



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

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

**TRABAJO DE GRADO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO
DE INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ**

**Tema: Modelación del comportamiento de la inyección de combustible
con diésel fósil y biodiésel mediante simulación computacional.**

AUTOR: HESSLYN FELIPE REA ABRIL

DIRECTOR: ING. EDWIN SALOMÓN ARROYO TERÁN, MSc

Ibarra, Febrero del 2020

CERTIFICADO

ACEPTACIÓN DEL DIRECTOR

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

CERTIFICO:

Que una vez analizado el plan de grado cuyo título es "Modelación del comportamiento de la inyección de combustible con diésel fósil y biodiésel mediante simulación computacional." presentado por el señor: **Hesslyn Felipe Rea Abril** con número de cédula 1003473525, doy fe que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a presentación pública y evaluación por parte de los señores integrantes del jurado examinador que se designe.

En la ciudad de Ibarra, a los 07 días del mes Febrero del 2020.

Atentamente



Ing. Edwin Arroyo, MSc

DIRECTOR DEL TRABAJO DE GRADO



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

BIBLIOTECA UNIVERSITARIA

AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN

A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

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

DATOS DE CONTACTO	
CEDULA DE IDENTIDAD:	100347352-5
APELLIDOS Y NOMBRES:	Rea Abril Hesslyn Felipe
DIRECCIÓN:	Quis Quis y Fray Pedro Bedón
EMAIL:	hfreaa@utn.edu.ec
TELEFONO MOVIL:	0992909877
DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	Modelación del comportamiento de la inyección de combustible con diésel fósil y biodiésel mediante simulación computacional.
AUTORES:	Rea Abril Hesslyn Felipe
FECHA:	07/02/2020
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA:	PREGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA	INGENIERÍA EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ
ASESOR/DIRECTOR	Ing. Edwin Salomón Arroyo Terán, MSc

2. CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrollo, sin violar derechos del autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 07 días del mes de Febrero de 2020

AUTOR



Firma

Hesslyn Felipe Rea Abril

Nombre completo

100347352-5

C.C



CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR
TRABAJO DE GRADO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD
TÉCNICA DEL NORTE

Yo, **Hesslyn Felipe Rea Abril** con cédula de identidad Nro. **100347352-5**, manifiesto mi voluntad de ceder a la Universidad Técnica del Norte los derechos patrimoniales consagrados en la Ley de Propiedad Intelectual del Ecuador artículos 4, 5 y 6, en calidad de autor de la obra o trabajo de grado denominado **Modelación del comportamiento de la inyección de combustible con diésel fósil y biodiésel mediante simulación computacional**. Que ha sido desarrollado para optar por el título de: **INGENIERO EN MANTENIMIENTO AUTOMOTRIZ** en la Universidad Técnica del Norte quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente. En mi Condición de autor me reservo los derechos morales de la obra antes citada. En concordancia suscribo este documento en el momento que hago entrega del trabajo final en formato impreso y digital a la Biblioteca de la Universidad Técnica del Norte.

Firma

Hesslyn Felipe Rea Abril

Nombre completo

100347352-5

C.C

Ibarra, a los 07 días del mes de Febrero de 2020

Dedicatoria.

El presente trabajo de grado está dedicado a mis padres y a mi hermana, por ser los pilares fundamentales de amor, salud y economía para conseguir los méritos en cada etapa de mi vida y guiarme por el camino correcto hasta convertirme en un hombre de bien para la sociedad.

HESSLYN FELIPE REA ABRIL

AGRADECIMIENTO

Deseo expresar mis más sinceros agradecimientos a la Universidad Técnica del Norte, institución que me ha brindado sólidos conocimientos para desempeñarme en el campo profesional. Así como, a todos los docentes de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Automotriz, que me han brindado su sabiduría y experiencias en el transcurso del día a día.

Quiero expresar un profundo agradecimiento a mi madre Jacqueline Abril y a mi padre Felipe Rea, por su constante apoyo, dedicación y paciencia, quienes son los responsables de que consiga mi título universitario.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	IX
ABSTRACT	X
INTRODUCCIÓN	XI
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.1. Antecedentes	1
1.2. Planteamiento del problema	2
1.3. Formulación del problema	3
1.4. Delimitación	3
1.4.1. Delimitación temporal	3
1.4.2. Delimitación espacial	3
1.5. Objetivos	4
1.5.1. Objetivo general	4
1.5.2. Objetivos específicos	4
1.5.3. Justificación	4
1.6. Motores diésel	6
1.6.1. Ciclo de funcionamiento	6
1.6.2. Sistema de Inyección Diésel	8
1.6.3. Inyector	10
1.7. Combustibles	10
1.7.1. Diésel	11
1.7.2. Biodiésel	12
1.8. Software CAD	14
1.8.1. Etapas del diseño en CAD	15
1.8.2. Beneficios del CAD	15
1.8.3. Solidworks	16
1.9. Software CFD	16
1.9.1. Proceso de un código CFD	18
1.10. Estado del arte	19

2. MÉTODOS Y MATERIALES	23
2.1. Introducción	23
2.2. Datos del diésel	24
2.3. Datos biodiésel	25
2.4. Cálculos para la simulación computacional	26
2.4.1. Cálculos del diésel	27
2.4.2. Cálculos del biodiésel	28
2.4.3. Ecuaciones del software CFD	29
2.5. Geometría de la tobera	31
2.6. Dibujo de la tobera del inyector	32
2.6.1. Cuerpo de la tobera	33
2.6.2. Cámara de presión	34
2.6.3. Aguja de paso de combustible	35
2.6.4. Orificios de la tobera	35
2.6.5. Cilindro del motor	36
2.6.6. Ensamble completo	37
2.7. Preparación de la geometría	38
2.7.1. Introducción de la geometría	38
2.7.2. Mallado de la geometría	39
2.8. Organización e introducción de parámetros	41
2.8.1. Organización del software computacional	41
2.8.2. Introducción de los parámetros de combustibles	42
2.8.3. Introducción de los parámetros de entrada de la inyección	43
2.8.4. Introducción de los parámetros de las condiciones del cilindro	44
2.9. Selección de las ecuaciones, número de interacciones y curvas resultantes	45
2.9.1. Selección de ecuaciones matemáticas	45
2.9.2. Número de interacciones y curvas resultantes	46
2.10. Toma de mediciones en banco de pruebas	46
3. ANÁLISIS DE RESULTADOS	49
3.1. Introducción	49
3.2. Descripción y análisis de resultados de la simulación computacional	49
3.2.1. Ángulos de dispersión	50
3.2.2. Número de Reynolds (Re)	52
3.2.3. Velocidad	55
3.2.4. Presión	58
3.3. Análisis de los resultados en banco de pruebas	60
3.3.1. Biodiésel B10	61

3.3.2.	Diésel fósil	62
3.3.3.	Análisis de los resultados	63
4.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	64
4.1.	Conclusiones	64
4.2.	Recomendaciones.	65
	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	66
	ANEXOS	70

Índice de tablas

Tabla Núm	Descripción	Pág
2.1	Requisitos Diésel	24
2.2	Propiedades físicas Diésel	25
2.3	Requisitos Biodiésel	25
2.4	Datos del Biodiésel B10	26
3.1	Resultados del biodiésel B10 en el banco de pruebas	61
3.2	Resultados del diésel fósil en el banco de pruebas	62
3.3	Comparación de resultados en el banco de pruebas	63

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura Núm	Descripción	Pág
1.1	Ciclo de funcionamiento de un motor diésel 4 tiempos	8
1.2	Inyección indirecta	9
1.3	Inyección directa con turbulencia	9
1.4	Inyección indirecta	10
1.5	Esquema de la reacción de obtención del biodiésel	13
2.1	Código del inyector	31
2.2	Tobera del inyector	31
2.3	Orificio de la tobera	32
2.4	Cuerpo de la Tobera	33
2.5	Cámara de presión de la tobera	34
2.6	Aguja de paso de combustible	35
2.7	Orificios de la tobera	36
2.8	Cilindro del motor	36
2.9	Ensamble completo	37
2.10	Conductos internos de la tobera del inyector	38
2.11	Refinamiento de trabajo	39
2.12	Refinamiento local	40
2.13	Resultado del mallado Skewness	40
2.14	Celdas organizativas del software de simulación	41
2.15	Propiedades del diésel	42
2.16	Propiedades biodiésel	43
2.17	Parámetros inyección diésel	43
2.18	Parámetros inyección biodiésel B10	44

2.19 Parámetros cilindro	44
2.20 Ecuaciones del software	45
2.21 Número de interacciones y líneas resultantes	46
2.22 Banco de pruebas y simulador de pulsaciones	47
2.23 Banco de pruebas y simulador de pulsaciones	48
3.1 Uso de streamline	50
3.2 Ángulo de dispersión del diésel	51
3.3 Ángulo de dispersión del biodiésel B10	51
3.4 Resultados número de Reynolds	53
3.5 Resultados número de Reynolds	53
3.6 Resultados del Re total	54
3.7 Resultados del Re (0,9mm. a 2,9mm.)	55
3.8 Resultados velocidad	56
3.9 Resultados velocidad total	56
3.10 Resultados velocidad (0.9mm. a 1.5mm.)	57
3.11 Resultados de presión	58
3.12 Resultados presión total	59
3.13 Resultados presión (0,9 mm a 1,5 mm)	60
3.14 Muestra 1 del biodiésel B10	61
3.14 Muestra 1 del Diésel Fósil	62

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación Núm	Descripción	Pág
2.1	Caudal ¡ERROR! MARCADOR NO DEFINIDO.	
2.2	Presión	27
2.3	Densidad	27
2.4	Viscosidad	27
2.5	Flujo másico	27
2.6	Ecuación de conservación de masa	30
2.7	Ecuaciones de cantidad de movimiento	30
2.8	Energía cinética	30
2.9	Tasa de disipación	30

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo Núm	Descripción	Pág
I	Obtención de la tobera	71
II	Banco de Pruebas	73
III	Planos	79
IV	Tablas de resultados de la simulación	75
V	Resultados de las pruebas del biodiésel B10	78

RESUMEN

El objetivo principal del presente estudio fue analizar el comportamiento de la inyección de combustible fósil y biodiésel B10 mediante un software computacional CFD, el inyector utilizado proviene de la camioneta Mazda BT-50 CRDI. Los datos encontrados de la geometría de la tobera del inyector fueron introducidos a un software CAD que permitió la generación del dibujo y ensamble completo de la pieza. La simulación se realizó por medio de un software CFD, con datos de 101 325 Pa para la presión ambiental y 800 bares de presión de inyección, los datos del combustible fósil son 0,053 kg/s para el flujo másico, 840 kg/m³ para la densidad y 0,005 kg/m . s para la viscosidad, los datos del biodiésel B10 son 0,054 kg/s para el flujo másico, 854,16 kg/m³ para la densidad y 0,004 kg/m . s para la viscosidad. Los resultados obtenidos a un milímetro de la tobera del inyector para el combustible fósil presentan un número de Reynolds de 7 000, una presión de 31 718,75 MPa y una velocidad de 8 233,70 m/s; para el biodiésel B10 presentan un número de Reynolds de 8 000, una presión 32 248,07 MPa y una velocidad de 8 236,35 m/s. Concluyendo que el biodiésel B10 tiene un proceso de cambio de estado en menor tiempo, al ser la velocidad mayor llega a las paredes del cilindro en menor tiempo, y al obtener cantidades de presión superiores determina que almacena mayor cantidad de energía, estos parámetros permiten la creación de la mezcla aire-combustible en menor tiempo y un aumento de la eficiencia de la combustión. Otro punto del estudio fue realizar la obtención de dispersión mediante un banco de pruebas en una hoja de papel ubicada a 8,5 centímetros de la tobera del inyector, dando como resultado una medida promedio para el diésel fósil de largo y ancho de 27,87 y 17,46 milímetros respectivamente, 28,71 y 18,08 milímetros para el biodiésel B10, el biodiésel B10 obtiene una dispersión superior por 0,84 milímetros a lo largo y 0,62 a lo ancho que el combustible fósil, determinando que abarca mayor volumen dentro de la cámara de combustión y facilita la mezcla aire-combustible.

ABSTRACT

The main objective of the present study was to analyze the behavior of fossil fuel injection and B10 biodiesel using CFD computer software, the injector used comes from the Mazda BT-50 CRDI truck. The data found of the geometry of the nozzle of the injector were introduced to a CAD software that allowed the generation of the drawing and complete assembly of the piece. The simulation was carried out by means of a CFD software, with data of 101 325 Pa for the environmental pressure and 800 bars of injection pressure, the fossil fuel data is 0,053 kg/s, the mass flow, 840 kg/m^3 for the density and 0,005 kg/m . s for viscosity, the B10 biodiesel data is 0,054 kg/s for mass flow, $854,16 \text{ kg/m}^3$ for density and 0,004 kg/m . s for viscosity. The results obtained at one millimeter of the injector nozzle for fossil fuel have a Reynolds number of 7 000, a pressure of 31 718,75 MPa and a speed of 8 233,70 m/s, for biodiesel B10 have a Reynolds number of 8 000, a pressure 32 248,07 MPa and a speed of 8 236,35 m/s. Concluding that biodiesel B10 has a state change process in less time, as the higher speed reaches the walls of the cylinder in less time, and by obtaining higher amounts of pressure determines which stores more energy, these parameters vary the creation of the air-fuel mixture in less time and an increase in combustion efficiency. Another point of the study was to obtain dispersion by means of a test bench on a sheet of paper located 8,5 centimeters from the nozzle of the injector, resulting in an average measurement for fossil diesel length and width of 27,87 and 17,46 millimeters respectively, 28,71 and 18,08 millimeters for biodiesel B10, biodiesel B10 obtains a higher dispersion by 0,84 millimeters long and 0,62 wide than fossil fuel, determining that it covers greater volume inside the combustion chamber and facilitates air-fuel mixing.

INTRODUCCIÓN

La contaminación producida por el uso de combustibles fósiles afecta considerablemente a la atmósfera, para evitar continuos daños se buscan combustibles alternativos que brinden prestaciones similares, sean amigables con el medio ambiente y su producción sea renovable. La modelación computacional en 3D y programas de dinámica de fluidos promueven el análisis y comparación del comportamiento de combustibles fósiles y alternativos en el momento de la inyección dentro del cilindro del motor. El presente estudio está orientado a la comparación del “comportamiento de la inyección entre diésel fósil y biodiésel B10 mediante simulación computacional”, utilizando el inyector de la camioneta Mazda BT-50 Common Rail. La investigación se encuentra dividida en cuatro capítulos que permitieron determinar las ventajas obtenidas al utilizar biocombustible B10 en motores diésel. En donde el primer capítulo contiene antecedentes, planteamiento del problema, objetivos, justificación, marco contextual del problema, conceptos de los motores diésel, descripción de los combustibles, análisis de programas computacionales de dibujo y simulación, y estado del arte de la investigación. El segundo capítulo contiene la información de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles estudiados, la geometría del inyector, el dibujo realizado en un programa CAD, preparación de la geometría en el programa CFD para realizar la simulación y las herramientas utilizadas en la toma de muestras en un banco de prueba de inyectores. El tercer capítulo abarca el tema del análisis de resultados obtenidos en la simulación computacional de ángulos de dispersión, velocidad, presión y número de Reynolds, al igual que la comparación de los ángulos de dispersión de los combustibles en el banco de prueba de inyectores. El cuarto capítulo está contenido por conclusiones y recomendaciones.

CAPÍTULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. ANTECEDENTES

La creciente importancia y el renovado interés por el eficiente manejo de los recursos energéticos han desarrollado un crecimiento acelerado de la producción y utilización de biocombustibles en muchas partes del mundo (Báez Chamorro, 2015, pág. 1), generando una nueva matriz energética con lo que se busca mejorar la situación actual con respecto al medio ambiente, buscando disminuir la contaminación que producen los vehículos a diésel. En la actualidad hay países que están desarrollando diferentes tipos de combustibles a los ya conocidos y entre estos está el biocombustible que en motores diésel se emplea con una proporción de un 10% de biodiésel en el combustible fósil (Báez Chamorro, 2015, pág. 1), con ello se necesitan estudios de los gases contaminantes para determinar los valores exactos utilizando una mezcla de diésel fósil y biocombustible al 10%.

Por otra parte, cabe mencionar los compromisos adquiridos por la Unión Europea para reducir paulatinamente la dependencia del sector automotriz de los combustibles fósiles derivados del petróleo, que según la anterior comunicación es del 98% (Rodríguez Fernández, 2007, pág. 4), lo que fomenta un compromiso mundial para poder combatir los efectos de los gases de invernadero producidos por los motores de combustión interna que utilizan combustibles fósiles para su funcionamiento.

El sistema de inyección influye notablemente en el proceso de formación de la mezcla aire-carburante y por tanto su funcionamiento, también tiene efecto sobre el proceso de combustión y los gases que en éste se generan (González Querubín, 2008, pág. 1), el sistema de inyección disminuye la contaminación ejercida por la combustión, aumentando la presión y pulverizando el combustible inyectado.

