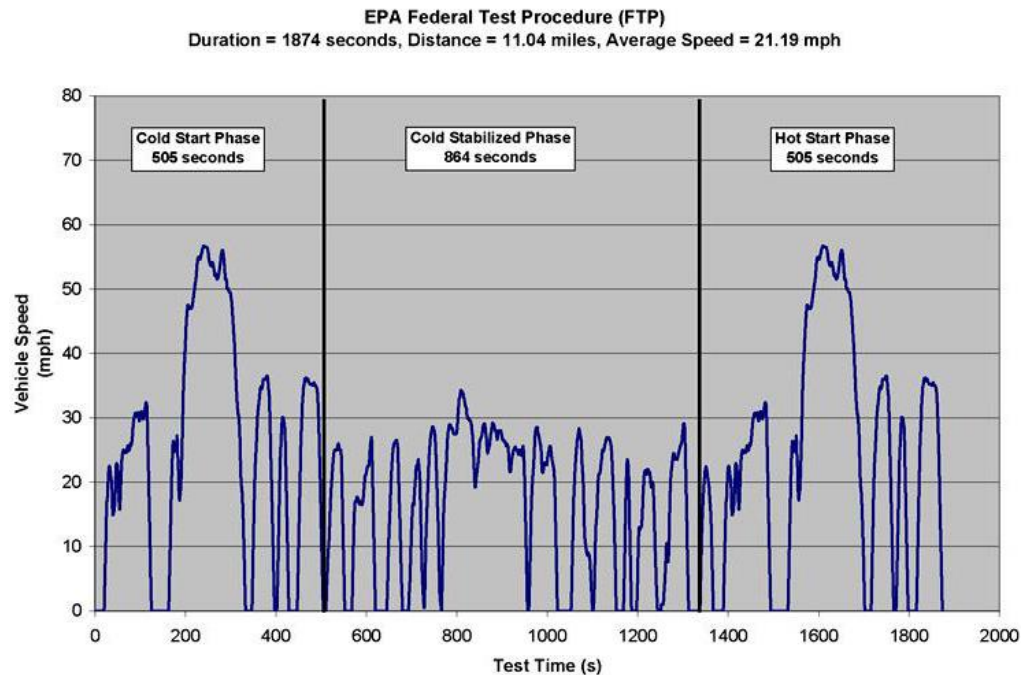
Fuente: EPA Urban Dynamometer Driving Schedule (UDDS). [En línea]. (Recuperado el 4 de diciembre de 2020). Disponible en: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-urban-dynamometer-driving-schedule-udds>

Existe una variante del ciclo FTP que agrega una tercera fase de 505 s, idéntica a la primera fase del FTP-72 pero con un arranque en caliente, esta tercera fase comienza después de que el motor se detiene durante 10 minutos⁴². Este ciclo se conoce como FTP-75 (*Figura 25*). Por lo tanto, todo el ciclo de FTP consta de los siguientes segmentos:

- Fase transitoria de arranque en frío (T ambiente 20-30 ° C), 0-505 s.
- Fase estabilizada, 506-1369 s.
- Remojo en caliente (mínimo 540 s, máximo 660 s). (Solo FTP-75)
- Fase transitoria de arranque en caliente, 0-505 s. (Solo FTP-75)

⁴² FTP 75 Cycle. [Consultado: 16/12/20]. [En línea]. Disponible en: <https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp75.php>

Figura 25. Ciclo FTP-75



Fuente: Federal Test Procedure. [En línea]. (Recuperado el 4 de diciembre de 2020).
Disponble en: <https://www.epa.gov/emission-standards-reference-guide/epa-federal-test-procedure-ftp>

Las emisiones de cada fase se recogen en una bolsa de teflón separada, se analizan y se expresan en g/milla (g/km). Los factores de ponderación son 0,43 para la fase de arranque en frío, 1,0 para la fase 'estabilizada' y 0,57 para la fase de arranque en caliente. Los siguientes son algunos parámetros del ciclo FTP-75:

- Duración: 1877 s
- Distancia recorrida: 17,77 km (11,04 millas).
- Velocidad media: 34,12 km/h (21,2 mph).
- Velocidad máxima: 91,25 km/h (56,7 mph).

Para nuestro caso y debido a la configuración que se tenía en el dinamómetro, se optó por realizar el ciclo FTP-72, cumpliendo con toda la normativa y consideraciones de la EPA para el análisis de emisiones y consumo de combustible.

6.1.4 Horiba. Para poder realizar el análisis de emisiones y concentración de partículas contaminantes entre otros, fue necesario utilizar un equipo capaz de medir estos datos y que de manera simultánea funcionara con el dinamómetro. Para este propósito fue necesario utilizar el Analizador de gases OBS-ONE o simplemente conocido como Horiba.

Y es que este aparato es el último sistema portátil de medición de emisiones diseñado para la certificación de motores/vehículos en condiciones reales de carreteras. Mide concentraciones de emisiones (CO, CO₂, THC, NO_x, NO₂ entre otros), material particulado, relación aire-combustible, caudal de escape, datos GPS, condiciones ambientales (temperatura atmosférica, humedad y presión) y calcula emisiones de masa.⁴³

Figura 26. OBS-ONE (Horiba)



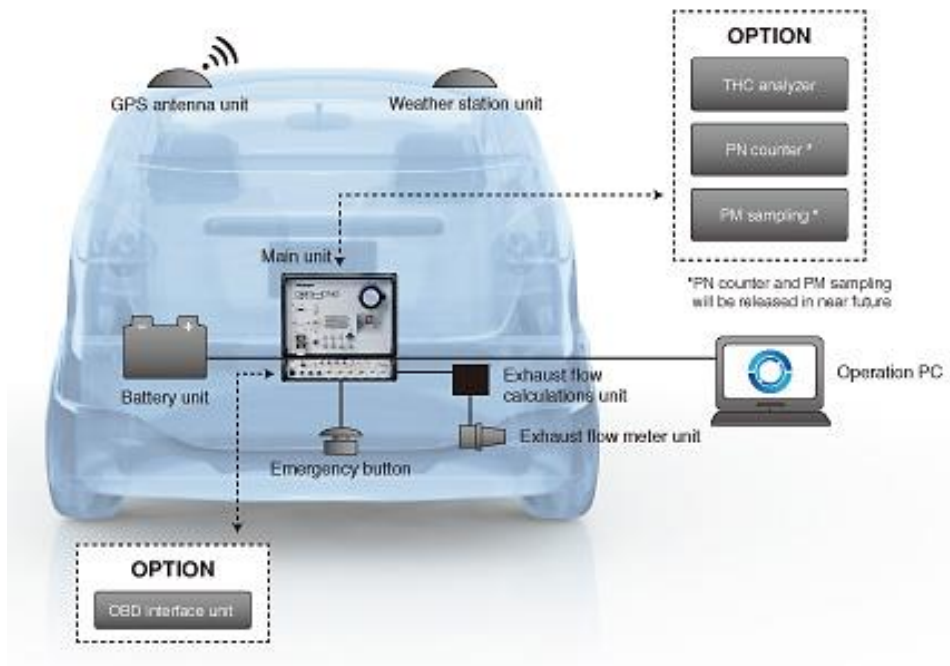
Fuente: OBS-ONE GS Unit. [En línea]. (Recuperado el 7 de diciembre de 2020).

Disponible en: <https://www.horiba.com/>

⁴³ On-board Emissions Measurement System. [Consultado: 15/12/20]. [En línea]. Disponible en: https://www.horiba.com/en_en/products/detail/action/show/Product/obs-one-gs-unit-28/

El OBS-ONE cuenta con la plataforma operativa inteligente y altamente adaptable llamada “HORIBA ONE PLATFORM” (Figura 27) que integra otros datos y optimiza el funcionamiento de la celda de prueba.

Figura 27. Configuración del Sistema OBS-ONE

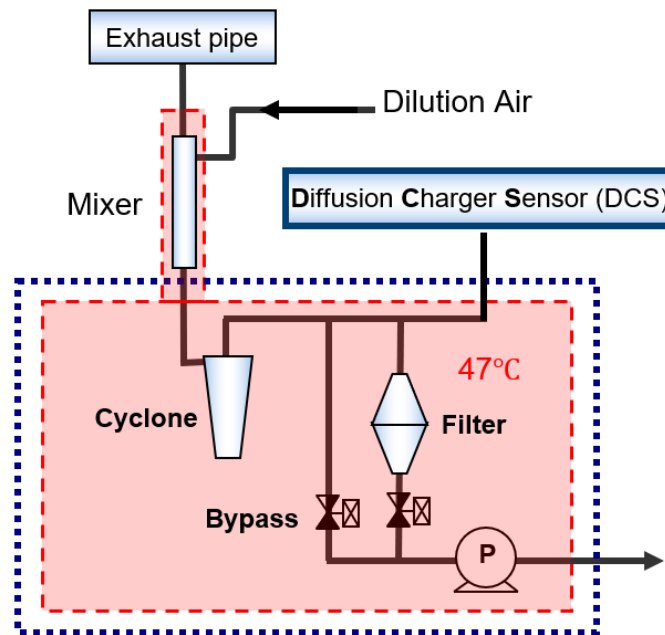


Fuente: System Configuration. [En línea]. (Recuperado el 7 de diciembre de 2020).

Disponible en: <https://www.horiba.com/>

Una de las funciones principales del Horiba es que se pueden medir la cantidad de emisiones de material particulado (PM) que expulsa el motor. Y es que, el medidor de material particulado o PM Sampler and Real-Time Sensor (Figura 28), es el encargado de cuantificar los datos de material particulado que emite el motor. Este medidor tiene dos factores que interpretan la información, el factor de división y el factor de dilución, el primer factor divide el flujo que ingresa al sistema y selecciona solo una fracción del caudal, mientras que el factor de dilución toma la cantidad de aire y humedad proporcional necesarios para realizar la prueba.

Figura 28. Esquema de funcionamiento del medidor de material particulado



Fuente: ICP

Cuando el flujo de exhosto del vehículo ingresa al sistema mediante el tubo pitot, pasa por un ciclón que se encarga de recoger todo el caudal y enviarlo por las tuberías. El equipo de PM posee dos líneas que analizan el flujo parcialmente, la primera línea es la gravimétrica (línea de medición), la cual posee un filtro que limita el paso de partículas de gran tamaño. Este filtro debe analizarse antes y después de la prueba, mediante un protocolo muy detallado donde se analizan partículas extremadamente pequeñas, por el orden de las 4 cifras decimales, verificando el nivel de humedad una vez realizada la prueba. El equipo debe ser calibrado para establecer el valor 0 de material particulado antes de realizar las pruebas. La segunda línea, es la que pasa a través del sistema de difusión de cargas (DCS) o línea de estimación, ya que mediante este sistema se proyectan los valores de material particulado cada 0,1 segundos. Este sensor interpreta el flujo mediante cargas eléctricas, las cuales miden la amplitud de los aerosoles presentes en el caudal. En general, este método de análisis está aprobado por la EPA y además cumple con los requisitos preliminares de la prueba EURO 6.

La simulación de estas condiciones en un banco de pruebas de componentes o en un dinamómetro de chasis (Como es el caso de este proyecto) permite obtener resultados de prueba reproducibles y además permite a los fabricantes de vehículos reducir al mínimo las costosas pruebas "en la carretera". Con la integración de un simulador de altitud y un equipo de medición de emisiones, es posible simular pruebas de conducción con un conjunto determinado de parámetros ambientales tantas veces como se desee para optimizar el comportamiento del vehículo y los componentes individuales.

6.2 RESULTADOS DEL EXPERIMENTO

Debido a las restricciones por la pandemia del COVID-19 en el mundo y en el país particularmente, no fue posible asistir de manera presencial a las pruebas realizadas en el laboratorio de motores del ICP, es por esta razón que todo el material tanto fotográfico como estadístico, fueron suministrados por nuestro codirector, el ingeniero Sandro Gonzales, ya que él es el Líder de I+D en calidad de combustibles del centro de investigación y labora continuamente en el instituto, y junto con el apoyo de todo el equipo del laboratorio de motores, en cabeza del Ingeniero José Luis Sarmiento, todo el experimento fue posible. Es importante mencionar que el ingreso de personas externas a las instalaciones del ICP estaba prohibido durante el tiempo en que se desarrollaron las pruebas, por esta razón, todo el procedimiento fue documentado y tratado por el personal interno del instituto.

A continuación, se describen todos los resultados obtenidos por el equipo de trabajo del ICP en donde se midieron tanto los datos de desempeño del motor como también las emisiones provocadas por los gases de escape. Este proceso tardó aproximadamente entre 3 y 4 semanas, además las pruebas fueron realizadas en 6 ocasiones, debido a que en total fueron 3 tipos de combustible modificados los que se analizaron en los dos motores, tanto de la Pick Up 2008, como de la camioneta Pick Up 2020. Además, se denotan los análisis que se realizaron para la interpretación de los datos obtenidos.

6.2.1 Montaje de los equipos. Para la realización de las pruebas, tanto para la camioneta Pick Up 2008 como para la camioneta Pick Up 2020, fue necesario adecuar las instalaciones del laboratorio para cada uno de los vehículos utilizados. El primer paso era posicionar la camioneta sobre los rodillos del dinamómetro, ajustar las cadenas de seguridad y conectar las líneas para el análisis de torque y potencia.

Para llevar a cabo un control preciso de la cantidad de diesel que se inyectaba en los motores, se conectaron directamente las líneas de combustible al equipo Onosoki (*Figura 29*), que es el sistema de medición para el consumo de combustible, esto con el objetivo de facilitar el cambio de los combustibles para cada una de las pruebas. El sistema funciona mediante un grupo de válvulas que regula el flujo que ingresa al vehículo, a través de un proceso de Coriolis, donde se miden los pulsos y las vibraciones que se generan en las tuberías. Básicamente se controla y se mide la alimentación de combustible en los motores diesel utilizados.

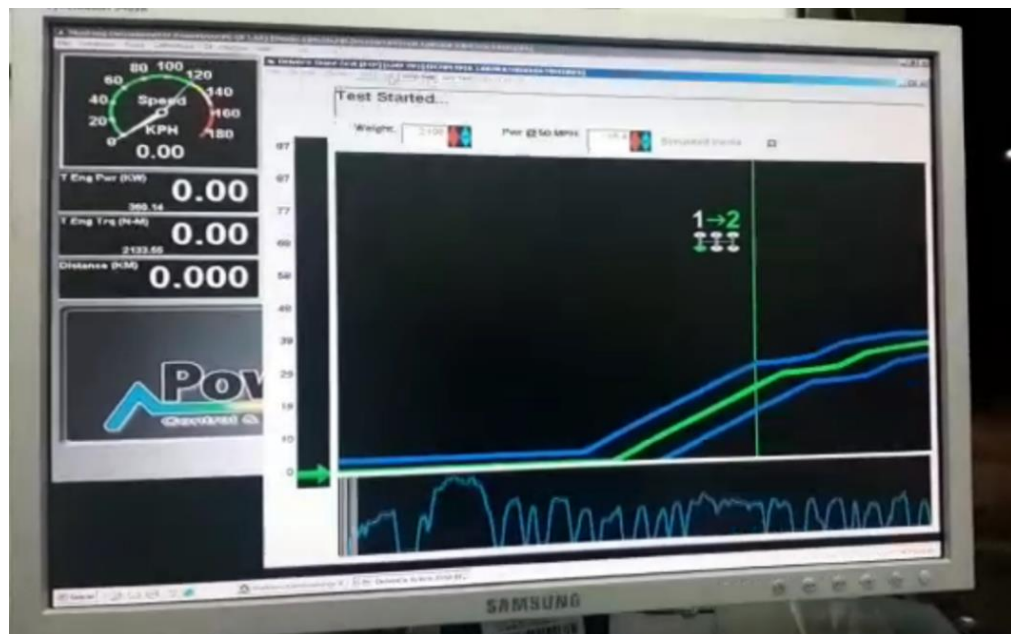
Figura 29. Sistema de medición de combustible



Fuente: ICP

Con el objetivo de cumplir con los protocolos descritos por la EPA, se realizó la configuración del software del dinamómetro que simula todo el ciclo FTP, para esto fue necesario contar con el uso de un sistema avanzado que mide las variables de desempeño del motor siguiendo los estándares del ciclo, este sistema es capaz de establecer el rango de medida permitido, es decir existen unas tolerancias máximas permitidas para el ciclo se ejecute correctamente. En la figura 30 se observa cómo es el funcionamiento del sistema y de qué manera se controla la información durante la prueba.

Figura 30. Software de análisis del ciclo FTP



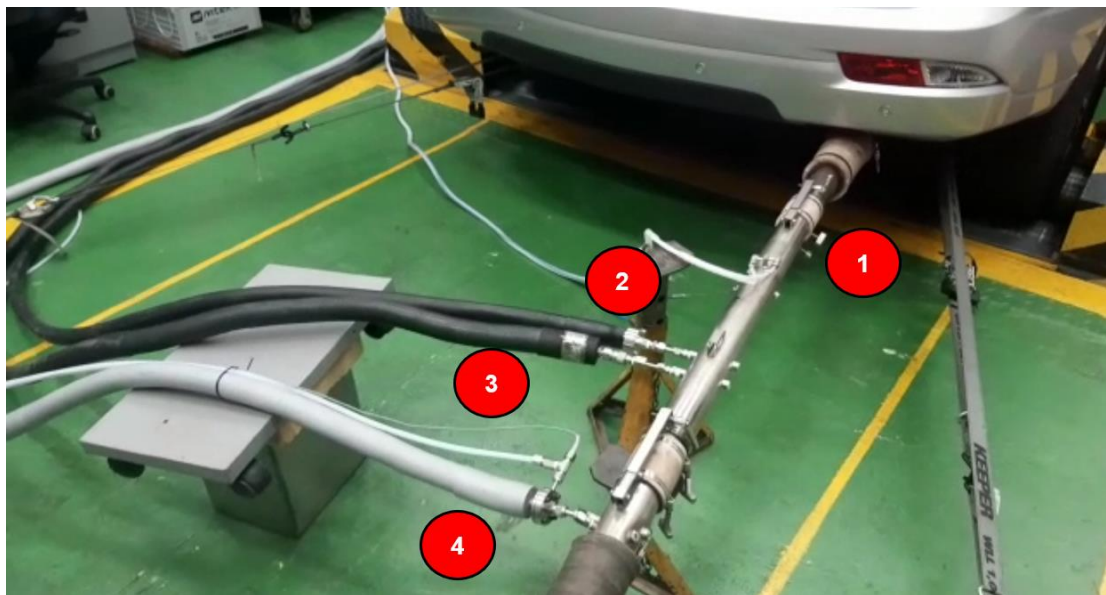
Fuente: ICP

Para que los resultados fuesen acertados, el operario del vehículo debía acelerar manualmente el vehículo manteniéndose todo el tiempo que durara la prueba, en el rango de medida del ciclo FTP, las líneas azules representan los límites permitidos, la línea verde representa el recorrido ideal que debe cumplir el vehículo durante las pruebas.

Una vez configurado el software, se procedió a la conexión de las líneas del sistema de medición de gases y material particulado, este conjunto de sondas está administrado por la computadora del OBS-ONE (Horiba) que recoge toda la información procedente de los tubos de escape de los vehículos.

Para realizar este análisis, se conectaron todas las sondas requeridas al tubo de escape del vehículo (*Figura 31*), empezando por el tubo Pitot (1) que distribuye todo el flujo por las líneas del sistema OBS-ONE, la sonda (2) que toma las muestras de material particulado en número, la sonda (3) que toma la muestra de los gases contaminantes y la sonda (4) que se encarga de tomar las muestras de material particulado en masa.

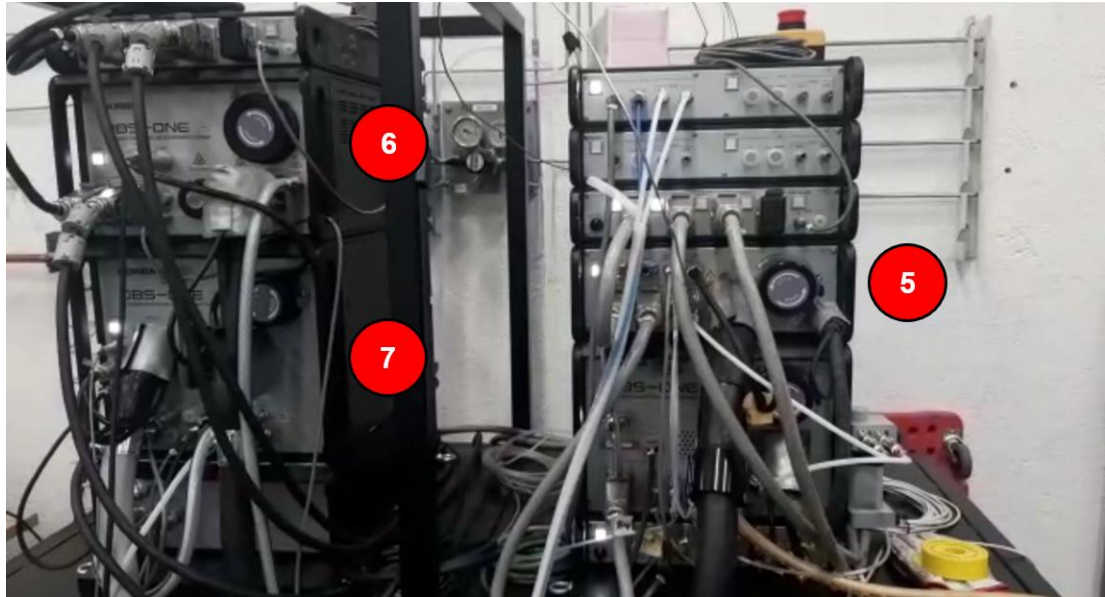
Figura 31. Distribución de las conexiones (Horiba)



Fuente: ICP

Cada línea se debe conectar al módulo del Horiba (*Figura 32*), éstas se encuentran distribuidas según el caso, ya que cada unidad funciona de manera independiente. La sonda (3) se conecta al medidor de gases (5), encargado de tomar todas las muestras de CO, CO₂, NO, NO_x, etc. La sonda (2) se conecta al medidor de PM en número (6) y la sonda (4) se conecta al medidor de PM en masa (7).

Figura 32. Sistema OBS-ONE (Horiba)



Fuente: ICP

Estas conexiones fueron realizadas con el cuidado necesario, debido a que en el caso que hubiese una fuga, los resultados no serían lógicos y existirían errores en la validación de los resultados. Por lo que, el personal del laboratorio realizó la verificación y prueba de arranque, para validar que todo estuviese correctamente conectado.