Uno de los componentes de más importancia en el sistema de inyección es la tobera de los inyectores, de acuerdo a la geometría interna que esta adopte, influirá notablemente en el comportamiento del flujo de combustible en su interior; el cual afecta la forma y características de la atomización del combustible en la cámara de combustión (González Querubín, 2008, pág. 1).

El significado del diseño asistido por computadora ha cambiado en varias ocasiones durante su corta historia. En principio, CAD era un sinónimo del análisis de elementos finitos. Después, el énfasis en el CAD cambió al dibujo asistido por computadora y, en estos días, el término CAD se asocia con el diseño y modelado de los objetos tridimensional (Solórzano Ríos, 2012, pág. 21), En sí, el diseño asistido por computadora implica precisamente el uso de computadoras para la creación de dibujos y modelos con muchas, si no todas, de las características finales del producto permitiendo al diseñador la manipulación del mismo y adaptarlo para futuras correcciones (Solórzano Ríos, 2012, pág. 21).

Los métodos computacionales CFD son utilizados para determinar el comportamiento de los fluidos, lo cual constituye el principio de simulación antes de construir un modelo determinado de un prototipo (Copete, Amell, & Cadavid, 2008, pág. 111), en los últimos años la utilización de paquetes computacionales para los diferentes procesos de simulación han reducido costos y tiempo en la producción de prototipos, analizando en su totalidad las características y dimensiones.

La dinámica computacional de fluidos es una técnica que se usa para simular fenómenos de transporte de fluidos, transferencia de calor entre otros, la solución consiste en resolver las ecuaciones de flujo, sobre una región o dominio de interés, que tiene condiciones conocidas de flujo (Patiño , 2014, pág. 30).

La simulación tridimensional utilizando CFD permite ver los efectos presentes dentro de un fluido, analizarlos a través de gráficos o tablas, determinando los puntos de interés dentro del proceso y aumenta la comprensión de los investigadores.

1.2. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

Con la creación de biocombustibles y la falta de información del comportamiento a la salida de la tobera del inyector, fomenta el estudio del fenómeno producido antes de la creación de la mezcla aire combustible, buscando una comparación entre los combustibles de origen fósil y los biocombustibles.

Con la comparativa realizada en la inyección de diésel fósil y biodiésel B10 permite analizar si la geometría utilizada en motores diésel colabora con la obtención de la energía de los biocombustibles o requiere modificaciones para facilitar la mezcla aire-combustible.

El continuo avance tecnológico y la creación de programas computacionales ayuda al análisis de los efectos producidos en el medio, respaldando la aplicación en carreras existentes para desarrollarlas en un ámbito investigativo y constructivo.

Los programas de dinámica de fluidos permiten al investigador utilizar las características reales del entorno de trabajo dentro de la cámara de combustión con la totalidad de las características de diseño y geometría, entregando valores reales, comprobables de lo que pasa en cada fenómeno.

1.3. FORMULACIÓN DEL PROBLEMA

¿Es necesaria la modelación del comportamiento de la inyección de combustible con diésel fósil y biodiésel mediante simulación computacional?

1.4. DELIMITACIÓN

Las delimitaciones del presente trabajo de grado se las clasifica en dos, las cuales son:

1.4.1. DELIMITACIÓN TEMPORAL

El presente trabajo de grado se la realizará en el periodo lectivo Marzo del 2019 hasta Febrero del 2020.

1.4.2. DELIMITACIÓN ESPACIAL

El presente trabajo de grado se la realizará en la Ciudad de Ibarra capital de la provincia de Imbabura que se encuentra en Ecuador y en las instalaciones de la Universidad Técnica del Norte.

1.5. OBJETIVOS

Los Objetivos son metas planteadas para comprobar el éxito de actividades, pero también son referencias que permite determinar el esfuerzo en el desempeño de una tarea (Chaparro González, 2015, pág. 11).

1.5.1. OBJETIVO GENERAL

- Analizar la inyección del combustible usando diésel y biodiésel B10 mediante simulación computacional y experimental con el fin de determinar posibles variaciones durante la atomización.

1.5.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Dibujar la tobera del inyector y el cilindro del motor mediante una herramienta de dibujo CAD.
- Simular la inyección de combustible usando las características del diésel y biodiésel B10 mediante una herramienta CFD.
- Analizar los resultados obtenidos de la simulación computacional y el método experimental del comportamiento de los combustibles utilizados.

1.5.3. JUSTIFICACIÓN

El biodiésel es un combustible producido mediante la transesterificación de aceites vegetales o grasas animales, que en la actualidad está adquiriendo mayor atención como sustituto del diésel a nivel internacional. Ha adquirido un mayor auge como resultado del encarecimiento del petróleo y sus derivados, los altos índices de emisiones contaminantes, así como la necesidad de impulsar el compromiso con el desarrollo sustentable.

Una de las principales ventajas de utilizar biodiésel como combustible sustituto del diésel en motores de combustión interna, es la oportunidad de reducir las emisiones contaminantes HC, CO, CO₂, SO_x, HAP (hidrocarburos aromáticos poli cíclicos) y MP (material particulado), así como los efectos negativos causados al ambiente (gases de efecto invernadero) y en la salud humana (enfermedades crónico-respiratorias, asma entre otras); dado que algunos de los contaminantes generados por la combustión del diésel como el MP y los HC son tóxicos y carcinógenos (Pérez Sánchez, y otros, 2015, pág. 85)

Adicionalmente, en el corto plazo, aquellos proyectos orientados al cambio de la matriz energética que ya han iniciado deben continuar desarrollándose al igual que proyectos de pequeña envergadura que son factibles de ejecutar (Salazar, 2015, pág. 89).

Según el decreto 1303, el Presidente Constitucional de la república decreta:

Declárese de interés nacional el desarrollo de biocombustibles en el país como medio para el impulso del fomento agrícola; la producción, el uso y el consume de los biocombustibles responderán a una estrategia inclusiva de desarrollo rural, precautelando la soberanía alimentaria y sostenibilidad ambiental (Presidente Constitucional de la Republica Rafael Correa, 2012).

El combustible diésel destinado al sector automotriz que se utilice en el país deberá ir incrementando progresivamente el porcentaje de biodiésel de origen vegetal de producción nacional, hasta llegar a un 10% (B10); incremento que se aplicara en función de la oferta nacional de biodiésel y de acuerdo con los requisitos técnicos definidos por la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (Presidente Constitucional de la Republica Rafael Correa, 2012).

La simulación numérica de motores de encendido por chispa presenta incertidumbres que comprometen la fiabilidad de los resultados debido a la interrelación existente de la cinética química y la cinemática del flujo dentro de la cámara de combustión (Mantilla, 2017, pág. 213).

La dinámica de fluidos computacional es una herramienta que se basa en la resolución de las ecuaciones de transporte, el que utiliza el método de los volúmenes finitos mediante el cual se realiza una discretización volumétrica del dominio, el número de ecuaciones de transporte a resolver, dependerá de la cantidad de modelos necesarios para describir la fluido-dinámica del problema de interés (S. Pérez-Cortes a, 2017, pág. 188).

Los programas de dinámica de fluidos computacional CFD utilizan un procedimiento numérico por ordenador para resolver las ecuaciones gobernantes de flujos de Navier-Stokes, las cuales permiten simular la interacción entre distintos fluidos utilizando la misma geometría de los componentes del inyector (Samaniego Burmeo , 2015, pág. 5).

1.6. MOTORES DIÉSEL

Los motores diésel, al igual que los de explosión, son motores alternativos endotérmicos de combustión interna, es decir, transforman la energía en el interior del cilindro, este tipo de motores se caracterizan por el funcionamiento al momento de la alimentación, por el proceso de combustión presente dentro de la cámara, y su elevado rendimiento por consecuencia de trabajar a presiones elevadas obteniendo así un aprovechamiento mayor del combustible (Secundino, 2009, pág. 77).

Los motores diésel solamente comprimen aire, por lo que la relación de compresión puede ser mayor, siendo introducido el combustible a una presión muy elevada en el tiempo de trabajo, para producir la combustión. Son conocidos como motores de encendido por compresión.

1.6.1. CICLO DE FUNCIONAMIENTO

La estructura del motor diésel es similar a la del motor otto, aunque en los motores diésel primero penetra el aire en los cilindros y se comprime, posteriormente entra el combustible, por tanto, la mezcla se forma en el interior del cilindro. El aire introducido en el cilindro se comprime fuertemente en la fase de compresión, alcanzando temperaturas superiores a los 600 °C; en esta masa de aire caliente se inyecta el combustible finamente pulverizado a alta presión. El combustible se enciende espontáneamente por la elevada temperatura del aire, mientras que una vez iniciado el proceso de la combustión se ve favorecido por la gran cantidad de oxígeno que se encuentra alrededor de cada una de las gotas inyectadas (Sánchez, 2009, pág. 255).

El ciclo de funcionamiento del motor diésel de cuatro tiempos es el siguiente:

- Admisión

El pistón se desplaza desde el punto muerto superior (PMS) al punto muerto inferior (PMI), se abre la válvula de admisión y entra en el cilindro el aire perfectamente filtrado.

- Compresión

Se cierra la válvula de admisión y el pistón se desplaza desde el PMI al PMS el aire introducido durante la admisión se comprime en la cámara de combustión, durante esta fase aumenta notablemente la temperatura del aire hasta alcanzar aproximadamente de 700 a 800 °C, este aumento de temperatura se produce principalmente por la elevada presión a la que está sometido el aire (Secundino, 2009, pág. 78).

- Trabajo

Para el correcto entendimiento de este proceso se divide en tres partes:

a) Inyección

El pistón realiza el recorrido al punto muerto superior, cuando llega a este punto, la tobera del inyector se abre y entrega el combustible pulverizado dentro de la cámara de combustión. La cantidad de combustible inyectado se debe encontrar dosificado para llegar a la correcta mezcla estequiométrica.

b) Combustión

La temperatura del aire dentro de la cámara es más elevada que la temperatura del encendido del combustible, haciendo que el diésel tenga un encendido espontáneo.

c) Expansión

Los gases residuales de la combustión producida en la cabeza del pistón hacen que éste se desplace del PMS al PMI, generando el trabajo correspondiente a este proceso.

- Escape

Cuando el pistón llega al PMI la válvula de escape se abre, los gases quemados presentan una presión mayor que la exterior siendo expulsados del cilindro hasta que la presión se iguala con la del ambiente.

Al final el proceso de Escape, la válvula de escape se cierra y la de admisión se abre, dando

como terminado un ciclo y marcando el comienzo de un nuevo ciclo.

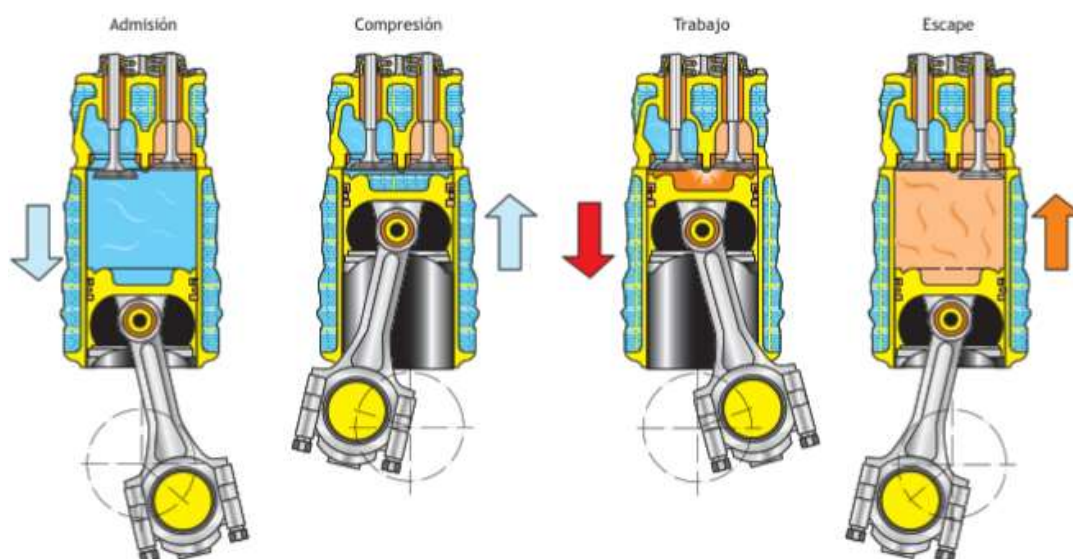


Figura 1.1 Ciclo de funcionamiento de un motor diésel 4 tiempos

Fuente: (Secundino, 2009, pág. 79)

La figura 1.1 representa de manera gráfica el ciclo de un motor diésel de 4 tiempos, indicando los procesos presentes en el ciclo de funcionamiento que son: admisión, compresión, trabajo y escape, además del recorrido que tiene cada tipo de válvula y en qué tiempo actúan.

1.6.2. SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

El sistema de inyección se encarga de suministrar al inyector el caudal necesario de combustible en cada carrera de trabajo, haciéndolo a gran presión y a una posición exacta del cigüeñal, el inyector asegura una fina pulverización del combustible en la cámara de combustión (Sánchez, 2009, pág. 256).

- Inyección Indirecta

También conocidos, como motores de cámara dividida; esto es debido a la geometría de la cámara de combustión, formada por una precámara ubicada en la culata, que está conectada a la cámara principal por medio de una garganta. El inyector, va a introducir el combustible en esta cámara el cual va a ser quemado para el aumento de presión generando que el combustible no quemado se dirija al cilindro en donde se quemará en su totalidad.



Figura 1.2 Inyección Indirecta

Fuente: (Sánchez, 2009, pág. 258).

La figura 1.2 indica la posición del inyector en una precámara de combustión, ubicada de manera tangencial para ayudar al mezclado de aire y combustible.

- Inyección Directa

En este tipo de inyección, el inyector se encuentra situado en la culata del cilindro, la tobera del inyector se encuentra ubicada directamente en la cámara de combustión y presenta algunos orificios periféricos de pequeño diámetro que aseguran una buena pulverización y penetración.

En los motores actuales existe la presencia de una cámara situada en la cabeza del pistón con una geometría la cual permite tener turbulencia en el interior, con el fin de buscar una mezcla total del aire con el combustible.

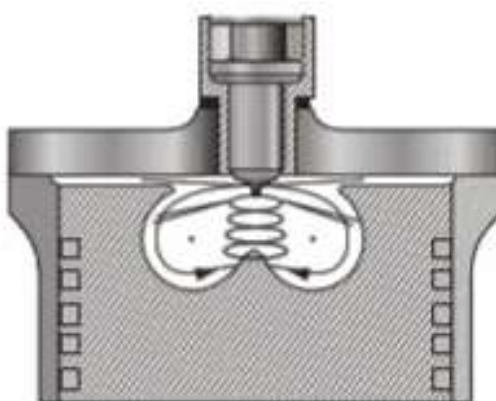


Figura 1.3 Inyección directa con turbulencia

Fuente: (Sánchez, 2009, pág. 257).

En la figura 1.3 el inyector se encuentra ubicado directamente en la cámara de combustión, con la geometría existente en la cabeza del pistón se crea la turbulencia.

1.6.3. INYECTOR

El inyector, compuesto por cuerpo y aguja, es el elemento que suministra el combustible una vez que la presión de combustible es mayor que la fuerza contraria del muelle de presión, con esto se consigue que queden abiertos el orificio o los orificios de inyección, y el combustible sea inyectado en la cámara de combustión (Sánchez, 2009, pág. 263).

En la actualidad, el tipo de inyectores utilizados para motores de combustión interna a diésel son los inyectores tipo lápiz. Soportan altas cargas de presión.



Figura 1.4 Inyección Indirecta

Fuente: (Sánchez, 2009, pág. 266).

En la figura 1.4 se describe las partes principales del inyector tipo lápiz, estos inyectores están formados por un anillo de sujeción (1) y el capuchón (2), la presión de abertura del inyector se ajusta mediante un casquillo con rosca y el desplazamiento de aguja se regula mediante un tornillo, tanto el casquillo con rosca como el tornillo de reglaje van situados en el interior del capuchón (2), además en su parte inferior se sitúan dos juntas de acoplamiento (3 y 4) (Sánchez, 2009, pág. 266).

1.7. COMBUSTIBLES

Los combustibles son fluidos que liberan energía cuando son sometidos a un cambio de

estructura química, liberando energía potencial la cual es aprovechada para generar movimiento o calor, dependiendo el caso para el cual es utilizado.

1.7.1. DIÉSEL

Es una mezcla de hidrocarburos, el cual se obtiene por el proceso de destilación fraccionada del petróleo, las principales características son:

- Su inflamación necesita altas presiones.
- La acidez y el porcentaje de corrosión es baja.
- El contenido de azufre y sustancias pegajosas presente es escaso.

Las propiedades fisicoquímicas principales del diésel son:

- Número de cetanos

El número de Cetano es un índice de encendido del combustible en los motores diésel, se utiliza un sistema de graduación para medir la calidad del diésel.