6.2.2 Pruebas Experimentales Camioneta Pick Up 2008. Inicialmente es necesario conocer el vehículo utilizado en las pruebas, para ello nos podemos redirigir a la *tabla 2*, donde encontraremos las especificaciones técnicas del vehículo modelo 2008.

Como se mencionó anteriormente los resultados que serán presentados a continuación fueron obtenidos en el laboratorio de motores del ICP. Para el cumplimiento de los objetivos del proyecto, se presentarán los resultados obtenidos tanto para la prueba de desempeño como para las emisiones y consumo.

En la figura 33 se observa el montaje de la camioneta Pick Up 2008 en el banco de pruebas del laboratorio, donde ya se encuentra el vehículo conectado a los diferentes sistemas de medición de parámetros (Dinamómetro y Horiba).

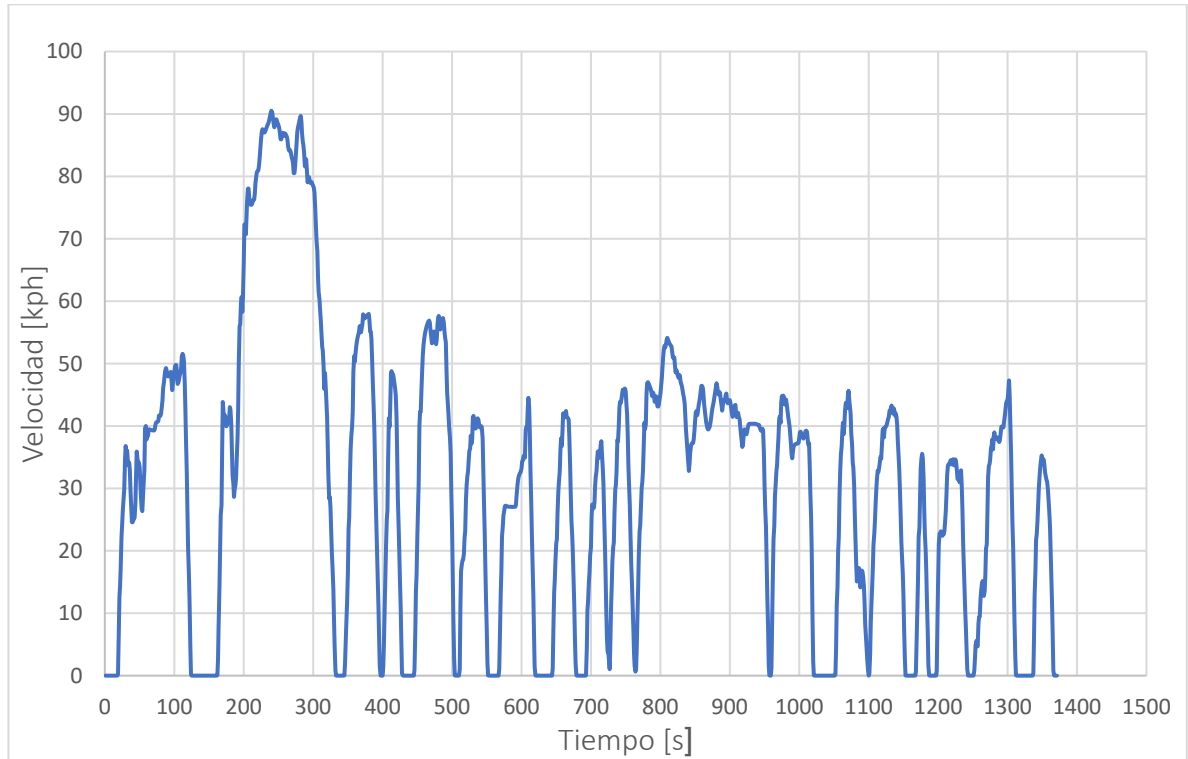
Figura 33. Montaje Camioneta Pick Up 2008



Fuente: ICP

6.2.2.1 Pruebas de desempeño. En esta sección encontraremos los resultados obtenidos de potencia y torque del vehículo, de igual manera se presentará el ciclo FTP realizado para el vehículo y del cual fueron obtenidos los resultados de emisiones y consumo. Comenzaremos presentando el ciclo FTP (figura 34), donde se observan las curvas generadas en el dinamómetro, para este caso se obtienen datos de velocidad lineal [kph] vs tiempo de prueba [s]. En la sección 6.1.3 se describen específicamente las etapas del ciclo. Un dato interesante es la velocidad máxima alcanzada por la camioneta 2008 durante el ciclo, la cual fue de 90,515 [kph].

Figura 34. Ciclo FTP – Camioneta Pick Up 2008



Fuente: Autor

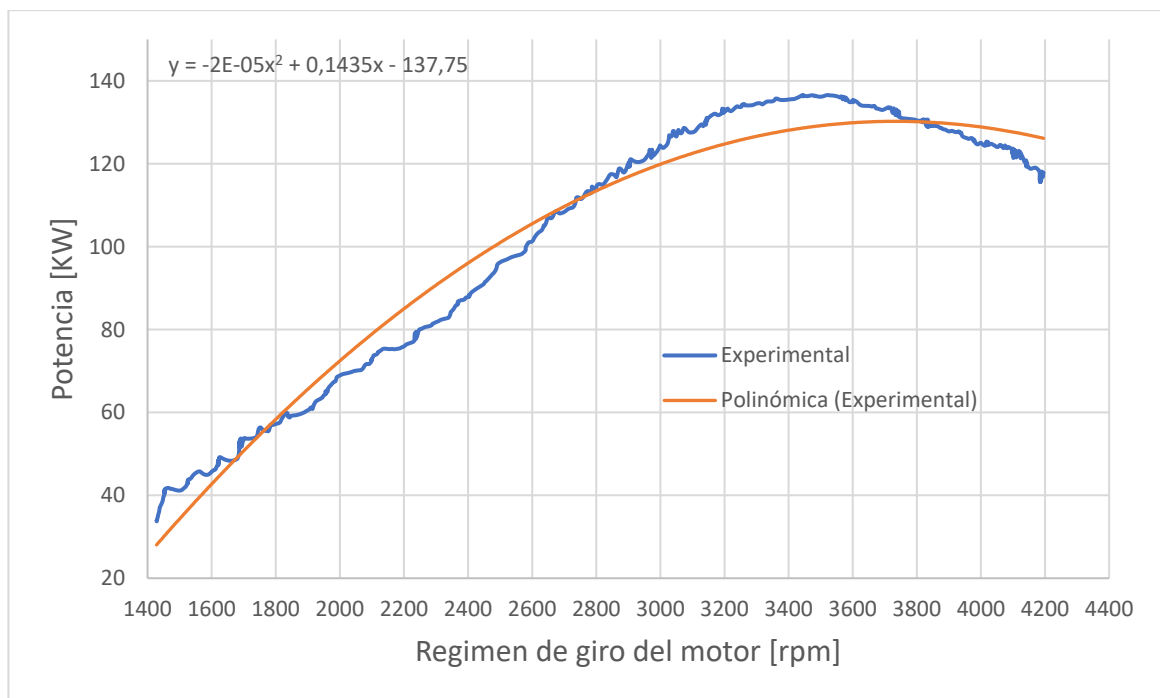
Una vez observada la gráfica del ciclo, es importante mencionar que se tomaron tres pruebas, en otras palabras, se tomaron datos por tres oportunidades del mismo ciclo, obteniendo así el mismo número de conjuntos de datos de las emisiones y el consumo de combustible.

Ahora, para el caso de las variables de desempeño de potencia y torque fueron recopiladas del conjunto de datos más representativo para nuestro caso, de igual forma se presentará para un solo combustible, el cual será el combustible convencional con número de cetano de 46 (CN=46); esto debido a que se observó en las distintas pruebas que la variación de la potencia y torque cuando se modificaba en número de cetano era casi imperceptible, los datos obtenidos eran similares. En la figura 35 se observa el comportamiento de la potencia para la camioneta 2008, en ella se encuentra graficada la potencia [KW] vs régimen de giro

del motor [rpm]. Se observo que la potencia máxima es de 136,57 [KW] y se logró a las 3523 [rpm].

Es importante aclarar que en la siguiente grafica habrá dos curvas, una de color azul la cual representa la curva obtenida directamente de los datos tomados por el dinamómetro y la segunda de color rojo punteada la cual es la curva suavizada mediante una regresión para la potencia de la camioneta modelo 2008.

Figura 35. Potencia vs. Régimen de giro del motor – Camioneta Pick Up 2008

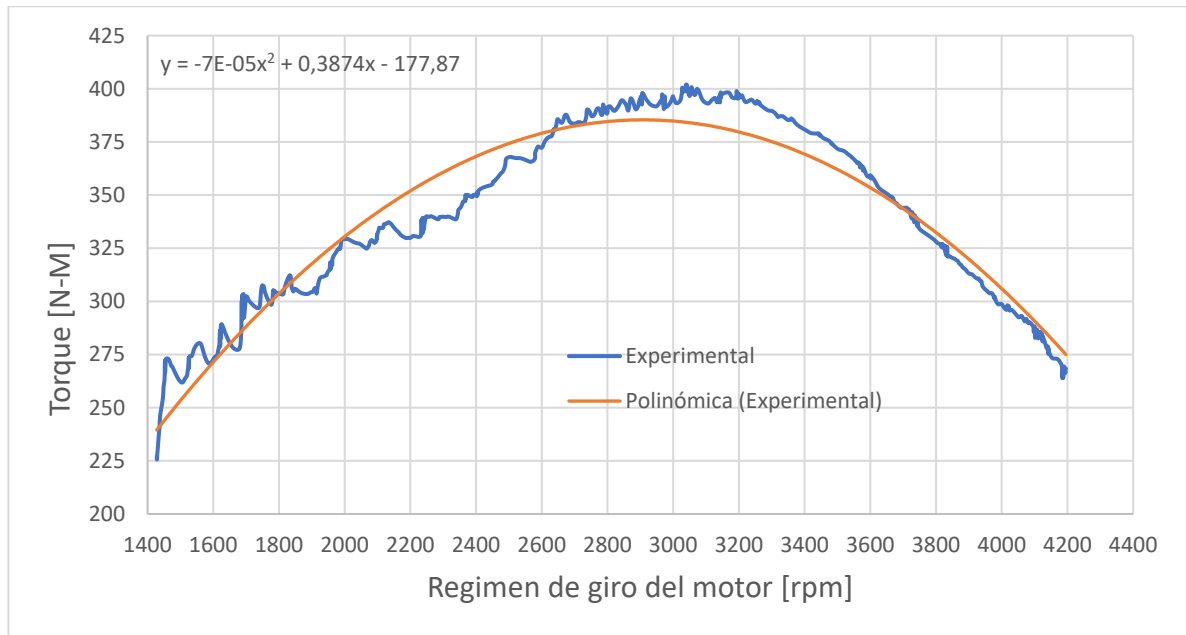


Fuente: Autor.

Ahora bien, en la figura 36, tenemos la curva para el torque de la camioneta Pick Up 2008, en la cual observamos el toque [N-m] vs velocidad de giro del motor [rpm]. Se observo que el torque máximo es de 401,94 [N-m] a las 3038,9 [rpm].