Cetano: es un hidrocarburo saturado, incoloro, soluble a los alcoholes, acetona, éter y es insoluble para el agua. Está compuesto por 16 átomos de carbono y 34 átomos de hidrógeno.

- Punto de inflamación.

El punto de inflamación de un combustible es la temperatura más baja a la cual el combustible desprende vapores en cantidad suficiente para inflamarse momentáneamente, el valor del diésel es superior a los 55° C.

- Poder calorífico y densidad

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de calor producida por la combustión completa de un kilogramo de esa sustancia.

La densidad es el resultado del producto de la masa por una unidad de volumen, a una temperatura dada.

- Contenido de azufre

El azufre forma óxidos que se combinan con el vapor de agua en la cámara de combustión formando ácido sulfúrico que es altamente corrosivo cuando se condensa.

- Volatilidad

Es la rapidez en la cual la sustancia pasa de estado líquido a gaseoso. Para saber la volatilidad es necesario destilar un 90% de una muestra del combustible, entre menor sea la temperatura necesaria para destilarlo, mayor será su volatilidad.

- Agua

Por la diferencia de densidad entre el agua y el combustible, crea problemas con la presión administrada al combustible, al igual que traer consecuencias por oxidación y corrosión de los diferentes elementos.

- Sedimentos

Los sedimentos son el conjunto de herrumbre, escamas, escoria, tierra, óxidos, precipitados orgánicos, que llega al combustible una vez salido de la refinería.

- Viscosidad

La viscosidad es la representación de la resistencia que tiene un líquido para fluir. Un elevado índice de viscosidad puede traer problemas en la bomba de inyección, en las toberas de los inyectores, y problemas al momento de la pulverización.

- Cenizas

Las cenizas se dan por la unión de metales y otros contaminantes en el combustible que no son quemados en su totalidad, causan daños en asientos de válvulas, camisas, bomba de inyección, inyectores y en el turbo.

1.7.2. BIODIÉSEL

Se denomina biodiésel a los ésteres metílicos de los ácidos grasos que proceden de las grasas animales y los aceites vegetales, aunque debido a las grandes cantidades de biodiésel requerido para su uso en el sector del transporte sólo tienen interés práctico los aceites vegetales, debido a que las grasas animales son escasas en comparación con las necesidades de combustible del transporte, que nunca podrían satisfacer la enorme demanda de éstos (Pérez, 2016, pág. 74).

Existen varios métodos para la producción de biodiésel:

- Transesterificación: reacción del aceite vegetal con metanol, catalizada por compuestos básicos
- Reacción transesterificación catalizada por compuestos químicos ácidos, como el ácido sulfúrico
- Esterificación: Obtención de ácidos grasos del aceite y reacción con metanol, catalizada con químicos ácidos.

El método mayormente utilizado por las industrias productoras de biocombustibles es el de transesterificación entre los aceites vegetales y metanol, que da lugar a ésteres del metanol y glicerina como subproducto.

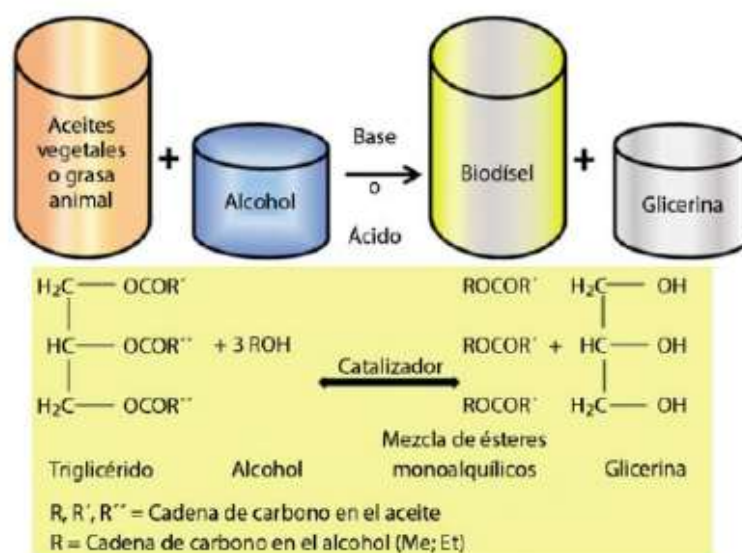


Figura 1.5 Esquema de la reacción de obtención del biodiésel

Fuente: (Pérez, 2016, pág. 75).

La figura 1.5 expresa la reacción química utilizada para elaborar biodiésel, se necesita aceites de procedencia animal o vegetal y añadir un disolvente, en este caso alcohol, para tener como resultado el biodiésel y glicerina los cuales son los elementos residuales del proceso.

Según el lugar de procedencia de los aceites vegetales y del proceso de extracción de biodiésel se los puede clasificar en 3 grupos:

- Biocombustibles de primera generación

Son aquellos producidos en base a azúcar, almidones, aceites vegetales o grasas animales

utilizando tecnologías tradicionales. El biodiésel se obtiene a través de un proceso químico llamado transesterificación.

- Biocombustibles de segunda generación

Son aquellos elaborados en base a materias primas que no compiten con la alimentación, también incluye la biomasa producto de residuos agrícolas.

- Biocombustibles de tercera generación

Son aquellos basados en cultivos que requieran investigación y desarrollo para llegar a ser comercialmente posible: por ejemplo, hierbas perennes o árboles de crecimiento rápido que a través de la reacción con enzimas convierten la lignocelulosa en almidones obteniéndose el etanol Lignocelulósico o la obtención de biocombustibles a través de algas desarrolladas en aguas salinas, dulces o residuales (Acosta, 2012, pág. 334).

1.8. SOFTWARE CAD

CAD cuyo acrónimo en inglés significa Computer Aided Design básicamente es el conjunto de aplicaciones informáticas que permiten al ingeniero u otros profesionales el diseño de un producto a fabricar. Este conjunto de aplicaciones informáticas permite al profesional la versatilidad del desarrollo y pruebas de productos.

El diseño asistido por computadoras permite dibujar el producto con todas las características finales, permitiendo al diseñador obtener una manipulación total para la adaptación o corrección. Los sistemas CAD permiten la simulación de un producto para verificar su funcionamiento.

Las formas de generar un dibujo asistido por una computadora son de dos maneras: en dos dimensiones (2D) y tres dimensiones (3D), la representación CAD en 2D utiliza los planos X, Y generando información bidimensional. En cambio, la representación en 3D brinda información analítica de volumen del objeto, incluyendo relaciones geométricas y restricciones que el usuario puede definir (Solórzano Ríos, 2012, pág. 21).

1.8.1. ETAPAS DEL DISEÑO EN CAD

El proceso para el diseño en CAD consiste en cuatro etapas:

- Etapa 1

Modelado geométrico. Se describe como forma matemática o analítica a un objeto físico, el diseñador construye un modelo geométrico emitiendo comandos que crean líneas, superficies, cuerpos, dimensiones y texto; los comandos introducidos dan a origen a una representación exacta en dos o tres dimensiones del objeto (Toapanta Cunalata, 2013, pág. 20).

- Etapa 2

Análisis y optimización del diseño. Determinadas las propiedades geométricas, el modelo pasa por un análisis para rectificar errores de modelado (dimensiones, formas).

- Etapa 3

Revisión y evaluación del diseño. En esta etapa se comprueba si existen interferencias entre componentes de cierto mecanismo que impidan su correcto funcionamiento o deficiencias estructurales en el caso de cuerpos sólidos.

- Etapa 4

Documentación y dibujo (drafting). Por último, en esta etapa se realizan planos técnicos y de trabajo. Se representan diferentes vistas de la pieza, a escala, incluyendo perspectivas.

1.8.2. BENEFICIOS DEL CAD

Los beneficios del CAD incluyen menores costos de desarrollo de productos, aumento de la productividad, mejora en la calidad del producto y un menor tiempo de lanzamiento al mercado.

- Mejor visualización del producto final, los sub-ensambles parciales y los componentes en un sistema CAD agilizan el proceso de diseño.

- El software CAD ofrece gran exactitud de forma que se reducen los errores.
- El software CAD brinda una documentación más sencilla y robusta del diseño, incluyendo geometría y dimensiones, lista de materiales.
- El software CAD permite una reutilización sencilla de diseños de datos y mejores prácticas.

1.8.3. SOLIDWORKS

Es un programa de diseño asistido por computadora para modelado mecánico desarrollado en la actualidad por SolidWorks Corp. para el sistema operativo Microsoft Windows. Es un modelador de sólidos paramétrico, fue introducido en el mercado en 1995 (Zarate Cruz, 2016, pág. 44).

El programa permite modelar piezas y conjuntos, además de extraer los planos técnicos como otro tipo de información necesaria para la producción. El proceso consiste en trasvasar las ideas del diseñador al sistema CAD. Este programa permite diseñar productos con mayor calidad y rapidez, reduciendo tiempo y coste.

El paquete de simulación de SolidWorks garantiza la calidad y el funcionamiento de los diseños antes de la fabricación. La simulación podrá definir los métodos para reducir el peso, y el coste, además de mejorar la durabilidad y la factibilidad de fabricación (Toapanta Cunalata, 2013, pág. 24).

1.9. SOFTWARE CFD

La dinámica de fluidos computacional (CFD, por sus siglas en inglés) consiste en el análisis de sistemas que involucran flujo de fluidos, transferencia de calor y otros fenómenos como reacciones químicas por medio de simulaciones en computadora. El flujo y fenómenos relacionados pueden ser descritos mediante ecuaciones diferenciales que generalmente no

pueden ser resueltas analíticamente. Para obtener una solución numérica aproximada se ocupa el método de discretización. Este método aproxima las ecuaciones diferenciales a un sistema algebraico de ecuaciones que posteriormente pueden ser resueltas en una computadora (Mata Cárdenas, 2017, pág. 49).

La dinámica de fluidos computacional abarca la automatización de métodos ingenieriles de diseño para el uso de las soluciones detalladas de las ecuaciones de Navier-Stokes como complemento en la investigación experimental para la naturaleza de flujo. Existen fenómenos complejos como turbulencia, combustión o flujo multifásico donde las ecuaciones exactas no están disponibles o la solución numérica resulta no factible, esto hace necesario la introducción de modelos. Aun si se resuelven estas ecuaciones, la solución puede no ser una representación correcta de la realidad, por lo que es necesario validar los modelos con datos experimentales (Meselhe, 2012, pág. 341).

Entender el movimiento de líquidos y gases es crucial en muchas ramas de la ingeniería. Hasta hace poco, los estudios de fluidos en movimiento fueron confinados al laboratorio, pero con el rápido crecimiento de la capacidad de procesamiento de la computadora personal, aplicaciones de software ahora traen análisis y soluciones de problemas de flujo en el escritorio numérico. (Sarmiento & Lazo, 2015, pág. 22). Además, el uso de interfaces comunes y procesos de flujo de trabajo hacen la dinámica de fluidos accesible a los diseñadores, así como los analistas.

Las ventajas presentes en CFD frente a las técnicas experimentales de laboratorios e industrias son:

- Los costos de inversión por licencias de software y el hardware requerido para CFD son altos, pero no se comparan con los de unas instalaciones para desarrollar prácticas experimentales.
- Reducción en los tiempos de diseño y experimentación.
- Capacidad para estudiar sistemas donde es imposible realizar experimentos controlados.
- Capacidad para estudiar sistemas en situaciones de peligro o que excedan los límites de seguridad.
- Resultados con gran nivel de detalle.

Las desventajas del CFD son:

- Requiere computadoras de gran capacidad.
- Los operadores deben de tener experiencia y completo entendimiento del fenómeno.
- Las licencias de los simuladores son costosas.
- El flujo multifásico sigue siendo difícil de analizar.
- Requiere verificar los resultados en flujos complejos.

1.9.1. PROCESO DE UN CÓDIGO CFD

Los paquetes comerciales de CFD poseen una interfaz dónde los usuarios ingresan las características de entrada y posteriormente visualiza los resultados, consta de 3 etapas principales:

Reproceso:

Esta etapa consiste en:

- Definir la geometría de la región de interés.
- Sub dividir el dominio (malla) en sub dominios (volúmenes de control)
- Elegir el fenómeno a modelar.
- Definir las propiedades del fluido.
- Especificar las condiciones de frontera.

Solución:

La solución de un problema de flujo (velocidad, presión, temperatura etc.) se encuentra definida en los nodos dentro de cada celda, la precisión de esta solución depende del número de celdas en la malla. Al incrementar el número de celdas se incrementa el tiempo de cálculo y los requerimientos de capacidad del hardware. Las mallas óptimas son aquellas que no son uniformes, siendo más finas en regiones donde existen grandes variaciones (Fernández Oro, 2012, pág. 19).

Postproceso:

Finalmente, en el análisis de resultados es de suma importancia la representación gráfica de las variables que gobiernan el flujo, mapas de contornos, vectores de velocidades, presiones,

etc. de esta manera se tiene una visión rápida de los resultados ya que la cantidad de información obtenida en un proceso de simulación puede ser grande (Maurad Guncay, 2017, pág. 18).

Debido a la capacidad gráfica de los equipos computacionales actuales, la visualización de los datos es más versátil, algunos programas incluyen herramientas que permiten visualizar los resultados como:

- Gráficos de los vectores.
- Gráficos con sombreado.
- Visualización del dominio de la geometría y el mallado.
- Gráficos de superficies en 2D y 3D.
- Trayectoria de la partícula.
- Vista manipulable.
- Paleta de colores relacionada con los valores.
- Resultados animados para la visualización de datos dinámicos.

Los resultados generados por un código CFD dependen en gran parte del operador, es muy importante la identificación y la formulación del problema de flujo a resolver en términos de los fenómenos físicos y químicos. Como en todos los problemas se deben hacer suposiciones para reducir su complejidad a un nivel manejable mientras se conserven las características esenciales del fenómeno, ya que de estas suposiciones depende la calidad de los resultados del CFD (Mata Cárdenas, 2017, pág. 52).

1.10. ESTADO DEL ARTE

La presente investigación se enfoca en la obtención de biodiésel a base de aceite de higuera, la principal ventaja es que es uno de los más puros y eficaz para su utilización, pero por el elevado costo de obtención incentiva a encontrar diferentes métodos para la fabricación de combustibles alternos. La búsqueda para encontrar medidas más económicas ha guiado hacia la obtención de biocombustibles a través del aceite vegetal de cocina usado. El trabajo busca la determinación de parámetros de forma experimental y la evaluación de

biodiésel obtenido a base de aceite de higuera o de aceite de cocina usado que permitan reducir costos de la materia prima manteniendo la calidad del biodiésel. Los resultados obtenidos mostraron que el rendimiento de aceite de higuera con aceite de cocina usado es superior al 92,66%, siendo la mezcla de 85% de aceite de higuera y 15% de aceite de cocina usado la que obtuvo el mayor rendimiento con un valor de 99,89%. El trabajo concluye que es posible integrar el aceite de cocina usado en procesos productivos para obtener biodiésel a partir de aceite de higuera y reducir los costos del biodiésel generado (Rodríguez Rodríguez, 2016).

La investigación presenta la caracterización del biodiésel a base de aceite de higuera en proporción B10 y de diésel comercial (Premium), las propiedades fisicoquímicas tratadas son: Punto de inflamación, viscosidad cinemática, corrosión a la lámina de cobre, azufre e índice de cetano calculados, dando como resultado que las características del biodiésel B10 se encuentra dentro de las normas internacionales INEN 1489 y normas ASTM y reduce significativamente la emisión de gases contaminantes (Mafla Yépez, 2018).

La presente investigación hace referencia al uso de biocombustibles en porcentajes variados (5% 10% y 20%) y ACPM (Aceite Combustible Para Motores) en un motor diésel, la densidad obtiene una disminución del 0,14% para la mezcla B5%, 0,36% para la B10% y 2,39% para B20%, en comparación con el ACPM, el rendimiento no se alteró con el uso de biodiésel de aceite de higuera, el arranque en frío es igual que con el ACPM, la temperatura del agua se mantiene y la aceleración es similar al diésel, el monóxido de carbono en la mezcla B5% se redujo en 11,47%, en la mezcla B10% la reducción fue de 15,20% y la de B20%, fue hasta de 19,19%, el consumo de combustible se ve afectado por la disminución de calor de temperatura dando como resultado para la mezcla B5% un aumento en 0,65%, mostrando un comportamiento similar al hallado con el ACPM, la mezcla B10% incrementa su consumo en 12,33% y para B20% se incrementó el consumo en 43,75%, resultando que el B20 es inviable por el costo elevado que implica generar la misma potencia (Delgado, 2011).

En esta investigación se realizó la simulación de la inyección en ASPEN a diferentes porcentajes de biodiésel, tomando en cuenta la relación de diésel y biodiésel, mezcla aire combustible, temperatura de los gases de combustión y carga térmica. Los resultados presentan una disminución en el poder calorífico de las mezclas B100, B50, B20, B10, B5 fueron 12,85%, 6,42%, 2,57% y 0,54% respectivamente con respecto al diésel, la variación

porcentual de emisiones de CO₂ obtenida del B5 al B100 va desde 0,7% hasta 13,5% respectivamente (Pérez Sánchez, y otros, 2015).

En esta investigación se aplicó la metodología de simulación para el cálculo del flujo interno de la boquilla del inyector y la evolución de la pulverización en condiciones similares a las del motor diésel. Utiliza una simulación CFD para calcular el flujo de cavitación multifase dentro de la boquilla del inyector, en el segundo paso extrajeron datos transitorios de distribuciones espaciales de velocidad, energía cinética, tasa de disipación, y otras propiedades relevantes a la salida de la boquilla. La investigación se centra en el análisis del proceso de inyección comparando diferentes efectos de los combustibles, resaltando que la forma del agujero afecta la penetración y el ángulo del diésel (Battistoni, Grimaldi, & Mariani, 2012).

Para esta investigación, el objetivo principal es presentar los resultados de velocidad, presión, turbulencia y temperatura de la simulación computacional de dinámica de fluidos de un motor de inyección directa que usa diésel y biodiésel a diferentes proporciones de mezcla, y comparar los resultados con una medición de banco de pruebas. Los resultados indican que, a mayor densidad de los combustibles utilizados en la inyección, la penetración es mayor, pero reduce el poder calorífico y que las principales ventajas del uso de mezcla de biocombustibles en diésel son: el biodiesel no es perjudicial para el medio ambiente, el costo del biodiésel es menor y su producción es eficiente energéticamente, el biodiésel asegura mayor lubricación del motor y es un combustible sostenible. (Moldovanu & Burnete, 2013).

En esta investigación, el objetivo es la utilización del código de cálculo CONVERGE de CFD, el modelado de la geometría se realizó en el programa CAD SolidWorks partiendo de medidas proporcionadas mediante un análisis experimental, la geometría fue importada al código de cálculo CONVERGE donde se llevó a cabo la selección de condiciones iniciales y los parámetros de mallado. El programa brinda resultados que deben ser post-procesados por medio de programas como Excel o Paraview obteniendo gráficas o animaciones que permiten la interpretación, la simulación computacional permite resultados que se ajustan a los resultados experimentales (García López, 2015).

En la presente investigación, se simuló numéricamente el proceso de combustión en una cámara de alta velocidad, las simulaciones han sido realizadas con el software comercial FLUENT y el mallado con el software GAMBIT. Estos programas se emplearon como

herramientas de diseño para investigar el sistema de combustión al emplear dos quemadores, sin sistema de creación de “swirl” uno con inyección axial y otro con inyección radial de combustible. Los modelos utilizados para turbulencia han sido $k-\epsilon$, los resultados numéricos obtenidos muestran que el sistema de inyección radial de combustible puede traer ventajas frente a la inyección axial desde el punto de vista de eficiencia de combustión (Copete, Amell, & Cadavid, 2008).

Finalmente, este artículo presenta una investigación experimental sobre las características de la macro pulverización y el cambio de combustible con diésel y biodiésel, utilizando la técnica de gráficos de sombra bajo varias presiones y contrapresiones. Se configuraron dos cámaras de CCD (Charge Coupled Device o Dispositivo de Carga Acoplada) para capturar las imágenes de macro spray. Usando Matlab se procesó los valores de características de pulverización. Los resultados indicaron que el ancho de pulverización del biodiésel fue mayor que el del diésel en todas las condiciones, además el diésel como el biodiésel presentan cambio de estado durante el avance de la pulverización, la penetración de la punta del rociado del biodiésel fue más prolongada mientras que el ángulo del cono de rociado del biodiesel fue menor que el del diésel. El mayor ángulo del cono de pulverización y el ancho de pulverización del diésel demostraron una mejor calidad de mezcla de aire y combustible que el biodiésel (Shenghao, y otros, 2018).

CAPÍTULO II

2. MÉTODOS Y MATERIALES

2.1. INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se abordan los principales datos de los combustibles que se utilizaron para el desarrollo de la investigación, en este caso el diésel y el biodiésel B10, agregando los datos de la geometría del inyector que se utiliza en la camioneta Mazda BT-50 Common Rail realizada en un programa computacional CAD, además de la preparación del software CFD con los parámetros necesarios para la simulación de la inyección. Por último, la toma de muestras en un banco de pruebas de inyectores para la comparación del método computacional con el método experimental.

Los principales temas por tratar en el capítulo son:

- Recopilación fundamentada del diésel, lo cual permite obtener los datos que son necesarios para la investigación y simulación de la inyección mediante un software computacional.
- Recopilación fundamentada del biodiésel, obtenidos mediante pruebas de laboratorio certificadas para el desarrollo de la investigación.
- Transformación de datos para el ingreso en el programa computacional CFD, a base de los datos obtenidos a través de la recopilación teórica.
- Obtención de la geometría de la tobera del inyector utilizado en los sistemas common rail actuales, para la realización del dibujo dentro de programa computacional CAD.
- Desarrollo de los dibujos dentro del software computacional de la tobera del inyector utilizando los datos obtenidos a través de una investigación científica y fundamentada para el correcto desarrollo de la investigación.
- Preparación del software computacional de simulación para la introducción del dibujo de la tobera del inyector, determinación de los conductos internos de la tobera del inyector, mallado de la superficie del dibujo de trabajo e interacciones realizadas por el programa computacional de simulación.
- Toma de medidas de la inyección usando diésel y biodiésel en el banco de pruebas con la tobera del inyector de la camioneta Mazda BT-50 con la ayuda del simulador de pulsaciones.

2.2. DATOS DEL DIÉSEL

Para la obtención de los datos del combustible fósil diésel, se utilizó las normas INEN de Ecuador, permitiendo obtener los datos que posee el diésel ecuatoriano, la norma utilizada para el combustible fósil diésel es la INEN 1489:2012, el principal objetivo de la norma es dar los rangos de los requisitos que debe poseer el combustible para la comercialización y utilización dentro del país.

La presente normativa explica que para el uso de diésel se lo clasifica en 3 partes:

- Diésel 1: combustible que se utiliza en máquinas de combustión externa tanto industriales como domésticas.
- Diésel 2: Combustibles utilizados en sectores como industriales, pesqueros, eléctricos, navieros, etc. menos para el uso automotriz.
- Diésel Premium: Es el combustible utilizado en el sector automotriz de auto ignición para la propulsión de vehículos a nivel nacional.

Dada esta clasificación de la normativa, la tabla a utilizarse es la del diésel Premium, brindando datos significativos como el punto de inflamación, contenido de agua y sedimentos, temperatura de destilación del 90%, etc.

La tabla 2.1 indica el rango de propiedades fisicoquímicas del diésel circulante dentro del medio ecuatoriano utilizado en el sector automotriz, los datos obtenidos brindan información necesaria para la simulación dentro del software computacional, lo más relevante son los puntos de inflamación, viscosidad y densidad útiles para la simulación, cabe recalcar que los datos obtenidos son de diésel fósil con 0% de biocombustible.

Tabla 2.1 Requisitos Diésel

Requisitos	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de ensayo
Punto de inflamación	°C	51	-	NTE INEN 1493
Contenido de agua	%	-	0,05	NTE INEN 1494
W contenido de cenizas	%	-	0.15	NTE INEN 1491
Temperatura de destilación del 90%	°C	-	360	NTE INEN 926
Viscosidad cinemática a 40°C	mm^2/s	2,0	5,0	NTE INEN 810
W contenido de azufre	%	-	0,05	NTE INEN 1490
Índice de Cetano calculado	-	45	-	NTE INEN 1495
Contenido de biodiésel	%	Nota	5	EN 14078
NOTA. De no contener biodiésel, no es necesario la realización de este ensayo				

Fuente: (INEN I. E., 2012, pág. 2)

La tabla 2.2 indica los valores de densidad que es 0,84 g/cm³ y viscosidad del diésel fósil que es 5 MPa . s con 0% de biocombustible.

Tabla 2.2 Propiedades físicas Diésel

Muestra	Propiedades físicas	
	Densidad g/cm ³	Viscosidad (MPa . s)
Diésel	0,84	5

Fuente: (Melo Espinosa, 2012, pág. 15)

2.3. DATOS BIODIÉSEL

El combustible biodiésel posee norma INEN, la cual brinda información de los rangos de propiedades fisicoquímicas para la circulación en el medio, aportando una idea concisa de las prestaciones que puede brindar este combustible.

La norma que se aplica para los biocombustibles es la norma INEN 2482, se basa en los requisitos del biocombustible necesarios de ésteres metílicos o etílicos destinados para el uso en motores de ciclo Diesel.

La tabla 2.3 indica el rango de valores de las propiedades fisicoquímicas que debe cumplir el biocombustible para la circulación dentro del Ecuador, desarrollando cada requisito con la unidad en el sistema internacional, el rango máximo y mínimo que debe cumplir y como se realizan los ensayos para cada requisito necesario.

Tabla 2.3 Requisitos Biodiésel

REQUISITOS	UNIDAD	MÍNIMO	MÁXIMO	MÉTODOS DE ENSAYO
Densidad a 15°C	kg/m ³	860	900	ASTM D 1298
Punto de Inflamación	°C	120	---	ASTM D 93
Contenido de Agua	mg/kg	---	500	ASTM D 95
Viscosidad Cinemática a 40°C	mm ² /s	3,5	5	ASTM D 445
Contenido de Azufre	mg/kg	---	10	ASTM D 1552
Número de Cetano	-	49	---	ASTM D 613
Temperatura de destilación al 90% recuperado	°C	---	360	ASTM D 1160

Fuente: (INEN I. E., 2013, pág. 2)

En la tabla 2.4 se observa las propiedades fisicoquímicas del combustible a utilizar en la simulación, que es el biodiésel B10 a base de aceite de higuera, obtenidas a través de pruebas de laboratorio realizadas en la Universidad Central del Ecuador, los datos necesarios para el proceso de simulación son la viscosidad y la densidad, los resultados se encuentran en el anexo IV.

Tabla 2.4 Datos del Biodiésel B10

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO
DENSIDAD API A 60°F	°API	PNE/DPEC/P/ASTM D-287	34
PUNTO DE INFLAMACIÓN	°C	PNE/DPEC/P/ASTM D-92	72,1
AGUA POR DESTILACIÓN	%V	ASTM D-95	0,05
CENIZAS	%P	ASTM D-482	0,008
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 40°C	cSt	PNE/DPEC/P/ASTM D-445	4,21
AZUFRE	%P	PNE/DPEC/P/M104 Ref. ASTM D-4294	0,0148
ÍNDICE DE CETANO CALCULADO	-	PNE/DPEC/P/ASTM D-287	51
TEMPERATURA DE DESTILACIÓN AL 90%	°C	ASTM D-86	350,7

Fuente: (Laboratorio Universidad Central del Ecuador, 2017)

2.4. CÁLCULOS PARA LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Dentro del software computacional, la simulación de la inyección de los combustibles utiliza unidades en el sistema internacional, obligando a transformar los datos obtenidos a través de la investigación de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles.

Las ecuaciones utilizadas para la simulación computacional de la inyección son:

- **Caudal**

$$\frac{V}{t}$$

Dónde V representa el volumen y t el tiempo, las unidades en el sistema internacional son: m^3/s

- **Presión**

$$P = \frac{F}{A} \quad (2.2)$$

Dónde F representa la fuerza y A el área de la superficie, las unidades en el sistema internacional son: *Pa*

- **Densidad**

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (2.3)$$

Dónde m representa a la masa y V al volumen, las unidades en el sistema internacional son: kg/m^3 .

- **Viscosidad**

$$\mu = \frac{P \cdot t}{A} \quad (2.4)$$

Dónde P representa la presión, t el tiempo y A el área de la superficie, las unidades en el sistema internacional son: $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$.

- **Flujo másico**

$$\dot{m} = Q \cdot \rho \quad (2.5)$$

Dónde Q representa el caudal y ρ representa la densidad del fluido, las unidades en el sistema internacional son: kg/s

Al ser una simulación comparativa entre dos combustibles, el valor del caudal y presión son iguales en cada combustible, determinando los siguientes valores.

- **Caudal (Q)**

$$Q = \frac{64\text{mm}^3}{\text{ms}}$$

- **Presión**

$$P = 80000000 \text{ Pa}$$

$$P = 800 \text{ Bar}$$

2.4.1. CÁLCULOS DEL DIÉSEL

Los cálculos realizados a los datos de las propiedades físicas del diésel son a base del

requerimiento del software, para cubrir dicho requerimiento se procede de la siguiente manera:

- **Densidad diésel**

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho = 840 \frac{kg}{m^3}$$

- **Viscosidad diésel**

$$\mu = \frac{P \cdot t}{A}$$

$$\mu = 0.005 \frac{kg}{m \cdot s}$$

- **Cálculo del flujo másico del diésel en un milisegundo**

$$\dot{m} = Q \cdot \rho$$

$$\frac{64 \text{ mm}^3}{ms} * \frac{1m^3}{(1000mm)^3} = \frac{6,4 \times 10^{-8} m^3}{ms}$$

$$\frac{6,4 \times 10^{-8} m^3}{ms} * \frac{1000ms}{1s} = 6,4 \times 10^{-5} m^3/s$$

$$\frac{6,4 \times 10^{-5} m^3}{s} * \frac{840kg}{m^3} = 0,05376 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m} = 0,05376 \frac{kg}{s}$$

2.4.2. CÁLCULOS DEL BIODIÉSEL

De la misma manera que los cálculos con el diésel, el biodiésel B10 necesita cumplir con los requerimientos del software computacional para la correcta simulación, entregando los siguientes valores:

- **Densidad biodiésel B10**

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$\rho = 854,16 \frac{kg}{cm^3}$$

- **Viscosidad biodiésel B10**

$$\mu = \frac{P \cdot t}{A}$$

$$\mu = 0,00421 \frac{kg}{m \cdot s}$$

- **Cálculo del flujo másico del biodiésel B10 en un milisegundo**

$$\dot{m} = Q \cdot \rho$$

$$\frac{64 \text{ mm}^3}{ms} * \frac{1m^3}{(1000mm)^3} = \frac{6,4x10^{-8}m^3}{ms}$$

$$\frac{6,4x10^{-8}m^3}{ms} * \frac{1000ms}{1s} = 6,4x10^{-5}m^3/s$$

$$\frac{6,4x10^{-8}m^3}{ms} * \frac{1000ms}{1s} = 6,4x10^{-5}m^3/s$$

$$\frac{6,4x10^{-5}m^3}{s} * \frac{854,16kg}{m^3} = 0,0547 \frac{kg}{s}$$

$$\dot{m} = 0,0547 \frac{kg}{s}$$

2.4.3. ECUACIONES DEL SOFTWARE CFD

Las ecuaciones de que explican la teoría básica de modelación con CFD son las ecuaciones de Navier-Stokes, las cuales son usadas para modelar parámetros del flujo de un fluido como velocidad, temperatura y presión.

Las ecuaciones de Navier-Stokes describen el movimiento de pequeñas regiones y/o volúmenes de fluido. Estas ecuaciones surgen de la aplicación de la segunda ley de Newton para el movimiento de fluidos, juntas con el supuesto de que los esfuerzos del fluido son la suma de un término difuso viscoso (proporcional al gradiente de velocidad), más un término de presión.

La forma general de las ecuaciones de Navier-Stokes en coordenadas cartesianas son:

- **Ecuación de conservación de masa:**

$$\frac{d\rho}{dt} + \frac{d(\rho u)}{dx} + \frac{d(\rho v)}{dy} + \frac{d(\rho w)}{dz} = 0 \quad (2.6)$$

- **Ecuaciones de cantidad de movimiento:**

$$\begin{aligned} M_x \quad \frac{d(\rho u)}{dt} + u \frac{d(\rho u)}{dx} + v \frac{d(\rho u)}{dy} + w \frac{d(\rho u)}{dz} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dx} + \nu \frac{d^2(u)}{dx^2} + \nu \frac{d^2(u)}{dy^2} + \nu \frac{d^2(u)}{dz^2} \\ M_y \quad \frac{d(\rho v)}{dt} + u \frac{d(\rho v)}{dx} + v \frac{d(\rho v)}{dy} + w \frac{d(\rho v)}{dz} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dy} + \nu \frac{d^2(v)}{dx^2} + \nu \frac{d^2(v)}{dy^2} + \nu \frac{d^2(v)}{dz^2} \\ M_z \quad \frac{d(\rho w)}{dt} + u \frac{d(\rho w)}{dx} + v \frac{d(\rho w)}{dy} + w \frac{d(\rho w)}{dz} &= -\frac{1}{\rho} \frac{dp}{dz} + \nu \frac{d^2(w)}{dx^2} + \nu \frac{d^2(w)}{dy^2} + \nu \frac{d^2(w)}{dz^2} \end{aligned} \quad (2.7)$$

Donde: x, y, z son los ejes del sistema coordenado, u, v y w son las componentes radial, tangencial y vertical de la velocidad, ρ es la densidad del fluido, p es la presión absoluta.