Del mismo modo que en la gráfica de la potencia, existen dos curvas una de color azul la cual se obtuvo directamente de los datos tomados por el dinamómetro y la segunda de color rojo punteada la cual es la curva suavizada mediante una regresión para el torque de la camioneta 2008.

Figura 36. Torque vs Régimen de giro del motor – Camioneta Pick Up 2008.

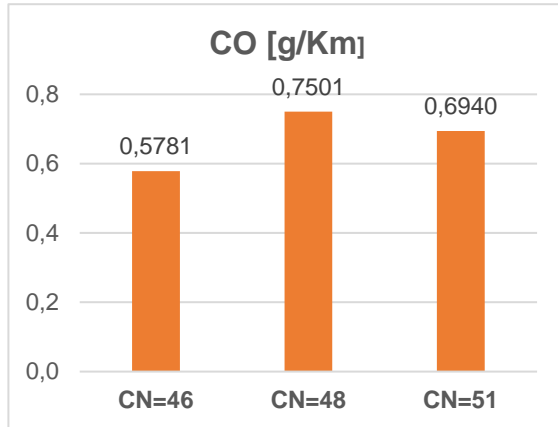


Fuente: Autor.

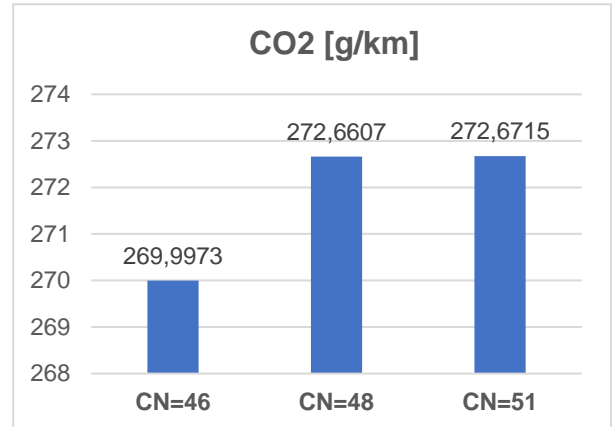
6.2.2.2 Pruebas de emisiones y consumo. En las pruebas de emisiones y consumo, a diferencia de la sección anterior de potencia y torque, si fue posible evidenciar diferencias claras y representativas según el caso, cuando se aumentaba el número de cetano; por esta razón serán presentados los datos para tres combustibles con diferente número de cetano (CN=46, CN=48 y CN=51). Al igual que la potencia y torque se tomaron tres conjuntos de datos, la diferencia existe en que ahora no se analizara un solo conjunto si no que se hizo un promedio con los datos obtenidos y de esta manera serán analizados los datos.

A continuación, en la figura 37 se presentan los resultados de emisiones (CO, CO₂, NO, NO_x, NO₂, PM, PN, THC, NMHC) y consumo de combustible, obtenidos por el sistema OBS-ONE (Horiba), para la camioneta 2008.

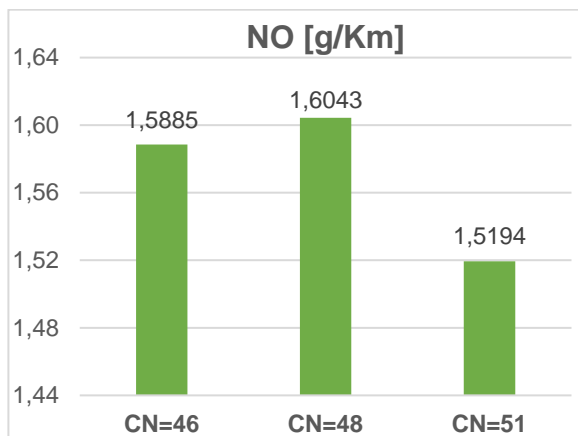
Figura 37. Resultados con diferente número de cetano de la Camioneta Pick Up 2008 para: a) CO, b) CO₂, c) NO, d) NO_x, e) NO₂, f) Consumo, g) PN, h) PM, i) NMHC, j) THC.



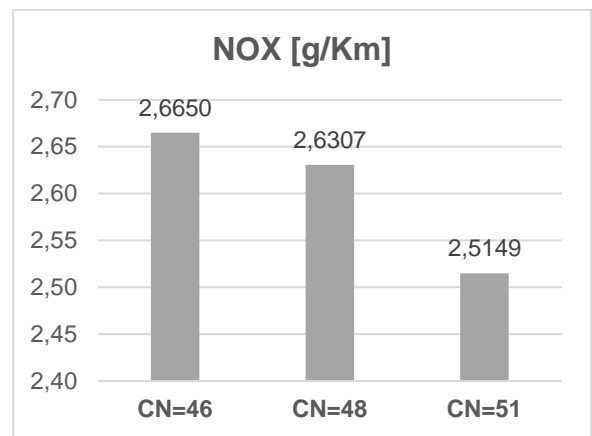
a)



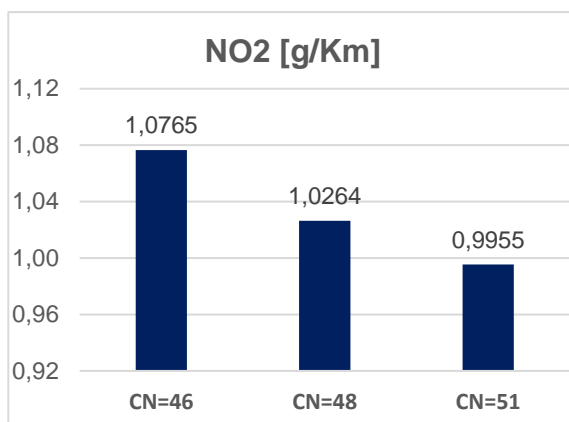
b)



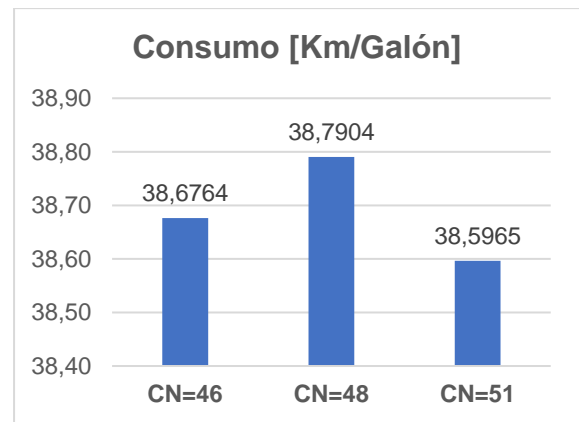
c)



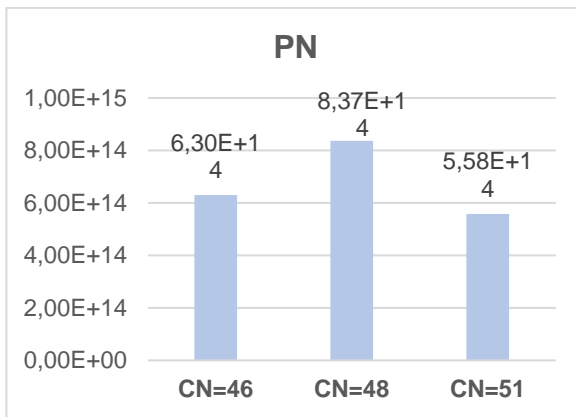
d)



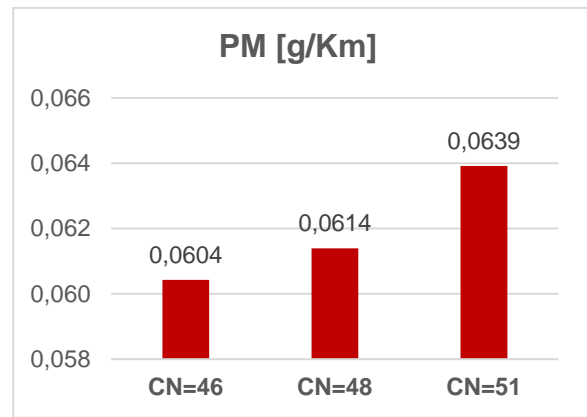
e)



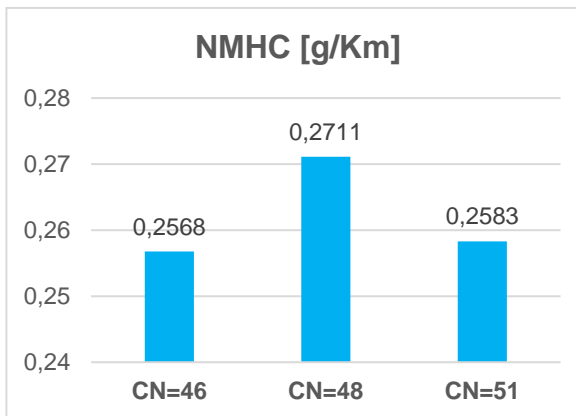
f)



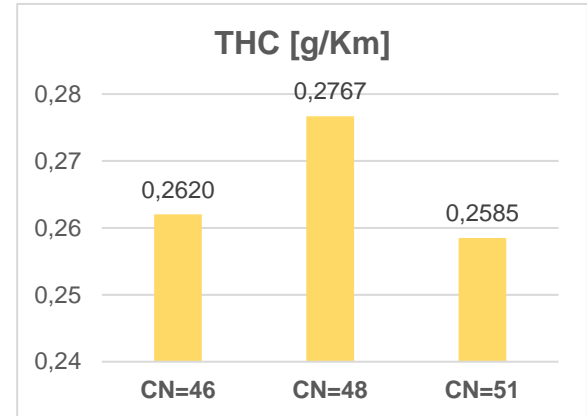
g)



h)



i)



j)

Fuente: Autor.

6.2.3 Pruebas Experimentales Camioneta Pick Up 2020. A continuación, se presentan los resultados obtenidos para la camioneta Pick Up 2020, resultados tanto de desempeño como de emisiones. Antes de realizar el montaje de la camioneta, fue necesario calibrar nuevamente cada uno de los equipos. Esto con el fin de que los resultados obtenidos fuesen correctos y que básicamente no hubiese perdida de información durante el tiempo que duró su ejecución.

Adicionalmente se realizó el proceso de calibración de los filtros durante 24 horas, esto con el objetivo de que los valores obtenidos durante la prueba no presenten

variaciones y/o desfases significativos, sino que el porcentaje de error sea aceptable.

En la figura 38 se puede apreciar de qué manera se realizó el montaje por el equipo del ICP, en esta imagen se observan todas las conexiones que se hicieron, y las adecuaciones hechas para la camioneta Pick Up 2020 en el laboratorio. El vehículo fue posicionado sobre el dinamómetro de rodillos y posteriormente conectado al módulo del dinamómetro donde se analizan las variables de desempeño.

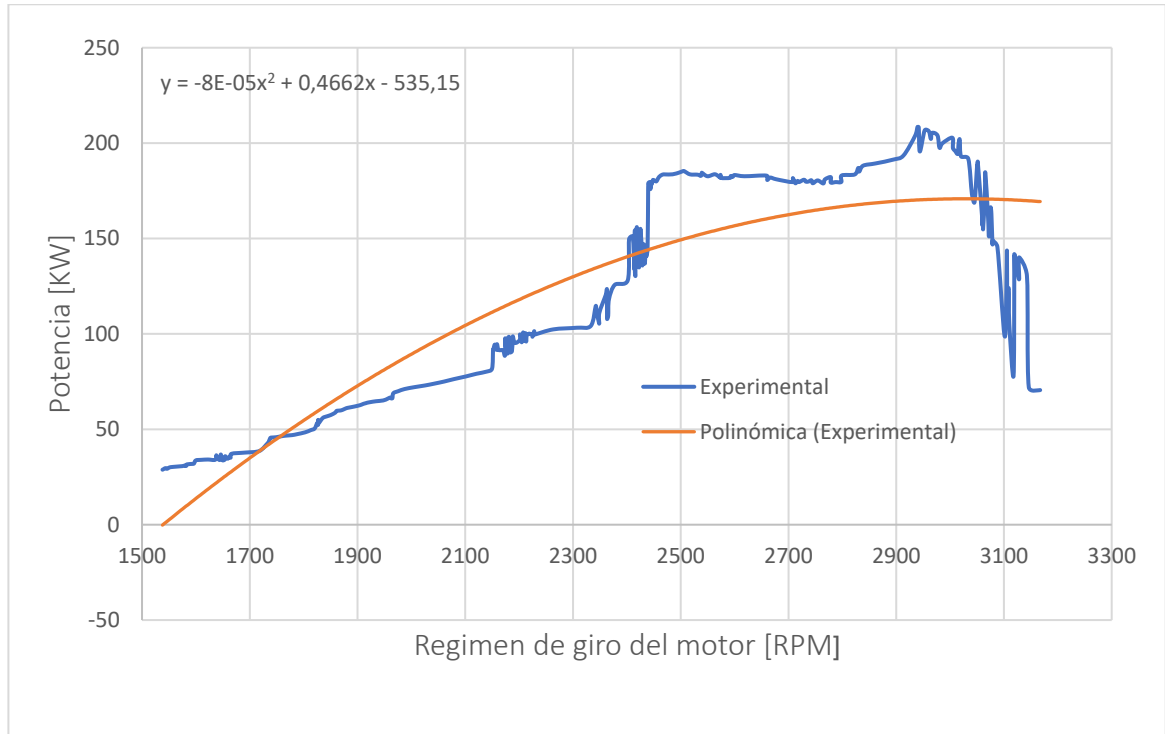
Figura 38. Montaje Camioneta Pick Up 2020.



Fuente: ICP

6.2.3.1 Pruebas de desempeño. Al momento de calcular los valores de torque y potencia para la camioneta Pick Up 2020, pudimos notar inconvenientes con las toma de datos, lo que ocasiono que los valores obtenidos para vehículo estuviesen con menor precisión e inestabilidad en su trayectoria, esto se presentó debido al sistema de tracción de la camioneta ya que contaba con una caja automática, la cual no permitía elevar de manera constante las revoluciones del motor sin que ella cambiara de marcha, lo que genero picos indeseados en los resultados obtenidos. La figura 39 muestra el comportamiento de Potencia vs. RPM para la Camioneta Pick Up 2020.

Figura 39. Potencia vs. Régimen de giro del motor – Camioneta Pick Up 2020

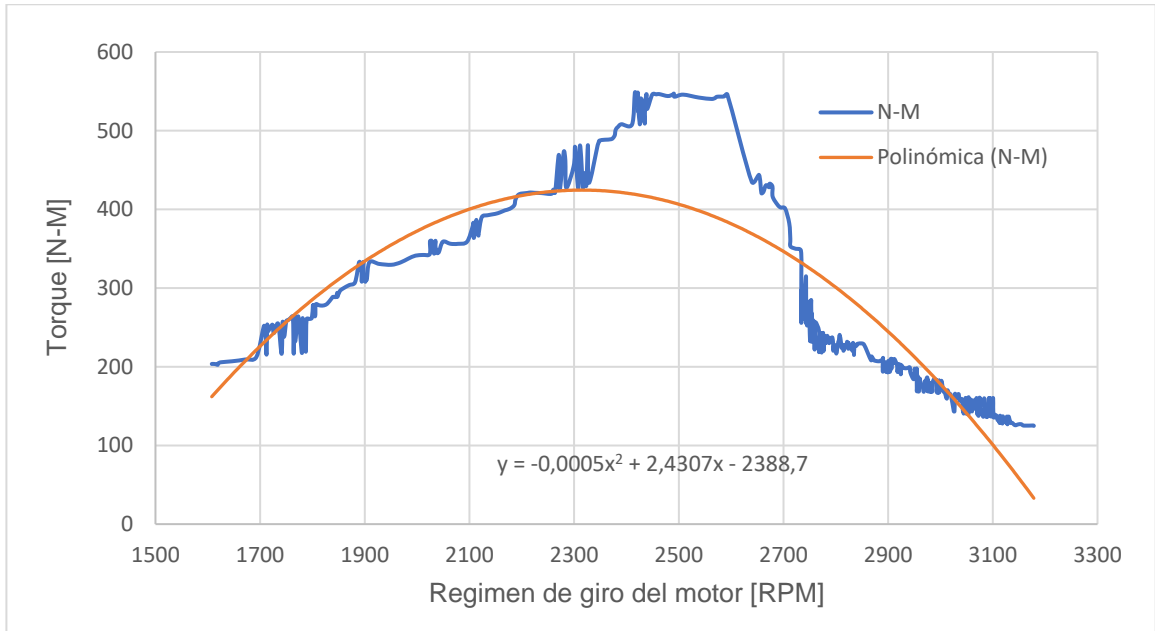


Fuente: Autor

Debido a la falta de precisión en los valores que se obtuvieron durante las pruebas, fue necesario realizar el experimento varias veces hasta obtener valores más cercanos a la trayectoria teórica de torque y de potencia, al finalizar las pruebas, se utilizaron los resultados más aproximados. Para este caso, la potencia máxima dio por el orden de los 208,52 KW a 2939,5 rpm.

A continuación, se muestran los resultados obtenidos en el laboratorio para Torque vs. RPM (Figura 40), al igual que para la anterior gráfica, fue necesario realizar un suavizado de la información mediante una regresión, estos datos, a pesar de la inestabilidad de los resultados, muestra un comportamiento cercano a la teoría.

Figura 40. Torque vs Régimen de giro del motor – Camioneta Pick Up 2020

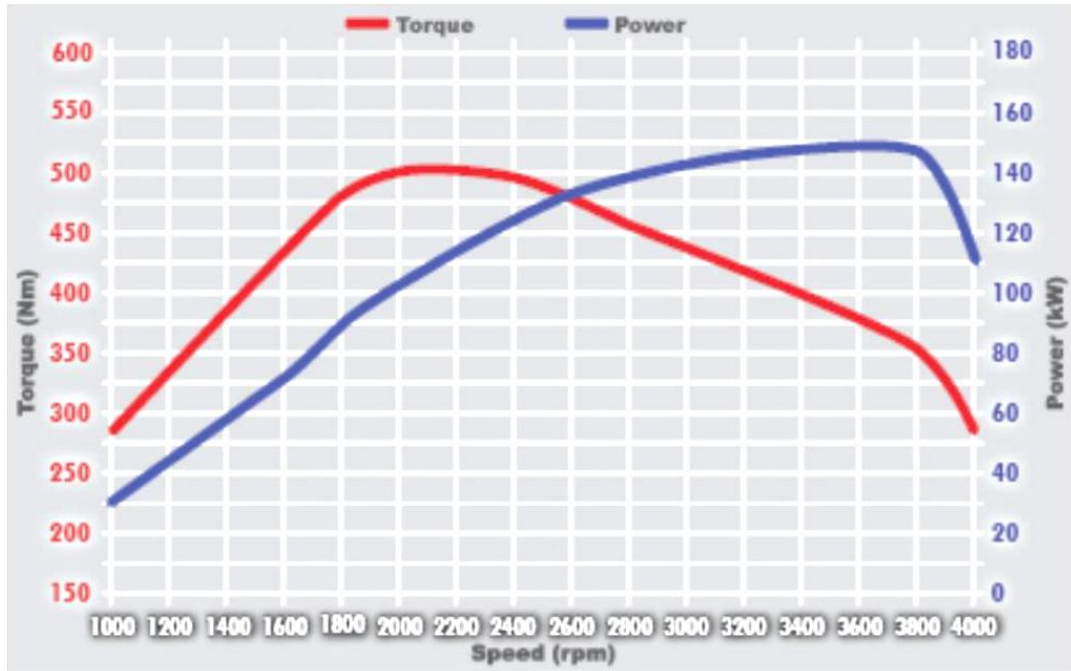


Fuente: Autor

Para este caso en particular, el torque máximo está en 548,62 [N-m] para un régimen de giro de 2416,1 [rpm]. Con esto podemos evidenciar que para este vehículo se pueden obtener los valores máximos de torque y potencia con revoluciones mucho menores a los obtenidos por la camioneta 2008. Esto se debe principalmente, a las características de fabricación de cada motor, puesto que la tecnología utilizada para la camioneta Pick Up 2020 es mucho más reciente que para el otro modelo.

Al finalizar el análisis de datos, pudimos verificar que los resultados obtenidos siguen una trayectoria similar a pesar de la falta de precisión de los datos de la camioneta Pick Up 2020. Y es que su comportamiento, a pesar de resultar menos uniforme, comparten similitud con los valores teóricos de las curvas de desempeño para torque y potencia.

Figura 41. Curvas de torque y potencia Camioneta Pick Up 2020.



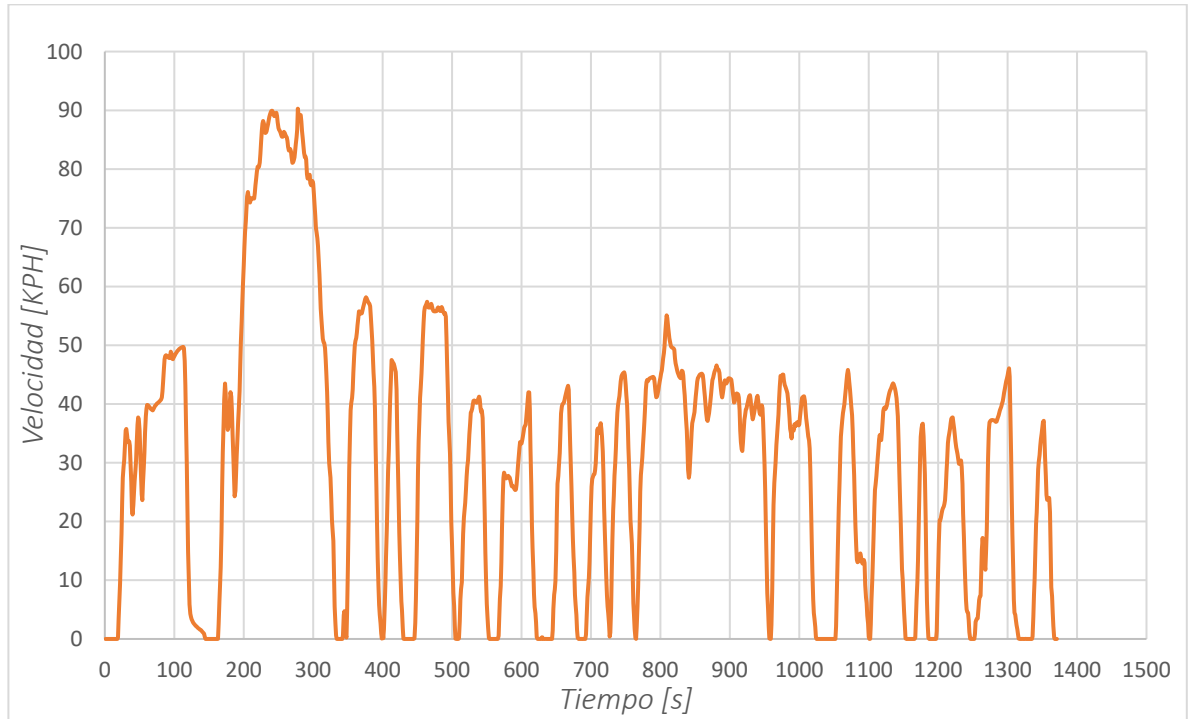
Fuente: Fabricante

Al hacer una comparación entre los resultados obtenidos por el equipo de trabajo del laboratorio de motores del ICP y los resultados dados por el fabricante (Figura 41), podemos evidenciar, pese a la interferencia en la toma de los datos, los resultados en cuanto a torque y potencia, demuestran una tendencia similar en cuanto a los resultados.