Por la gran eficiencia presente en el modelo κ - ε aplicado en flujos circulares, confinados con esfuerzos cortantes de Reynolds significativos, además de la óptima convergencia para su solución, dicho modelo fue seleccionado y aplicado en la simulación de la inyección.

Las ecuaciones con las que trabaja son:

- **Energía cinética (κ)**

$$\frac{d(\rho k)}{dt} + \frac{d(\rho u k)}{dx} + \frac{d(\rho v k)}{dy} + w \frac{d(\rho w k)}{dz} = \frac{d}{dx} \left[\frac{\mu_t dk}{\sigma_k dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[\frac{\mu_t dk}{\sigma_k dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[\frac{\mu_t dk}{\sigma_k dz} \right] + (P - D) \quad (2.8)$$

- **Tasa de disipación (ε)**

$$\frac{d(\rho \varepsilon)}{dt} + \frac{d(\rho u \varepsilon)}{dx} + \frac{d(\rho v \varepsilon)}{dy} + w \frac{d(\rho w \varepsilon)}{dz} = \frac{d}{dx} \left[\frac{\mu_t \varepsilon}{\sigma \varepsilon dx} \right] + \frac{d}{dy} \left[\frac{\mu_t \varepsilon}{\sigma \varepsilon dy} \right] + \frac{d}{dz} \left[\frac{\mu_t \varepsilon}{\sigma \varepsilon dz} \right] + \frac{1}{k} (C_1 P - C_2 D) \quad (2.9)$$

De las ecuaciones anteriores, k es la energía cinética; ε es la tasa de disipación de la energía cinética; T viscosidad local de turbulencia; P y D son términos de producción y destrucción, respectivamente; σ y C son constantes ajustables.

2.5. GEOMETRÍA DE LA TOBERA

Para la obtención de los datos geométricos de la tobera del inyector se buscó el código de pieza del inyector y de la tobera con el fin de recopilar información mediante manuales o medidas exactas dentro de un laboratorio.

El inyector utilizado proviene de la camioneta Mazda BT-50 2.5 CRDI, inyector realizado por Bosch el cual tiene el código: 0445110-250.



Figura 2.1 Código del inyector

En la figura 2.1 se aprecia el código el cuál es utilizado para determinar los parámetros que tiene el inyector, basado en la investigación realizada se determinó que la presión máxima que puede soportar este tipo de inyector es de 1600 bares, datos entregados por soporte técnico de Bosch.

Para determinar el código de pieza de la tobera de este inyector fue necesario desarmar la tobera hasta encontrar el código.



Figura 2.2 Tobera del inyector

La figura 2.2 indica que el código de la tobera es: DLLA 155 P 1493, determinando que la tobera tiene los siguientes datos técnicos:

- Presión máxima: 1600 bar.
- Ángulo longitudinal de patrón de espray: 155°.
- Diámetro agujeros tobera: 0,38 mm.
- Numero de agujeros: 5.
- Posición agujeros: 72° partiendo de posición relativa -8° con respecto a canal de alimentación (Morán Vega & Passo Guamangate, 2016, pág. 105) (BOSCH, 2015).



Figura 2.3 Orificio de la tobera

La figura 2.3 permite observar el orificio de la tobera, que posee un diámetro de 0,38 mm, con un total de 5 orificios que están separados a 72 grados, estos datos permiten conocer la geometría necesaria para realizar el dibujo de la tobera del inyector mediante un software de dibujo, con datos reales y utilizando un vehículo common rail comercial dentro del Ecuador.

2.6. DIBUJO DE LA TOBERA DEL INYECTOR

Para el desarrollo del dibujo de la tobera del inyector dentro del software computacional se realizó el desglose de los componentes principales que intervienen en el proceso de inyección.

Los principales componentes son:

- Cuerpo de la tobera.
- Cámara de presión.

- Aguja de paso de combustible.
- Orificios de la tobera.
- Cilindro del motor.

2.6.1. CUERPO DE LA TOBERA

El cuerpo de la tobera se encuentra en el interior del inyector y es el componente el cual contiene en su interior a la cámara de presión y aguja de paso, con el fin de tenerlos en una posición estática.

El dibujo del cuerpo de la tobera dentro del software computacional de dibujo permite sellar el cilindro para evitar la fuga de presión y combustible al exterior, permitiendo obtener resultados del comportamiento de los combustibles dentro del software computacional de simulación.

El dibujo del cuerpo de la tobera fue desarrollado mediante secciones, posterior se ensambló con la herramienta ensamble del software CAD, obteniendo como resultado alta precisión en la geometría.



Figura 2.4 Cuerpo de la Tobera

La figura 2.4 describe el cuerpo de la tobera, presentando un largo de 37 mm, con un diámetro exterior de 24 mm, en la parte superior tiene un diámetro interior de 18 mm, en donde se encuentra ubicada la parte alta de la cámara de presión, en la parte inferior tiene un diámetro interno de 14 mm.

2.6.2. CÁMARA DE PRESIÓN

La cámara de presión de la tobera es el lugar en donde se concentra el combustible que proviene de la bomba de alta presión de combustible, el diseño realizado por los creadores del inyector permite que la presión se mantenga estable mientras el paso del combustible se encuentre cerrado.

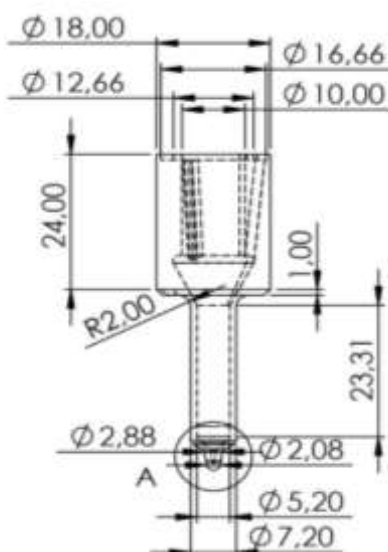


Figura 2.5 Cámara de presión de la tobera

La figura 2.5 determina las medidas exactas de la cámara de presión de la tobera del inyector, dando un largo total de 55,98 mm, un diámetro exterior que se encuentra dentro del cuerpo de la tobera de 18 mm, la entrada del combustible a la cámara de presión es de 1,50 mm, existiendo 3 conductos de entrada de combustible separados a 120° entre cada uno, el diámetro exterior de la punta que se ubica dentro del cilindro del motor tiene un diámetro de 7,20 mm, y un diámetro interior de 5,20 mm, en esta última parte es en donde se encuentra ubicada la aguja de paso del inyector.

2.6.3. AGUJA DE PASO DE COMBUSTIBLE

La aguja de paso de combustible cumple la función de subir o bajar en el interior de la tobera del inyector, con el fin de abrir un orificio el cuál el combustible se abre paso hacia los diferentes orificios de la tobera.



Figura 2.6 Aguja de paso de combustible

La figura 2.6 indica que la aguja de paso de combustible tiene un diámetro de 6 mm, y un largo de 17 mm, el cual es sujetado por el muelle del inyector, existe un punto entre el diámetro superior e inferior el cual tiene un largo de 5,02 mm, que es utilizado para asegurar la unión entre el muelle y la aguja de paso de combustible, el diámetro en la parte inferior de la aguja tiene un diámetro de 5,20 mm, con un largo de 22 mm, que se encuentra en la parte baja de la cámara de presión cerrando el paso de combustible hacia los orificios de la tobera, tiene una punta cónica con un lado de 3,89 mm, cumpliendo con las tolerancias del fabricante.

2.6.4. ORIFICIOS DE LA TOBERA

Los orificios de la tobera fueron desarrollados a base de los datos del fabricante,

determinando el paso de combustible entre la tobera del inyector hacia el cilindro (Morán Vega & Passo Guamangate, 2016, pág. 105).



Figura 2.7 Orificios de la Tobera

La figura 2.7 presenta la distribución de los orificios de la tobera dentro del software computacional de dibujo, los cuales son cilindros de 0,38 mm y con una caída de 8° respecto a una línea horizontal imaginaria, el número de orificios de la tobera es de cinco repartidos equitativamente con una separación de 72° entre cada uno de ellos.

2.6.5. CILINDRO DEL MOTOR

El cilindro del motor se representó a base de la ficha técnica del motor common rail, conociendo los límites dentro del recorrido del combustible, además de que permite determinar las condiciones a las cuales el combustible es inyectado.

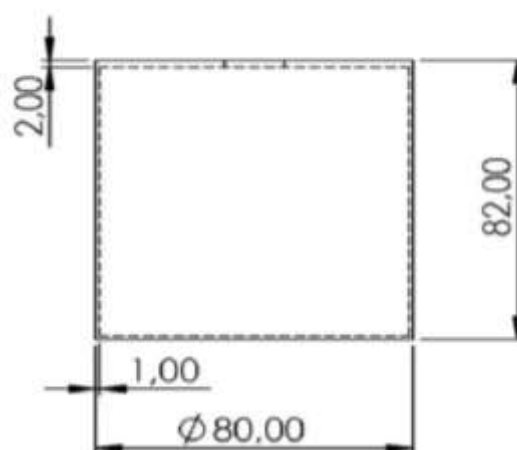


Figura 2.8 Cilindro del motor

La figura 2.8 describe las dimensiones del cilindro del motor, el cual posee 82 mm de alto y un diámetro de 80 mm, además de contener un orificio de 14,95 mm, de diámetro que es utilizado para la ubicación de la tobera.

2.6.6. ENSAMBLE COMPLETO

El ensamble completo de la tobera del inyector permite determinar los límites de flujo, dentro de la cámara de combustión, que poseen el combustible fósil y biodiésel. Para crear un cuerpo sólido se utilizó la herramienta ensamble del software CAD.

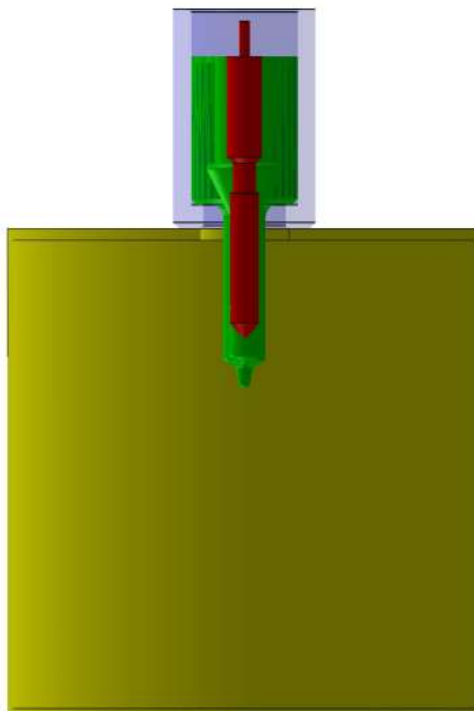


Figura 2.9 Ensamble completo

La figura 2.9 presenta el ensamble completo, el dibujo de color azul es el cuerpo de la tobera del inyector que sostiene los demás componentes, el dibujo de color verde en la parte superior indica los conductos de ingreso de combustible y la cámara de presión anteriormente indicada, el dibujo de color rojo es la aguja de paso del inyector, el dibujo de color amarillo es el cilindro del motor.

Los dibujos azul, verde y rojo forman la tobera del inyector en su totalidad y está lista para la introducción de la geometría al programa de simulación computacional.

2.7. PREPARACIÓN DE LA GEOMETRÍA

La preparación de la geometría se refiere a la determinación de los parámetros del dibujo dentro de la herramienta de simulación CFD, el cual permite dar los límites dentro del área de trabajo en el paso de combustible.

Para la preparación del programa de simulación se dividió en diferentes aspectos los cuales son:

- Introducción de la geometría de la tobera.
- Mallado del área de trabajo.

2.7.1. INTRODUCCIÓN DE LA GEOMETRÍA

Para la introducción de la geometría del modelo CAD se utilizó un programa computacional que determina el flujo de combustible, que permite determinar los volúmenes de trabajo existentes entre el combustible inyectado y las propiedades existentes dentro del cilindro del motor.

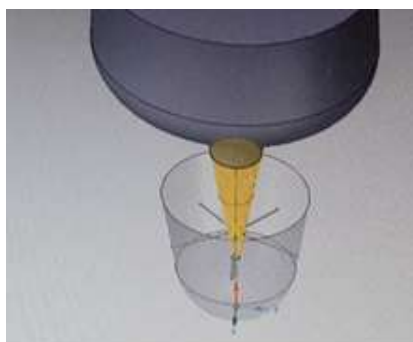


Figura 2.10 Conductos internos de la tobera del inyector

La figura 2.10 indica los conductos internos de la tobera del inyector, determinando por donde circula el combustible en el software CFD. La configuración se la realizó exactamente como sucede en el motor, realizando el ingreso por la parte superior hasta la punta exterior de cada uno de los orificios de la tobera. Esta configuración permite determinar los datos del

volumen 1 o el volumen de los combustibles.

La configuración de la salida es a partir de la punta exterior de cada orificio de las toberas hasta las paredes del cilindro, permitiendo determinar las condiciones del volumen dos, es decir las condiciones existentes dentro del cilindro del motor.

Una vez realizadas las configuraciones, se proyectó la configuración realizada con la opción proyectar, es decir se determinó los puntos de contacto que existen entre los dos volúmenes, para esta simulación no es necesario el sólido simplemente los conductos de paso de combustible, por el hecho de que no se necesita ver la interacción existente entre el material de la tobera y el combustible, si no la interacción entre el volumen 1 y volumen 2.

2.7.2. MALLADO DE LA GEOMETRÍA

El mallado es una técnica de discretización numérica, es decir divide un dominio en elementos y nodos, el número de elementos y nodos dependen de la física de análisis que se quiera llegar, en el caso de la configuración de la geometría se utilizó el método de mallado tetraédrico ya que este tipo de elementos se ajustan de mejor manera a las curvaturas.

El mallado de la geometría se configuró en dos secciones, la primera sección es el refinamiento del área de trabajo en donde se obtiene los resultados de la simulación, la segunda sección es el refinamiento local la cuál es en el área colindante entre los orificios de la tobera del inyector y el cilindro del motor.

- Refinamiento del área de trabajo.

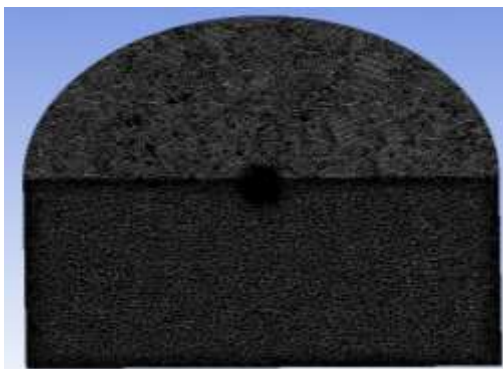


Figura 2.11 Refinamiento de trabajo

La figura 2.11 indica la geometría de área de trabajo mallada por métodos de elementos tetraédricos, el propósito del mallado es obtener los límites geométricos por los cuales el volumen 1, es decir el combustible, y el volumen 2, es decir el aire dentro del cilindro, van a interactuar.

- Refinamiento local.

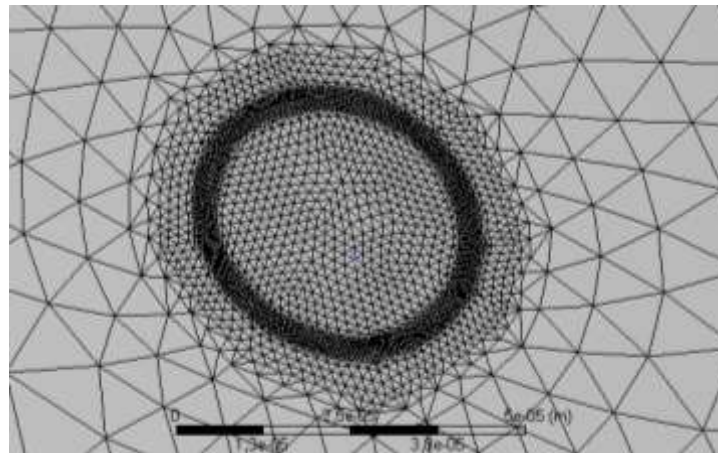


Figura 2.12 Refinamiento Local

La figura 2.12 demuestra el mallado de la sección colindante por donde va a ser el paso del combustible hacia el cilindro, es más fina porque en este lugar es donde los fenómenos de la simulación se van a dar.

Una vez realizado el mallado de la geometría se determinó si los resultados son viables por la calificación skewness otorgada por la herramienta de mallado, que indica que si el valor de la malla está dentro del rango de 0 a 0,25 es excelente (ANSYS, 2019).

Mesh Metric	Skewness
<input type="checkbox"/> Min	6,7366e-009
<input type="checkbox"/> Max	0,98874
<input type="checkbox"/> Average	0,23075
<input type="checkbox"/> Standard Deviation	0,13302

Figura 2.13 Resultado del mallado Skewness

La figura 2.13 determina que el valor del mallado es de 0,23075 evaluado por el método skewnees, entrando al rango de excelente, determinando que los resultados obtenidos dentro de la simulación son viables y confiables.

2.8. ORGANIZACIÓN E INTRODUCCIÓN DE PARÁMETROS

Para detallar la organización e introducción de los parámetros en el software, se separó en dos subtemas: organización dentro del software computacional e introducción de los parámetros en cada punto de la organización.

2.8.1. ORGANIZACIÓN DEL SOFTWARE COMPUTACIONAL

La organización del software permite generar los pasos correspondientes para el ingreso de todos los recursos obtenidos mediante investigación y dibujo CAD realizados anteriormente, para la introducción de datos, desarrollo de las ecuaciones y generación de resultados el programa los organiza por medio de filas y columnas, lo cual permite dividir los procedimientos de cada simulación separados dentro de un mismo documento de simulación.

Al generar filas y columnas separadas para cada combustible, el diésel y el biodiésel B10 en el mismo documento, permite compartir los parámetros de inyección con el fin de encontrar las diferencias existentes dentro de cada uno de los parámetros a analizar.

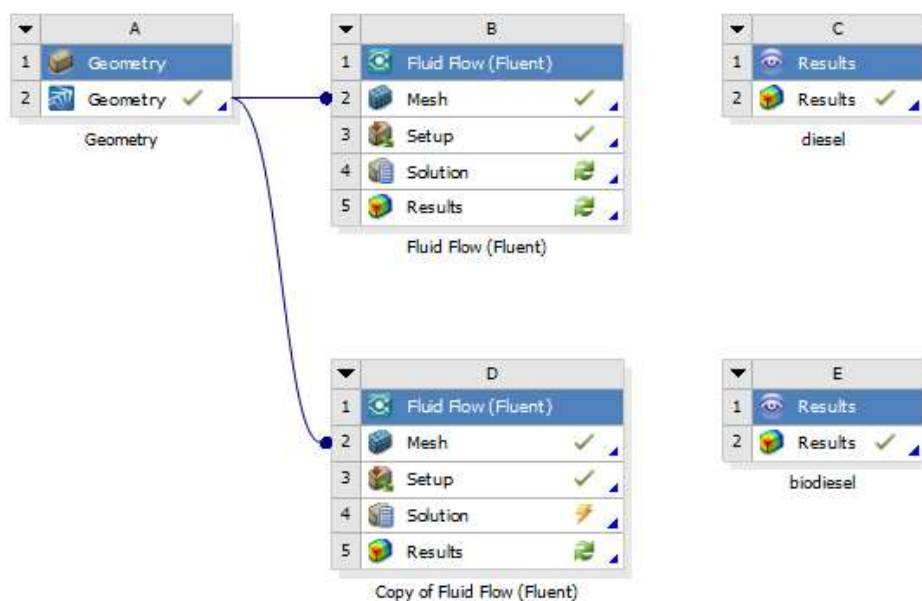


Figura 2.14 Celdas organizativas del software de simulación

La figura 2.14 indica la organización existente dentro del software computacional, separando filas y columnas, las columnas B y C pertenecen a la simulación del diésel como las columnas D y E pertenecen a la simulación del biodiésel.

La columna A contiene el mallado anteriormente descrito, como la geometría de la tobera utilizada para la simulación es la misma, se compartió para los dos procedimientos de simulación, las filas 2 en las columnas B y D contienen la información del mallado, las filas 3 de las columnas B y D contiene la configuración de los parámetros de las condiciones de inyección y los datos fisico-químicos de los combustibles, las filas 4 de las columnas B y D contienen la información de las ecuaciones realizadas dentro del software de simulación, las columnas C y E contienen los resultados de las simulaciones de los combustibles analizados.

2.8.2. INTRODUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE COMBUSTIBLES

El software computacional trabaja mediante la densidad en kg/m^3 y viscosidad en $\text{kg}/\text{m} \cdot \text{s}$, las transformaciones fueron representadas anteriormente.

- Introducción del diésel

Name	diesel	Material Type	fluid
Chemical Formula		Fluent Fluid Materials	diesel
		Mixture	none
Properties			
Density (kg/m3)	constant	Edit...	840
Viscosity (kg/m-s)	constant	Edit...	0.005

Figura 2.15 Propiedades del diésel

La figura 2.15 explica la introducción de la densidad y viscosidad del diésel dentro del programa computacional CFD, el tipo de material es fluido, el nombre es diésel y en la parte de propiedades se introduce $840 \text{ kg}/\text{m}^3$ para la densidad y $0,005 \text{ kg}/\text{m} \cdot \text{s}$ para la viscosidad.

- Introducción del biodiésel

Density (kg/m ³)	constant	Edit...
	854.16	
Viscosity (kg/m·s)	constant	Edit...
	0.00421	

Figura 2.16 Propiedades biodiésel

La figura 2.16 presenta la introducción de las propiedades del biodiésel al software, con una densidad de 854,16 kg/m³ y una viscosidad de 0,00421 kg/m · s, datos obtenidos en el capítulo 2.

2.8.3. INTRODUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE ENTRADA DE LA INYECCIÓN

Los parámetros de inyección de los combustibles es la misma en cada caso por el hecho de que se necesitó las mismas condiciones de inyección para determinar las diferencias entre los comportamientos obtenidos.

- Introducción de los datos de inyección del diésel

Reference Frame	Absolute	
Mass Flow Specification Method	Mass Flow Rate	
Mass Flow Rate (kg/s)	0.05376	constant
Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal)	8e+07	constant
Direction Specification Method	Normal to Boundary	
Turbulence		
Specification Method	Intensity and Viscosity Ratio	
	Turbulent Intensity (%)	5 [P]
	Turbulent Viscosity Ratio	10 [P]

Figura 2.17 Parámetros inyección diésel

La figura 2.17 determina los parámetros que tiene el diésel para la inyección, presenta un flujo másico de 0,05376 kg/s a una presión de 800 bares, la intensidad de turbulencia es 5% y la relación de viscosidad es 10.

- Introducción de los datos de inyección del biodiésel

The screenshot shows the following parameters for biodiesel injection:

- Reference Frame: Absolute
- Mass Flow Specification Method: Mass Flow Rate
- Mass Flow Rate (kg/s): 0.0547, constant
- Supersonic/Initial Gauge Pressure (pascal): 8e+07, constant
- Direction Specification Method: Normal to Boundary
- Turbulence Specification Method: Intensity and Viscosity Ratio
- Turbulent Intensity (%): 5
- Turbulent Viscosity Ratio: 10

Figura 2.18 Parámetros inyección biodiésel B10

La figura 2.18 indica los parámetros que tiene el biodiésel para la inyección, presenta un flujo másico de 0,0547 kg/s a una presión de 800 bares.

2.8.4. INTRODUCCIÓN DE LOS PARÁMETROS DE LAS CONDICIONES DEL CILINDRO

La condiciones del cilindro utilizados son las condiciones ambientales, son las condiciones existentes dentro de los límites de recorrido que tiene el combustible dentro de la simulación.

The screenshot shows the following parameters for cylinder backflow:

- Backflow Reference Frame: Absolute
- Gauge Pressure (pascal): 101325, constant
- Pressure Profile Multiplier: 1
- Backflow Direction Specification Method: Direction Vector
- Coordinate System: Cartesian (X, Y, Z)
- X-Component of Flow Direction: 1, constant
- Y-Component of Flow Direction: 0, constant
- Z-Component of Flow Direction: 0, constant

Figura 2.19 Parámetros Cilindro

La figura 2.19 presenta los parámetros del cilindro, la presión es de 101325 Pa es decir la presión ambiental, se utiliza la presión ambiental determinando que la simulación de la inyección está dirigida al comportamiento del combustible sin los datos de la presión del aire dentro del cilindro.

La simulación fue realizada en condiciones ambientales porque el proceso de inyección buscado es el mismo que en el banco de pruebas para realizar una comparativa de los combustibles diésel y biodiésel B10, la presión ambiental permite determinar los ángulos de

esparción, velocidad, presión y número de reynolds en base a la viscosidad y densidad.

2.9. SELECCIÓN DE LAS ECUACIONES, NÚMERO DE INTERACCIONES Y CURVAS RESULTANTES

Esta sección explica la selección de las ecuaciones dentro del programa computacional determinando cuál es el mejor procedimiento para la simulación con volúmenes finitos y fluidos en estado líquido.

Una vez determinado el bloque de ecuaciones, se realiza las interacciones, determinando cuántas veces se realizan las ecuaciones seleccionadas hasta llegar una convergencia entre cada una de las líneas resultantes, la convergencia obtenida demuestra la viabilidad de los resultados obtenidos al finalizar la simulación.

2.9.1. SELECCIÓN DE ECUACIONES MATEMÁTICAS

El software computacional de simulación permite escoger entre varias alternativas de ecuaciones, la selección es la de k-epsilon, método matemático que permite el estudio de volúmenes.

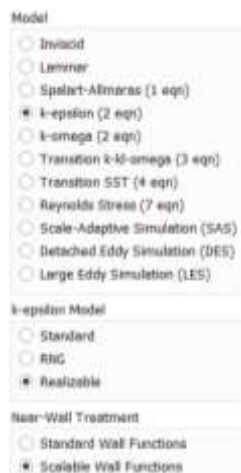


Figura 2.20 Ecuaciones del software

La figura 2.20 indica las ecuaciones utilizadas en el programa computacional de simulación CFD, las cuales son un modelo matemático de k-epsilon que son dos ecuaciones, el modelo de k-epsilon debe ser realizable y los tratamientos de las paredes se escoge funciones de paredes escalables, todo esto con el fin de determinar las ecuaciones que utiliza el software para la simulación.

2.9.2. NÚMERO DE INTERACCIONES Y CURVAS RESULTANTES

Para determinar que los resultados obtenidos al finalizar la simulación sean fiables, se necesita obtener una convergencia en las líneas resultantes de cada una de las ecuaciones que utiliza el software de simulación.

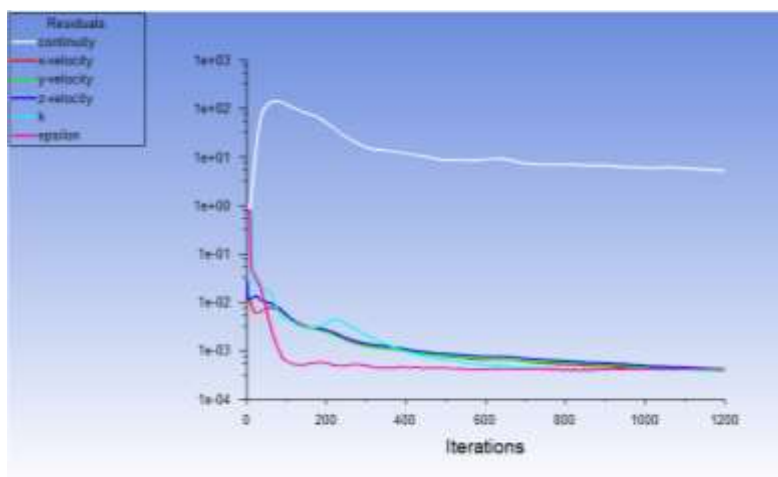


Figura 2.21 Número de Interacciones y Líneas Resultantes

En la figura 2.21 se presenta la generación de las líneas de cada operación matemática realizada dentro del programa computacional CFD, generando una convergencia a las 1200 interacciones, determinando que los resultados están listos para ser analizados.

2.10. TOMA DE MEDICIONES EN BANCO DE PRUEBAS

Para complementar los resultados de la simulación se realizó el estudio de manera física en

un banco de pruebas utilizando los combustibles de estudio que son el diésel fósil y el biodiésel B10, para ello se utilizó la tobera del inyector de la camioneta Mazda BT-50 CRDI, complementando de igual manera el simulador de pulsaciones que permite que la aguja de paso de la tobera del inyector se abra cada periodo de tiempo.

Para la toma de las muestras se utilizó un molde cuadrículado de 5mm por lado con el fin de tener medidas de referencia, para el análisis de la dispersión de diésel fósil y el biodiésel.



Figura 2.22 Banco de pruebas y simulador de pulsaciones

La figura 2.22 indica el banco de pruebas, el inyector de la Mazda BT-50 CRDI y el simulador de pulsaciones CRI 200, para la toma de muestras se colocó un molde cuadrículado a 8,5 cm desde la tobera del inyector en una base fija para que la distancia sea la misma al momento de realizar las inyecciones con los combustibles a estudiar.

Para la medición de la apertura del spray generado en cada inyección se utilizó un software CAD para determinar con detalle como cada combustible moja la hoja justo después de la inyección.

Para obtener imágenes del chorro se utilizó una cámara que graba 960 cuadros por segundo, buscando el momento exacto en el cual el chorro de combustible moja el molde, antes de que comience a dispersarse.

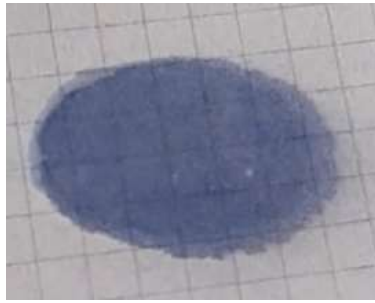


Figura 2.23 Banco de pruebas y simulador de pulsaciones

La figura 2.23 indica la dispersión del combustible en el molde respecto al paso de tiempo, el contorno de la muestra posee un color con menor intensidad, indicando que esa zona no fue mojada con el chorro de los combustibles en el banco de pruebas.

CAPÍTULO III

3. ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1. INTRODUCCIÓN

Este capítulo aborda los resultados del programa de simulación computacional, que permite determinar la inyección de los combustibles diésel y biodiésel B10, analiza y compara los datos obtenidos de velocidad, presión, número de Reynolds y ángulos de dispersión, además de comparar el método computacional con el método experimental realizado.

Los principales temas por tratar son:

- Descripción y comparación de cada uno de los resultados obtenidos mediante la simulación computacional de los combustibles diésel y biodiésel B10.
- Análisis de los resultados obtenidos utilizando el banco de pruebas, realizados con el inyector de la camioneta Mazda BT-50 y el simulador de pulsos de inyección.

3.2. DESCRIPCIÓN Y ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN COMPUTACIONAL

Los resultados obtenidos mediante la simulación permiten determinar el comportamiento de una partícula de diésel y otra de biodiésel para su comparación al igual.

Para determinar los resultados en el software CFD se utiliza la herramienta llamada streamline, la cual permite conocer el desplazamiento axial de una partícula en el proceso de inyección, la herramienta se utiliza en los resultados de las dos simulaciones para determinar las diferencias existentes entre el número de Reynolds, velocidad y presión.

Al tener el desplazamiento de la molécula el siguiente paso es realizarlo en tablas con la herramienta chart count, el cual genera la tabla con los resultados en cada una de las simulaciones y así analizar los puntos de interés que existen entre los dos combustibles y su comportamiento.

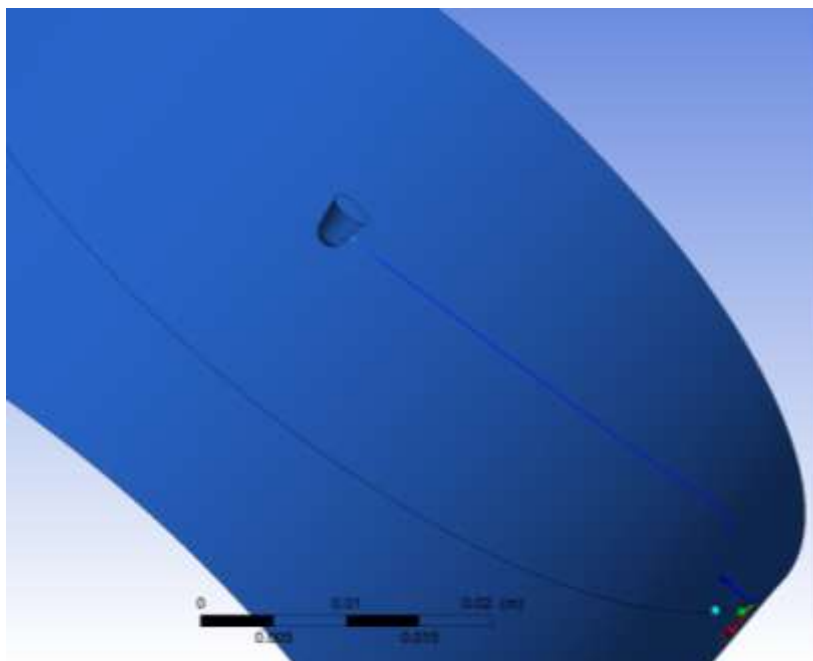


Figura 3.1 Uso de streamline

La figura 3.1 indica como es el desplazamiento de una partícula dentro del cilindro en el proceso de inyección, la trayectoria está definida por la línea azul que demuestra por donde pasa la partícula de los combustibles, este procedimiento se realiza en las dos simulaciones, buscando determinar las variaciones que existen entre los dos combustibles.

3.2.1. ÁNGULOS DE DISPERSIÓN

Se suele definir como el ángulo que forman dos rectas que se ajustan al contorno del chorro, y que se cruzan en el orificio del inyector, como la penetración, depende de la geometría del inyector y de las condiciones de inyección, así como de las propiedades del combustible y de las condiciones ambientales donde se inyecta (García, 2008, págs. 46-47).