Por otro lado, dejando a un lado los errores de medición ocurridos durante esta prueba, se pudo notar que no existen cambios significativos en cuanto al torque y a la potencia, cuando se aumenta el número de cetano en combustible. Los resultados obtenidos para cada uno de los combustibles utilizados, demuestran un porcentaje de correlación de casi el 98%, por lo que es evidente el mínimo o casi inexistente cambio en los resultados de desempeño medidos sobre el dinamómetro de rodillos para esta camioneta.

6.2.3.2 Pruebas de emisiones y consumo. Durante las mediciones realizadas en el laboratorio, se registraron los siguientes resultados para el ciclo FTP, cabe recordar que los resultados del ciclo se miden siguiendo las tolerancias permitidas por la EPA:

Figura 42. Ciclo FTP Camioneta Pick Up 2020



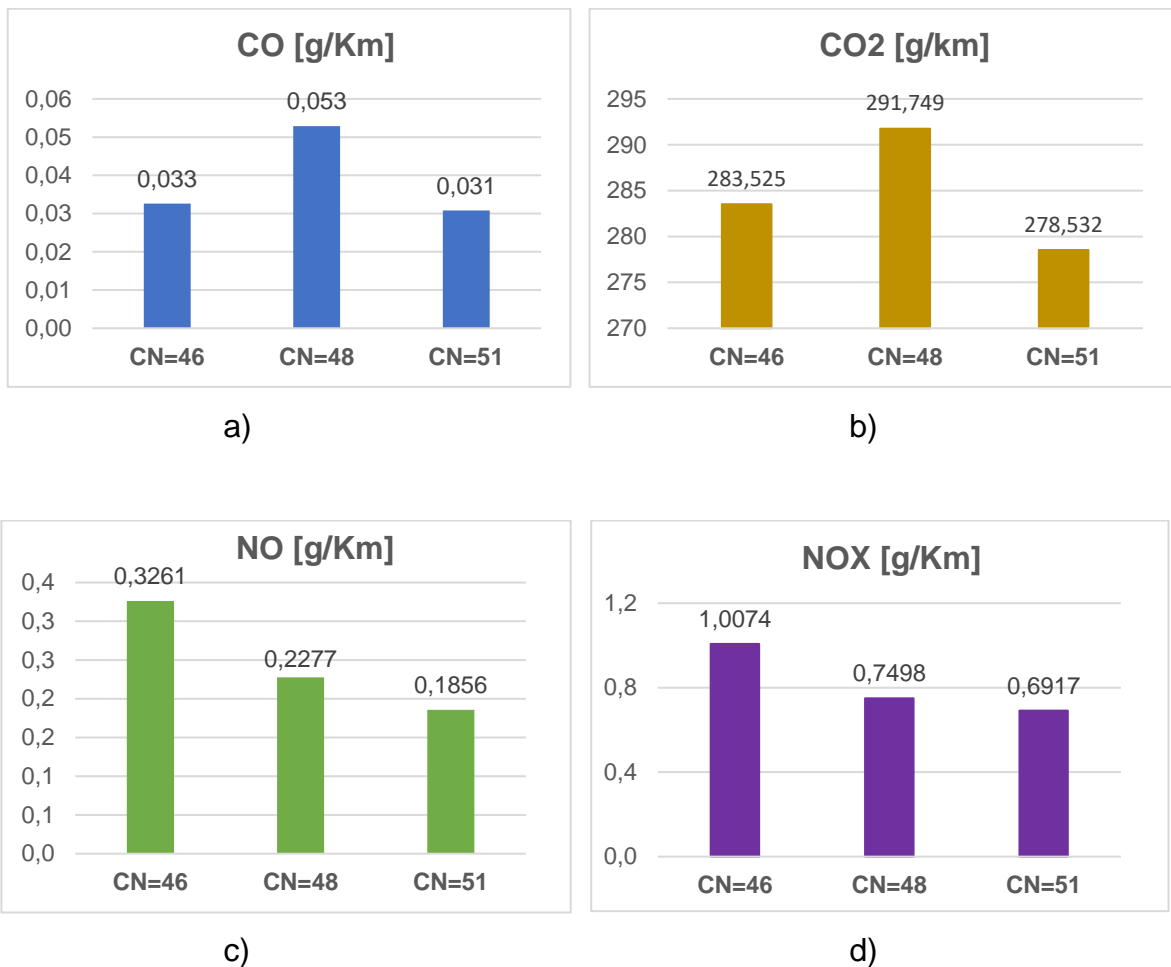
Fuente: Autor

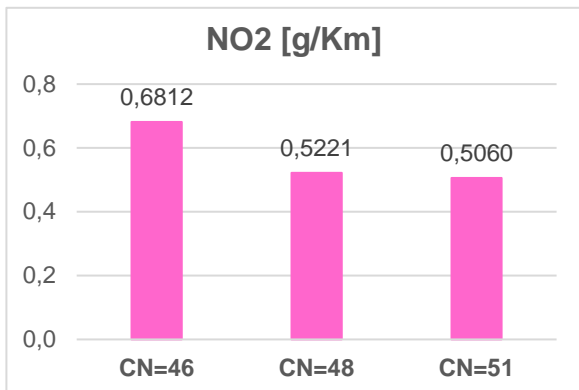
El registro de datos mediante el método del ciclo FTP nos demuestra el cumplimiento que se logra con este tipo de motores de tecnologías mucho más recientes, al registrar datos muy cercanos a los datos objetivo, ya que el porcentaje de correlación al realizar la prueba fue del 96%.

Por otro lado, gracias a que las pruebas se realizan en tiempo real mediante el uso del software que controla las mediciones para el ciclo FTP, se pudieron obtener valores mucho más representativos para el objetivo del proyecto, ya que se consideran los paros y aumentos de velocidad repentinos, como si se tratara de un trayecto real en carretera.

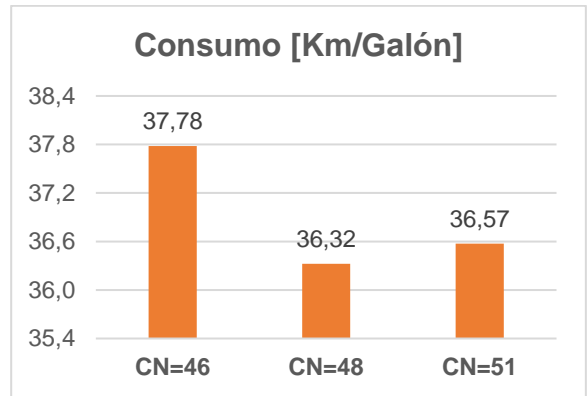
Los resultados obtenidos para las mediciones de gases, material particulado y consumo para cada uno de los combustibles de prueba (CN de 46, 48 y 51) fueron realizados con utilizando tres filtros diferentes, esto con el objetivo de validar correctamente los resultados para cada uno de los combustibles utilizados, es decir en total fueron 9 las pruebas realizadas para este vehículo. Posteriormente se realizó el cálculo del promedio de cada uno de los valores para generar un valor estimado de emisiones contaminantes producto de la combustión en el motor. Los resultados se muestran a continuación:

Figura 43. Resultados con diferente número de cetano de la camioneta Pick Up 2020 para: a) CO, b) CO₂, c) NO, d) NO_x, e) NO₂, f) Consumo, g) PN, h) PM, i) NMHC, j) THC

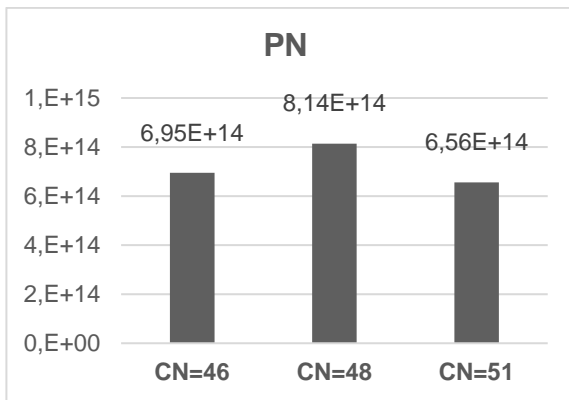




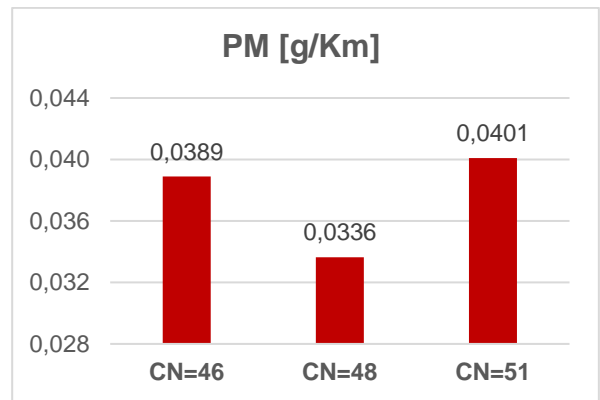
e)



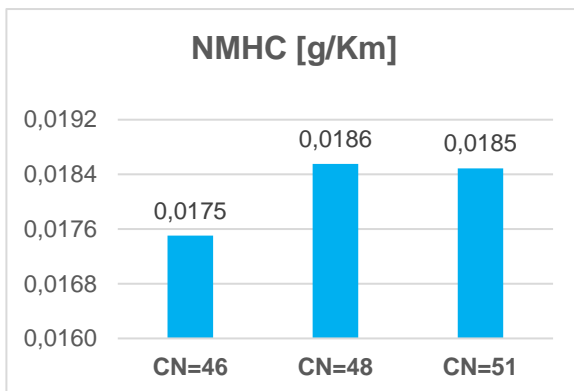
f)



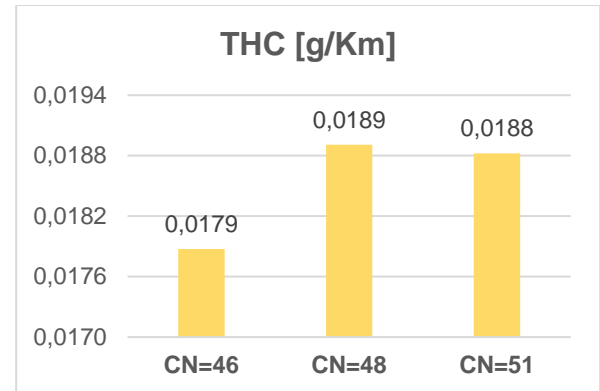
g)



h)



i)



j)

Fuente: Autor

Al generar las gráficas de emisiones para cada uno de los compuestos, podemos notar que el comportamiento es estos, es muy similar al obtenidos por la Camioneta 2008, y es que la diferencia radica en los porcentajes con los que varían los datos, pero la tendencia entre los combustibles utilizadas es muy parecida. Por ejemplo, podemos observar que los valores de CO y CO₂ registran valores mucho mayores para el combustible con CN de 48, mientras que las emisiones de NO, NO_x y NO₂, disminuyen a medida que aumentamos el número de cetano. Por otro lado, evidenciamos que el consumo disminuye al aumentar el valor del CN en el combustible, lo que quiere decir que el consumo de combustible será menor si se aumenta la cantidad de cetano en el combustible diésel.