Los ángulos de expansión varían dependiendo de la densidad del combustible, al determinar que el biodiésel B10 es más denso que el diésel, se forma un ángulo de expansión diferente que al del diésel fósil.

- **Ángulo de dispersión del Diésel**

Para determinar el ángulo de expansión del diésel se crea puntos de referencia basados a una línea horizontal imaginaria dibujada desde el medio del orificio de la tobera del inyector

hasta la pared del cilindro, para la determinación de la expansión del chorro se realiza una línea desde un extremo de la tobera del inyector hasta un punto en el cual el combustible llega a un punto medio de su velocidad.

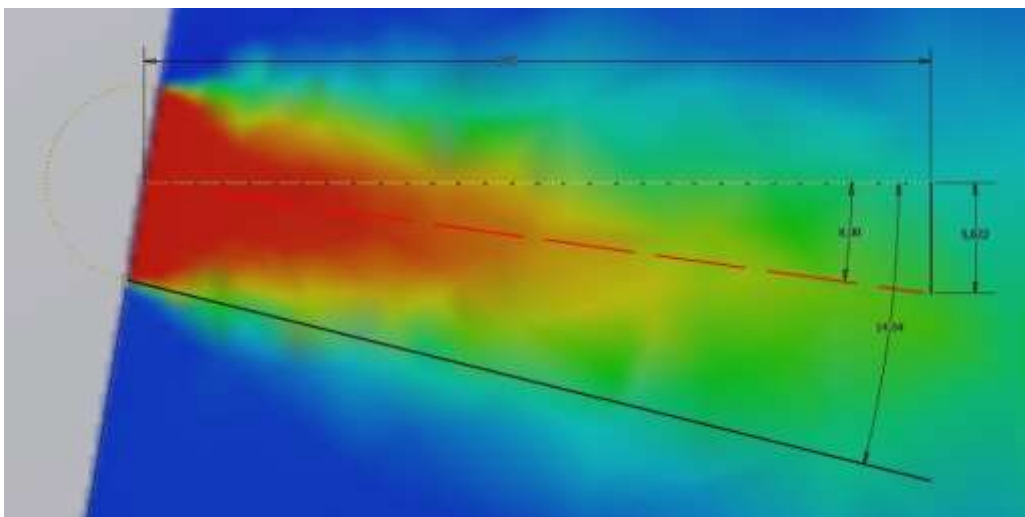


Figura 3.2 Ángulo de dispersión del diésel

La figura 3.2 indica el ángulo que existe en el chorro provocado con el combustible diésel a una presión de 800 bares de inyección, determinando que tiene una medida de $14,04^\circ$ grados con respecto a la línea imaginaria horizontal ubicada en el centro del orificio de la tobera del inyector.

- **Ángulo de dispersión del Biodiésel B10**

De la misma manera, que se analizó los resultados del diésel fósil, se determina los ángulos de dispersión del biodiésel B10.

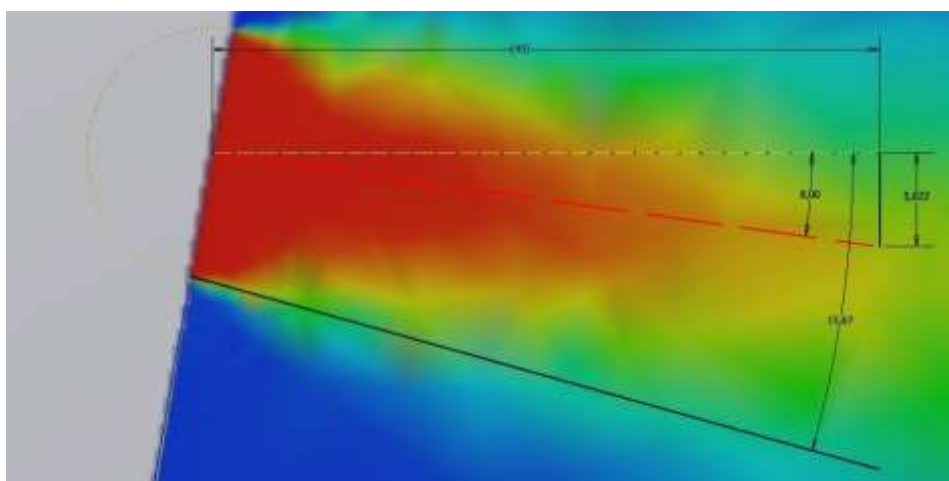


Figura 3.3 Ángulo de dispersión del biodiésel B10

La figura 3.3 indica el ángulo de dispersión que existe en el chorro provocado con el combustible biodiésel B10 a una presión de 800 bares de inyección, determinando que tiene una medida de $15,67^\circ$ grados con respecto a la línea imaginaria horizontal ubicada en el centro del orificio de la tobera del inyector.

- **Análisis de los resultados**

Por la variación de las densidades existentes en los combustibles estudiados se determina que los ángulos de dispersión se diferencian de tal manera que el biodiésel B10 obtiene un ángulo de apertura de $15,67^\circ$ y el diésel un $14,04^\circ$ por lo tanto el combustible B10 llega a ocupar un mayor volumen dentro del cilindro, permitiendo que tenga un cambio de estado en menor tiempo.

Según (Zapata, 2010, pág. 22) un mayor ángulo de dispersión del combustible inyectado permite que englobe una mayor cantidad de aire presente dentro del cilindro lo cual es un factor clave para la evaporación del combustible y la constitución de la mezcla a combustionar.

3.2.2. NÚMERO DE REYNOLDS (RE)

Para el análisis del número de Reynolds (Re) se determina la diferencia entre movimiento laminar y movimiento turbulento. Movimiento laminar se refiere a que el desplazamiento de las partículas del fluido se mueve de manera ordenada, siguiendo una misma trayectoria una tras otra y movimiento turbulento se refiere a que las partículas se desplazan sin un orden, es decir, que no tienen dirección ni sentido iguales.

Para Re por debajo de los 2 300 el régimen será laminar, por encima de los 2 300 hasta un Re de 4 000 se encuentra una zona de transición en donde el flujo fluctúa entre régimen laminar y turbulento alternativamente, a partir de Re 4 000 se puede considerar el régimen totalmente turbulento (García, 2008, págs. 19-20).

La simulación entregó resultados gráficos de cada combustible, permitiendo determinar los valores que obtienen conforme se alejan de la tobera del inyector hacia las paredes del cilindro.

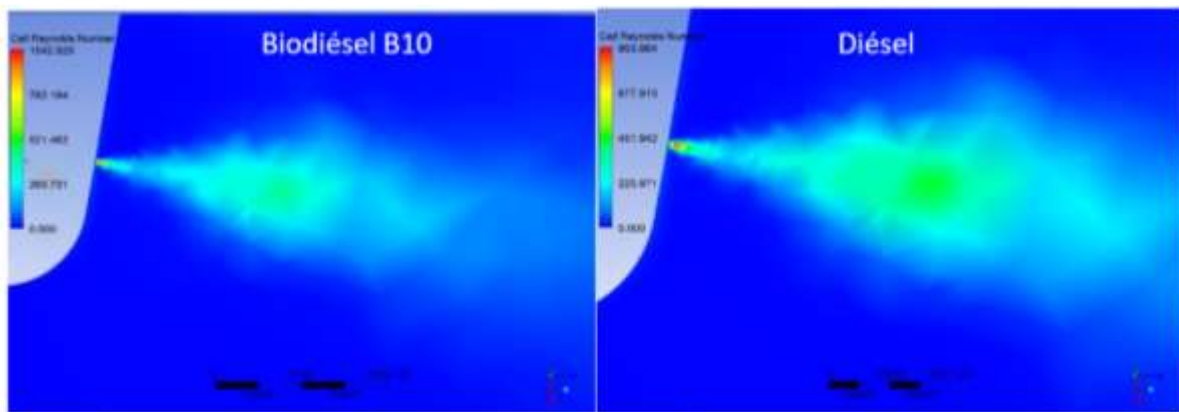


Figura 3.4 Resultados número de Reynolds

La figura 3.4 indica los resultados del número de Reynolds del biodiésel B10 y el diésel fósil, dando como resultado que el biodiésel B10 obtiene valores constantes durante el recorrido hacia las paredes del cilindro.

Por medio del resultado obtenido, se determina que el biodiésel B10 es un combustible más estable en el cambio de estado, al tener valores constantes mientras llega a las paredes del cilindro del motor, la reducción de valores que obtiene el biodiésel B10 significa que el cambio de estado fue en menor tiempo y que la mezcla se forma de manera óptima.

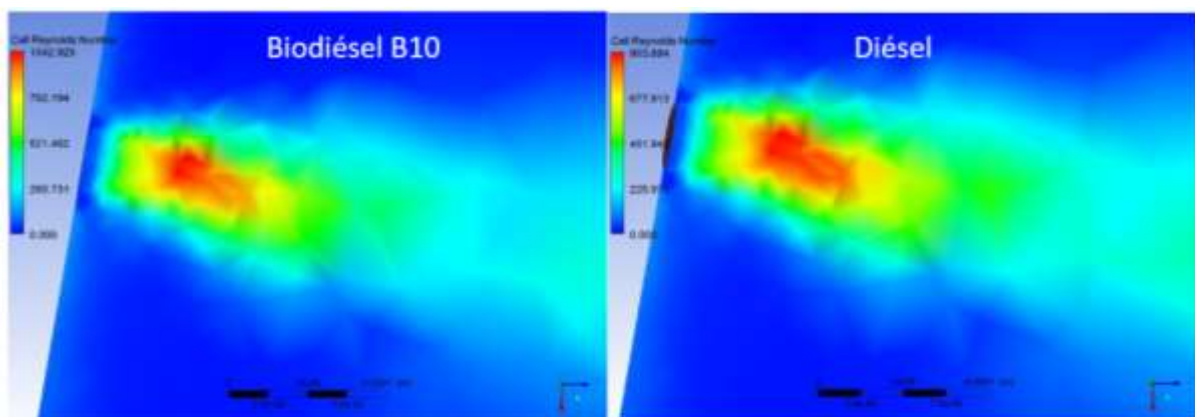


Figura 3.5 Resultados número de Reynolds

La figura 3.5 indica los resultados cerca del orificio de la tobera, lugar en dónde se encuentra visible el cambio de estado de los combustibles de líquido a gaseoso antes de formar la mezcla aire-combustible.

Se aprecia que el biodiésel reduce los valores del número de Reynolds mientras se aleja del orificio de la tobera del inyector, a comparación del diésel que el movimiento turbulento permanece por mayor distancia, dando como resultado que el biodiésel B10 cambia de estado en menor tiempo y distancia.

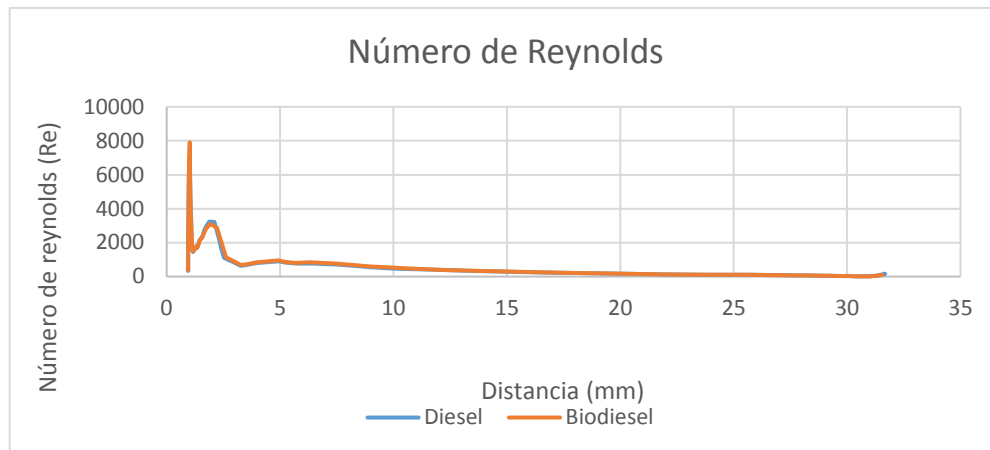


Figura 3.6 Resultados del Re total

La figura 3.6 indica los resultados obtenidos del número de Reynolds mostrando la línea color azul los resultados del diésel y la línea naranja los resultados del biodiesel B10 en el eje “X” se determina la distancia existente entre el centro de la tobera del inyector hasta la pared del cilindro, en el eje “Y” se encuentran los resultados del número de Reynolds obtenidos de la simulación computacional.

El resultado total del número de Reynolds permite identificar la distancia en la cual los combustibles tienen diferentes comportamientos para el análisis. la sección de interés entre los dos combustibles se encuentra entre los 0,9 mm y los 2,9 mm desde el centro de la tobera del inyector.

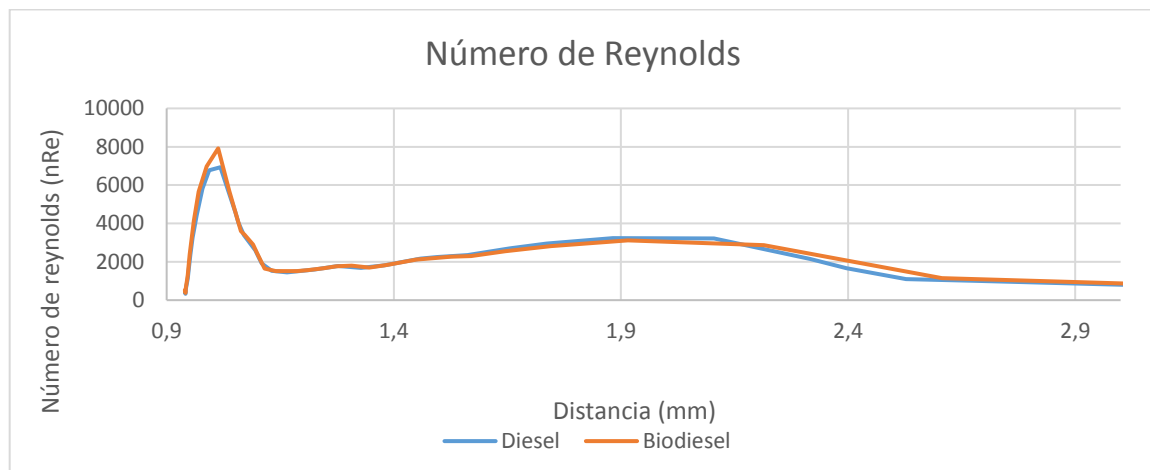


Figura 3.7 Resultados del Re (0,9mm. a 2,9mm.)

En la figura 3.7 se determina los resultados de los combustibles a una distancia entre 0,9 mm, y 2,9 mm, del orificio de la tobera del inyector, la línea de color naranja representa los resultados del biodiésel B10 y la línea de color azul indica los resultados del diésel fósil, demostrando que el biodiésel entra en un proceso de movimiento turbulento a una menor distancia que el diésel fósil, además de que llega a alcanzar un número de Reynolds de 8 000 aproximadamente a 1 mm, del orificio de la tobera del inyector a comparación del diésel que obtiene un valor de 7 000 Re aproximadamente a 1 mm, del orificio de la tobera del inyector. A partir de 1,2 mm, hasta 2,4 mm, de la tobera del inyector el comportamiento de los dos combustibles estudiados entra a un proceso entre movimiento linear y turbulento. De 2,4 mm desde el orificio de la tobera del inyector hasta los 35 mm el movimiento es linear.

Al analizar los resultados se determina que existe un cambio de estado de los combustibles, es decir, pasan de un estado líquido a gaseoso cuando superan el valor de 4 000 Re, consecuentemente el biodiésel B10 llega a ese cambio de estado a una distancia menor que la del diésel fósil, aproximadamente con una diferencia de 0,1 mm, esto se debe por la diferencia que existe entre la viscosidad de los dos combustibles.

La caída de los resultados del número de Reynolds se debe a que el combustible se encuentra en un estado gaseoso realizando que el movimiento tienda a estar en una fase de movimiento entre laminar y turbulento, el movimiento tiende a volver a ser laminar por el hecho de que el cambio de estado ya ocurrió y las partículas vuelven a tener una dirección y sentido parecido entre sí.

Según (Zapata, 2010, pág. 24) la evaporación del combustible permite la mezcla aire-combustible, generando las condiciones adecuadas para la liberación de energía del combustible, con lo que se obtiene como resultado que el biodiésel B10 permite la formación de la mezcla de manera óptima con el fin de obtener una mejor combustión de la mezcla y aumentar su eficiencia.

3.2.3. VELOCIDAD

La velocidad en el análisis de los combustibles permite determinar la facilidad de que un combustible sufre el proceso de pulverización al igual que permite determinar qué tan lejos llega la partícula.