Por otro lado, un valor no tan notable es de material particulado, ya que su comportamiento no se ve muy bien reflejado en los resultados, donde se aprecian cambios para cada uno de los CN. Para el caso de los hidrocarburos totales (THC) y los hidrocarburos diferentes al metano (NMHC), notamos un ligero aumento cuando se varía el número de cetano.

7. ANÁLISIS DE RESULTADOS

7.1 Camioneta Pick Up 2008

Ahora que se tienen los resultados experimentales variando el número de cetano en el combustible es prudente hacer un análisis detallado y por separado del desempeño, emisiones y consumo del vehículo. Por esta razón, a continuación, se presenta un análisis específico de los resultados obtenidos para la camioneta Pick Up 2008.

7.1.1 Análisis de desempeño. El desempeño de un vehículo se basa básicamente en potencia y torque que este pueda brindar, en nuestro proyecto buscamos conocer la influencia que tiene el aumento del número de cetano en el combustible sobre estos factores de potencia y torque.

Los resultados obtenidos experimentalmente y como se mencionó en el capítulo anterior nos llevaron a observar que independientemente del número de cetano del combustible (46, 48 y 51) la potencia y el torque no se ven afectados. Lo anterior mencionado se podía esperar gracias a que no se cambió la composición química del combustible, por lo cual su poder calorífico no variaba significativamente.

7.1.2 Análisis de consumo y emisiones. La figura 44 nos presenta valores para cada componente analizado, pero esto no es suficiente para sacar una conclusión válida respecto a la influencia del número de cetano en las emisiones y consumo; esto debido a que cada componente maneja rangos distintos, en algunos de ellos son rangos pequeños, lo que cualquier cambio así sea mínimo será notorio, pero no necesariamente representativo.

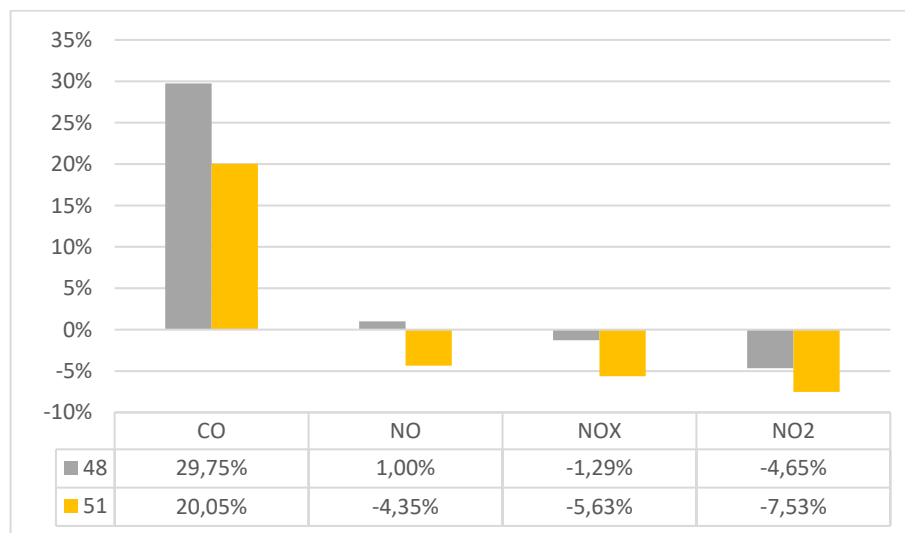
Por lo anterior mencionado es necesario hacer un análisis de varianza de un factor (ANOVA), el cual nos permitirá conocer si la variación del número de cetano

conlleva a algún cambio representativo en las emisiones y el consumo. Para ello se realizó este análisis estadístico a cada uno de los componentes, donde se manejó una certidumbre del 95%, esto significa que para que una variación sea representativa la probabilidad del análisis ANOVA tiene que ser menor a 0.05.

Según este análisis, el cual se realizó mediante la herramienta Excel, existen cuatro componentes para los cuales el aumento del número de cetano en el combustible diésel tiene una variación representativa, los cuales fueron el CO, NO, NOx y NO2. Como podemos ver factores importantes como el CO2, PM y consumo no están dentro de los componentes que varían representativamente.

Ahora bien, es necesario observar si la variación del CO, NO, NOx y NO2 es favorable o desfavorable para el medio ambiente, para ello se hizo un análisis de variación porcentual, así se podrá ver de forma gráfica el aumento o disminución de cada componente según número de cetano.

Figura 44. Variación porcentual de CO, NO, NOx y NO2 - Camioneta Pick Up 2008.



Fuente: Autor.

7.2 Camioneta Pick Up 2020

Fue necesario determinar mediante un análisis estadístico las variaciones en los resultados que se obtuvieron para la camioneta modelo 2020, al igual que la camioneta 2008. Aunque para este caso se presentaron ciertos inconvenientes con los resultados de desempeño, ya que el funcionamiento automático del sistema de tracción de la camioneta, impidió que los resultados obtenidos por el dinamómetro fueran los esperados.

7.2.1 Análisis de desempeño. Para formular una conclusión respecto a los resultados obtenidos para esta camioneta, fue necesario validar mediante la curva de desempeño real de torque y de potencia si existía alguna similitud en los resultados. Y es como sucedió con la camioneta 2008, los resultados de torque y potencia no varían de manera representativa ya que los combustibles presentan un cambio en el número de cetano, pero no en los valores de poder calorífico y composición, por lo que los resultados no representan una variación muy significativa.

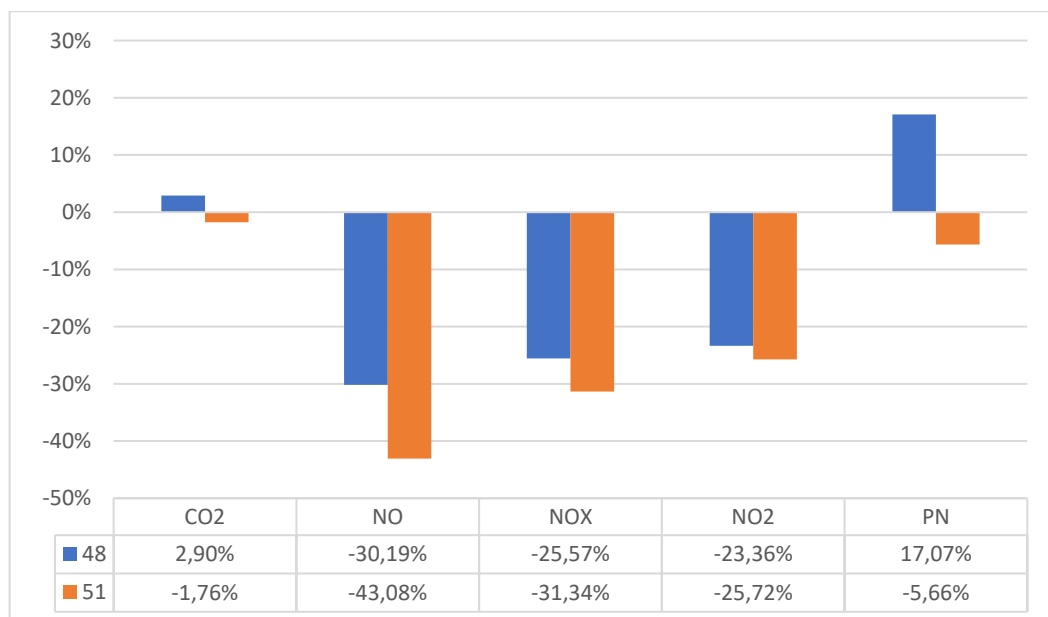
7.2.2 Análisis de consumo y emisiones. Para este caso, fue necesario utilizar nuevamente el análisis de varianza ANOVA, que determina de manera estadística si los resultados representan cambios significativos para cada uno de los componentes de estudio, al igual que para la camioneta modelo 2008, se utilizó un porcentaje de certidumbre del 95%, el cual permitió identificar los resultados que presentaban una varianza representativa; recordando que los datos de CO fueron erróneos, por esa razón no serán analizados de forma estadística.

Es evidente que, al realizar el análisis de varianza, se identificaron los componentes que representaron cambios más notables en sus resultados. Y para este caso, se pudo identificar que el CO₂, NO, NO₂, NO_x y PN presentan cambios representativos cuando se aumenta el número de cetano. Nuevamente y como sucedió con la

camioneta modelo 2008, factores importantes como PM y consumo no presentan variables representativas cuando se modifica en número de cetano.

Ahora bien, es prudente ver de forma gráfica si la modificación de los factores como CO2, NO, NO2, NOx y PN es favorable o no para el ambiente, para ello se hizo un grafica de variación porcentual para cada uno de ellos.

Figura 45. Variación porcentual de CO2, NO, NOx, NO2 y PN - Camioneta Pick Up 2020.



Fuente: Autor.

8. CONCLUSIONES

1. Se realizó la revisión del estado del arte sobre los efectos de la variación del número de cetano en el combustible sobre el rendimiento de motores diésel, a través de un completo análisis de artículos, libros, revistas e investigaciones realizadas por la academia, donde se pudo recolectar la información más útil y relevante para el planteamiento y ejecución de este proyecto.
2. Se logró realizar las simulaciones planteadas para las camionetas Pick Up 2008 y Pick Up 2020 de: Presión en cámara vs. Angulo de giro, Potencia vs. Régimen de giro y Eficiencia térmica indicada vs. Dosado variando el número de cetano (46, 48 y 51) en el combustible, usando como herramienta principal el modelo cero-dimensional de la combustión desarrollado por el grupo GIEMA de la EIM. Concluyendo que los resultados obtenidos, no demuestran cambios significativos en cuanto al desempeño, consumo y eficiencia energética de los motores diésel.
3. La validación del modelo cero-dimensional se alcanzó satisfactoriamente, gracias a la comparación entre la potencia simulada y la potencia experimental de los datos obtenidos para la camioneta Pick Up 2008 en el laboratorio de motores del ICP, logrando una correlación entre ambos conjuntos de datos de un 93.4%. Mientras que para el caso de la camioneta Pick Up 2020 se realizó la comparación entre la potencia simulada y la potencia dada por el fabricante, logrando un 90% de correlación entre los resultados. Debido a que el modelo matemático no puede analizar las variaciones físico-químicas presentes durante el proceso de combustión, los datos arrojados presentan una tendencia lineal impidiendo una mayor correlación entre los resultados.
4. Pudimos determinar tanto de manera analítica como experimentalmente, que la variación del número de cetano no influye en el desempeño de los motores diésel independientemente del modelo y tecnología que posean, debido a la poca

influencia que tiene el cetano en el poder calorífico y en la composición química del combustible, concluyendo que para que existan cambios significativos en los resultados de desempeño, se deben modificar otros parámetros en la composición del combustible.

5. Al hacer el análisis estadístico ANOVA se concluyó que el consumo de combustible no varía representativamente al aumentar el número de cetano en ninguno de los dos vehículos utilizados durante las pruebas. Este comportamiento nos permitió determinar que los cambios en cuanto a consumo no son significativos y por lo tanto el número de cetano no influye directamente en el consumo de combustible de los motores diésel.
6. Las pruebas experimentales nos permitieron concluir que los vehículos fabricados con nuevas tecnologías presentan resultados mucho más amigables con el medio ambiente, debido a la reducción de emisiones contaminantes. Por otro lado, para la camioneta Pick Up 2008 la variación del número de cetano tiene influencia representativa en cuatro parámetros de emisiones, como lo son el CO, NO, NO_x y NO₂, donde encontramos que las emisiones de CO tienen una influencia negativa a medida que aumenta el número de cetano, mientras que las emisiones relacionadas con el Nitrógeno presentan una disminución considerable. En el caso de la camioneta Pick Up 2020, los factores que tienen una variación representativa son CO₂, NO, NO_x, NO₂ y PN, logrando una disminución significativa en los cinco factores cuando el número de cetano es de 51.

9. RECOMENDACIONES

1. Ampliar el rango de experimentación con combustibles que posean número de cetano superiores a 51, con la finalidad de concluir el efecto del número de cetano sobre el desempeño, emisiones y consumo del motor diésel.
2. Realizar estudios experimentales con vehículos de mediana potencia con el objetivo de comparar si existen diferencias claras en el rendimiento y operación del motor, respecto a los vehículos de baja potencia.
3. Implementar un banco de ensayo de motores en la Universidad Industrial de Santander, para facilitar el desarrollo de nuevos estudios experimentales con la finalidad de mejorar la eficiencia de los combustibles.

BIBLIOGRAFÍA

AGUDELO, Andrés; AGUDELO, John and BENJUMEA, Pedro. "Exergy diagnosis of the combustion process in a Diesel Engine," *Rev. Fac. Ing. Universidad de Antioquia*, no. 45, 2008. pp. 41-53.

AHMED, Sabah Tarik and CHAICHAN, Miqdam Tariq. Effect of Fuel Cetane Number on Multi-Cylinders Direct Injection Diesel Engine Performance and Exhaust Emissions. Department of Machines and Equipment Engineering /University of Technology. *Al-Khwarizmi Engineering Journal*, Vol. 8, No. 1. 2012. pp. 65 -75.

ALTAMAR, Andrés. Revisión del efecto del uso de biocombustibles en la opacidad de emisiones generadas por motores diésel. (Tesis de Posgrado). Bogotá, Colombia: Universidad Libre; 2014.

AMB. Informe de la calidad del aire. 2019. [Consultado: 25/08/19]. [En línea]. <https://www.amb.gov.co/calidad-del-aire/>

CHACÓN, Jorge Luis. "Identificación de un motor Diesel", presentado en el IX Congreso Latinoamericano de Control Automático. Colombia. 2000.

CORREDOR, Lesmes; AGUDELO, John and HERNÁNDEZ, Jaime. "Simulación del proceso de Combustión en Motores de encendido por compresión" *Energética*, vol.23. 2000. pp. 103-11.

Derivados del petróleo – El Diesel. 2017. [Consultado: 08/06/19]. [En línea]. Disponible en: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/241728/DieselFT.pdf>

DIJKSTRA, Rutger; DI BLASIO, Gabriele; BOOT, Michael; CARLO, Beatrice and BERTOLI, Claudio. Assessment of the Effect of Low Cetane Number Fuels on a

Light Duty CI Engine: Preliminary Experimental Characterization in PCCI Operating Condition. SAE International. 2011.

FERGUSON, Colin and KIRKPATRICK, Allan. Internal combustion engines: Applied thermosciences. 3 Ed. Colorado: John Wiley & Sons, 2016.

FTP 72 Cycle. [Consultado: 15/12/20]. [En línea]. Disponible en: <https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp72.php>

FTP 75 Cycle. [Consultado: 16/12/20]. [En línea]. Disponible en: <https://dieselnet.com/standards/cycles/ftp75.php>

Fuel Economy Estimates [Consultado: 15/12/20]. [En línea]. Disponible en: <https://www.fueleconomy.gov/feg/info.shtml#guzzler>

G. WHOSCHNI, "A Universally Applicable Equation for the Instantaneous Heat Transfer Coefficient in the Internal Combustion Engine," SAE International, Warrendale, PA, 670931, Feb. 1967.

GARCIA, Gabriel. Herramienta computacional para el cálculo de los parámetros de desempeño de un motor diésel ID de cuatro tiempos (Tesis de posgrado). Bucaramanga, Colombia: Universidad Industrial de Santander; 2013.

GOGOI, Tapan and BARUAH, Debendra Chandra. "A cycle simulation model for predicting the performance of a diesel engine fuelled by diesel and biodiesel blends". Energy vol. 35, no.3, 2010. pp. 1317-23.

GONZÁLEZ, Roberto; RODRÍGUEZ, Yanara; GARCIA, Yelene y FERNÁNDEZ, Lucía. Consumo de combustible de los motores de combustión interna. Revista ciencias técnicas y agropecuarias, La Habana-Cuba; Vol. 19, No 1, 2010.

H. O. HARDENBERG and F. W. HASE, "An Empirical Formula for Computing the Pressure Rise Delay of a Fuel from Its Cetane Number and from the Relevant Parameters of Direct-Injection Diesel Engines," SAE International, Warrendale, PA, 790493, Feb. 1979.

HEYWOOD, John. Internal Combustion Engines Fundamentals. 1 st, ed. New York: McGraw-Hill, 1988.

HEYWOOD, John. Modeling Real Engine Flow and Combustion Processes. In: Internal Combustion Engine Fundamentals. EE. UU: McGraw-Hill; 1988. p. 748-816.

ICINGUR, Yackup and ALTIPARMAK, Duran. Effect of fuel cetane number and injection pressure on a DI Diesel engine performance and emissions. Technical Education Faculty, Gazi University. Turkey. 2002.

IDEAM. Informe del estado de la calidad del aire en Colombia 2017. Min. Ambiente. 2018. [Consultado: 18/08/19]. [En línea]. http://documentacion.ideam.gov.co/openbiblio/bvirtual/023844/Informe_ECaliadl_Aire_2017.pdf

IQAIR & GREENPEACE. 2018 world air quality report. AirVisual. 2019. [Consultado: 18/08/19]. [En línea]. <https://www.airvisual.com/world-most-polluted-cities/world-air-quality-report-2018-en.pdf>

KIDOGUCHI, Yoshiyuki; YANG, Changlin; KATO, Ryoji and MIWA, Kei. Effects of fuel cetane number and aromatics on combustion process and emissions of a direct-injection diesel engine. Ecosystem Engineering. The University of Tokushima. Japan. 2000.

KUMAR, Himansh; KUMAR, Anil Sarma and KUMAR, Pramod. A novel approach to study the effect of cetane improver on performance, combustion and emission characteristics of a CI engine fuelled with E20 (diesel – bioethanol) blend. (Artículo de investigación). Mechanical Engineering Department, NIT Jalandhar, Punjab, India. 2019.

LABECKAS, Gvidonas; SLAVINSKAS, Stasys and KANAPKIENE, Irena. The individual effects of cetane number, oxygen content or fuel properties on the ignition delay, combustion characteristics, and cyclic variation of a turbocharged CRDI (common rail direct injection) diesel engine. Kaunas Academy, Lithuania. 2017.

LI, Ruina; WANG, Zhong; NI, Peiyong; ZHAO, Yang; LI, Mingdi and LI, Lilin. Effects of cetane number improvers on the performance of diesel engine fuelled with methanol/biodiesel blend. School of Automobile and Traffic Engineer, Jiangsu University, Zhenjiang, China. 2013.

MD-150-SERIES_Manual [Consultado: 09/12/20]. [En línea]. Disponible en: https://www.mustangdyne.com/wp-content/uploads/2020/09/MD-150-SERIES_Manual.pdf

MINISTERIO DE AMBIENTE Y MINISTERIO DE MINAS Y ENERGÍA. Norma nacional de calidad de combustibles Diesel y biodiesel. Bogotá D.C. 2019.

N. MIYAMOTO, T. CHIKAHISA, T. MURAYAMA, and R. SAWYER, “Description and Analysis of Diesel Engine Rate of Combustion and Performance Using Wiebe’s Functions,” SAE International, Warrendale, PA, 850107, Feb. 1985.

O. ARMAS Vergel and F. P. GONZALEZ, Diagnóstico experimental del proceso de combustión en motores diesel de inyección directa. Universidad Politécnica de Valencia, 1998.

On-board Emissions Measurement System. [Consultado: 15/12/20]. [En línea]. Disponible en: https://www.horiba.com/en_en/products/detail/action/show/Product/obs-one-gs-unit-28/

ORGANIZACIÓN DE LAS NACIONES UNIDAS. Las ciudades y la contaminación contribuyen al cambio climático. 2019. [Consultado: 09/06/19]. [En línea]. Disponible en <https://www.un.org/es/climatechange/cities-pollution.shtml>

PAYRI, Francisco y DESANTES, Jose. Motores de combustión interna alternativos. 1 st ed. Barcelona: Editorial Reverté, 2011.

QUINTERO, Carlos y MORENO, Saul. Caracterización del desempeño de un motor diésel a partir de la implementación de diferentes mezclas biocombustible/diésel. (Tesis de pregrado). Bogotá, Colombia: Universidad Santo Tomas; 2014.

R. STONE. Introduction to internal combustion engines. U.S.A, 1999.

RUOSTEENOJA, Kimmo. Future climate in world regions: An intercomparison of model-based projections for the new IPCC emissions scenarios. Helsinki. Finnish Environment Institute, 2003. [Consultado: 08/06/19].

TAYLOR. The internal combustion engine in theory and practice. The MIT Press. 1997.

TORRES, Alexander y MEDINA, Andrés. Sistema de reducción de emisiones contaminantes procedentes de motores de combustión interna mediante tratamientos post combustión por descarga de barrera dieléctrica. (Proyecto Técnico). Cuenca, Ecuador. Universidad Politécnica Salesiana. 2017.

TWENERGY. Principales problemas del uso de combustibles fósiles. Medio Ambiente. 2019. [Consultado: 09/06/19]. [En línea]. Disponible en <https://twenergy.com/ecologia-y-reciclaje/medio-ambiente/la-electricidad-frente-al-combustible-2734>

UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA. Ministerio de Minas y Energía. 2016.

URIBE, Yenny. Software para la simulación del comportamiento de un motor diésel trabajando con mezcla (Diésel-Gas natural) Simudual 1.0. Tesis de Pregrado, Ingeniería Mecánica. Universidad Industrial de Santander, 2008.

VIBE, Ivan Ivanovic. Brennverlauf und Kreisprozeß von Verbrennungsmotoren. VEB Verlag Technik. 1970.

WATSON, N. Turbocharging the Internal Combustion Engine. John Wiley & Sons Inc; 1982.