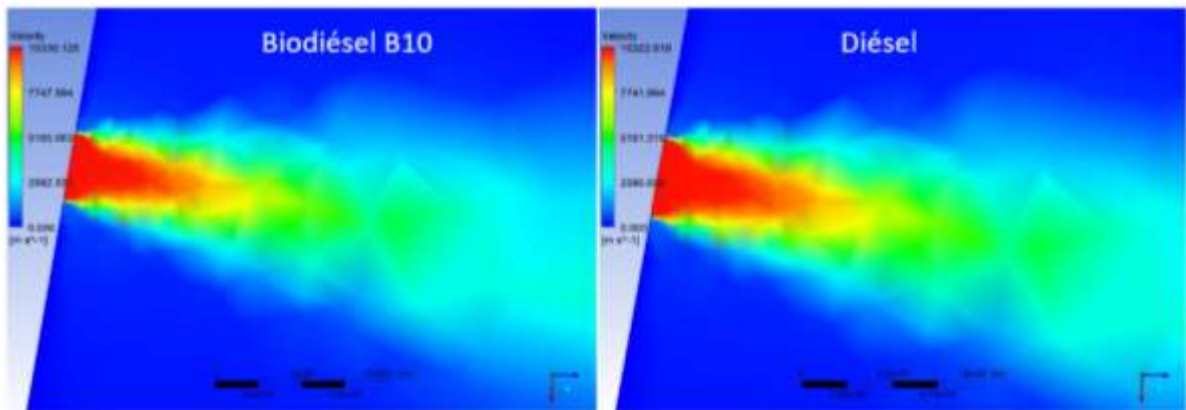


Figura 3.8 Resultados Velocidad

La figura 3.8 representa la velocidad del biodiésel B10 y el diésel fósil a la salida de la tobera del inyector, representando la variación de la velocidad por medio de colores dónde el color rojo representa el valor máximo y el azul representa el valor mínimo.

El análisis por medio de imágenes demuestra valores similares para el biodiésel B10 y el diésel fósil, con la diferencia de que el biodiésel es 8 m/s superior en el valor máximo alcanzado que el diésel fósil, el resultado obtenido es que el biocombustible B10 posee valores más altos en el recorrido hasta las paredes del cilindro del motor, cubriendo mayor volumen para la formación de la mezcla aire combustible y en menor tiempo.

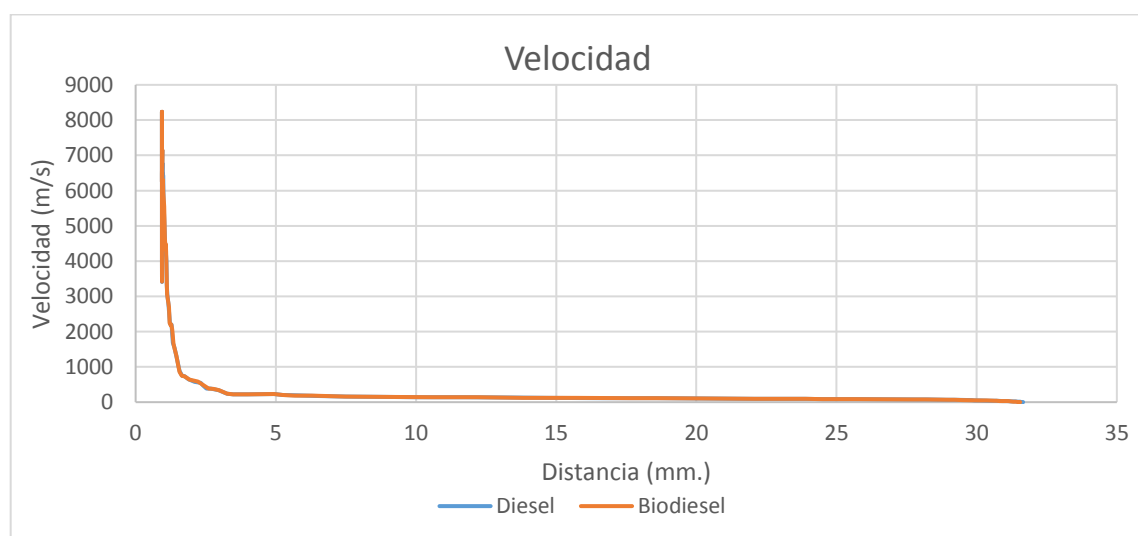


Figura 3.9 Resultados Velocidad total

La figura 3.9 indica los resultados de la velocidad, la línea azul representa la velocidad del diésel y la línea naranja representa la velocidad del biodiésel B10, demostrando que tiene un comportamiento similar por las viscosidades que se diferencian de una manera mínima.

Con la figura 3.9 se determina que la mayor velocidad alcanzada por los combustibles se encuentra dentro de los parámetros de 0,9 mm y 1,5 mm aproximadamente, tomándolos como puntos de referencia para un análisis más profundo del comportamiento de los combustibles estudiados.

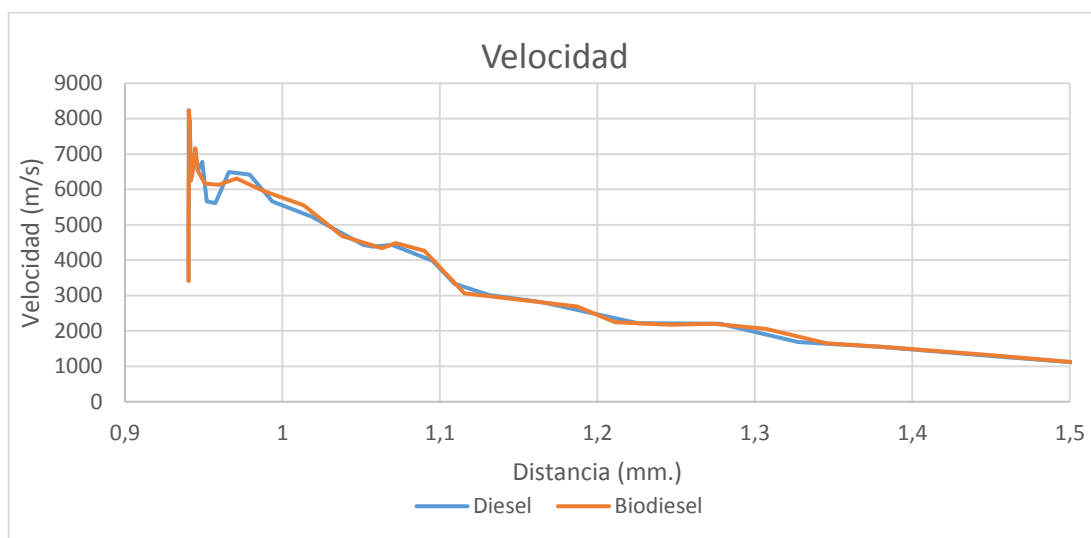


Figura 3.10 Resultados Velocidad (0.9mm. a 1.5mm.)

La figura 3.10 indica la variación de las velocidades existentes dentro de los límites de 0,9 mm. a 1,5 mm desde el orificio de la tobera del inyector, la línea azul corresponde a los resultados del diésel fósil y la línea naranja a los resultados del biodiésel B10.

Determina que los dos combustibles superan una velocidad mayor a 8 000 m/s en los puntos entre 0.9mm y 1mm desde el orificio de la tobera del inyector, el valor máximo alcanzado por el biodiésel B10 es de 8 236,35156 m/s, y el del diésel fósil es de 8 233,70215 m/s, concluyendo que las velocidades máximas relativamente no se diferencian considerablemente.

El biodiésel obtiene una velocidad más constante y el diésel obtiene picos muy abruptos, es decir con esto se determina que el biodiésel es un combustible más estable que el diésel por su diferente viscosidad.

Al obtener velocidades superiores, la dispersión del combustible dentro de la cámara de

combustión llega en menor tiempo a las paredes del cilindro y por su ángulo de esparción las moléculas del combustible ocupan mayor volumen.

Según (Zapata, 2010, pág. 178) al momento de que un fluido mantiene la velocidad constante, la atomización y la preparación de la mezcla se la realiza de una manera óptima contribuyendo al proceso de combustión, es decir, el biodiésel al ser más estable en sus resultados conlleva a una mejor preparación de la mezcla.

3.2.4. PRESIÓN

Según (Viera, 2013, pág. 11) la presión en los combustibles permite que el chorro englobe una mayor cantidad de aire debido a las turbulencias que se producen, por lo tanto, a mayor presión en los combustibles el tiempo de evaporación es menor.

Según (Viera, 2013, pág. 19) la presión de inyección es directamente proporcional a la penetración del combustible a la cámara de combustión, es decir, mayor presión de inyección logra una mayor penetración, esto se debe a que una mayor presión de inyección se refleja en que el chorro posee mayor energía cinética al salir por el orificio, por lo tanto es capaz de recorrer una mayor distancia a medida que transfiere su energía al aire que lo ha englobado.

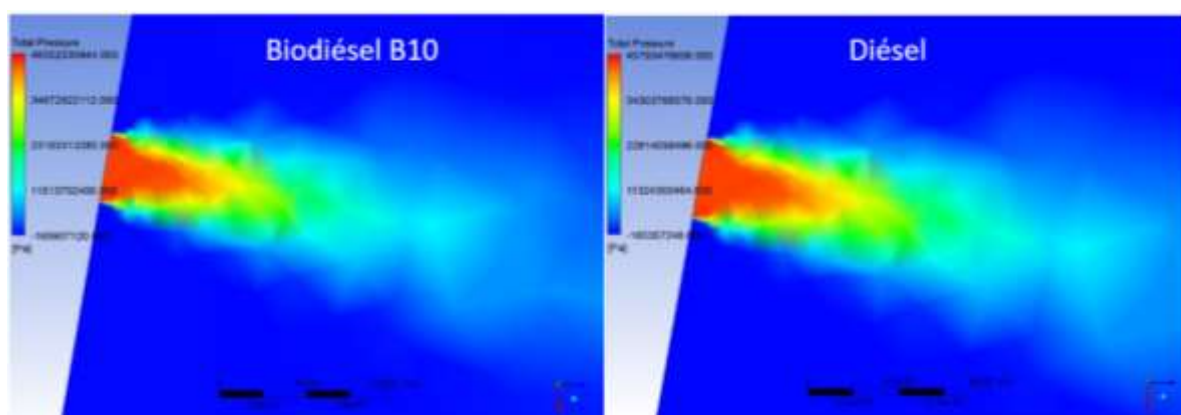


Figura 3.11 Resultados de Presión

La figura 3.11 representa los resultados gráficos de la presión aplicada en los combustibles al momento de la inyección, la presión alcanzada por el biocombustible B10 al salir de la

tobera del inyector supera a la presión del diésel fósil, permitiendo almacenar mayor energía cinética y cubriendo mayor volumen del cilindro, al continuar con el recorrido hacia las paredes del inyector el biodiésel B10 tiene una caída de presión más notoria que el diésel fósil indicando que la entrega de energía hacia el aire encontrado dentro del cilindro del motor se produce en menor distancia y tiempo.

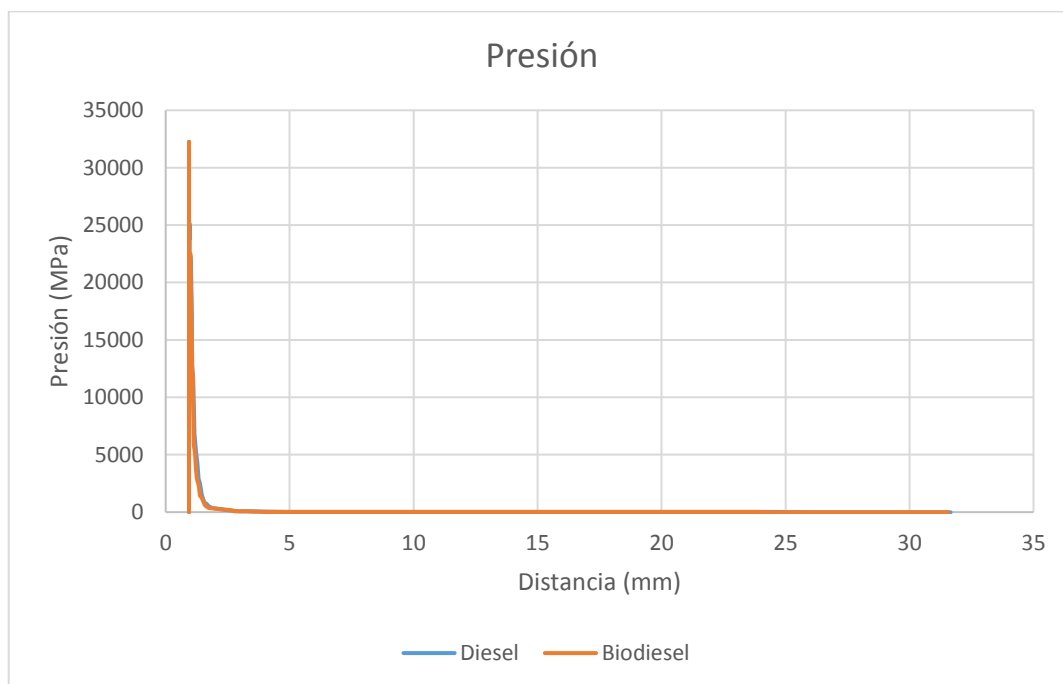


Figura 3.12 Resultados presión total

La figura 3.12 indica los resultados de presión obtenidos de la simulación computacional, la línea naranja representa los datos resultantes del biodiésel y la línea azul representa los datos resultantes del diésel fósil.

La figura 3.12 demuestra que los puntos de interés de estudio van desde los 0,9 mm y 1,5 mm ya que es el área de mayor presión en los dos combustibles.

El valor máximo del diésel es de 31 718,75 MPa, y el valor máximo del biodiésel B10 es de 32 248,07 MPa, dando como conclusión que el biodiésel alcanza presiones más altas en el proceso de inyección, pero para determinar un resultado más apropiado se necesita analizar los resultados dentro de los puntos de interés.

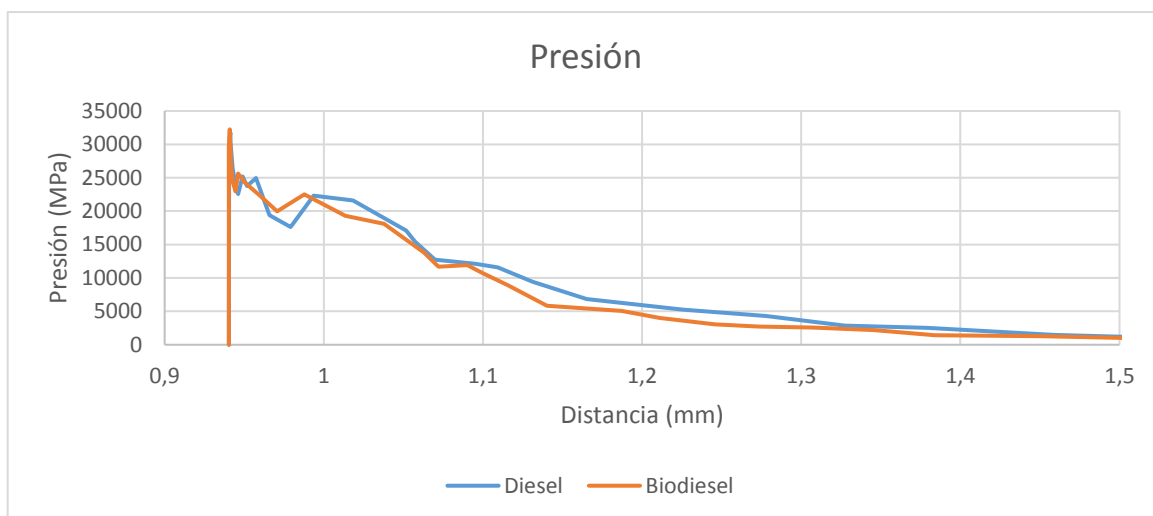


Figura 3.13 Resultados presión (0,9 mm a 1,5 mm)

La figura 3.13 indica los resultados que tiene cada combustible en los límites de 0,9 mm, y 1,5 mm desde el centro del inyector, la línea de color azul representa los datos del diésel fósil y la línea naranja representa los resultados del biodiésel B10.

Entre los puntos 0,9 mm y 1 mm la presión del biocombustible es más estable y en una relación media los valores son superiores que los del diésel, pero a partir de 1 mm desde el centro del inyector la presión del combustible diésel supera a la del biodiésel B10, determinando que en la primera parte el biocombustible realiza una evaporación más rápida, realizando una mezcla de aire-combustible más pronta, la caída de los datos se los puede interpretar como el cambio de energía del combustible al aire, demostrando que el biodiésel realiza la mezcla de manera más eficiente que el diésel; el biodiésel posee presiones superiores a las del diésel se determina que el alcance del chorro es superior, es decir, abarca mayor espacio de la cámara de combustión, el traspaso de energía es superior que la del diésel fósil.

3.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS EN BANCO DE PRUEBAS

Para el análisis de las medidas obtenidas en el banco de prueba se realiza una medida media para cada combustible estudiado, obteniendo así una tabla de valores con el ancho y el largo del spray generado, con el fin de obtener una comparativa.

3.3.1. BIODIÉSEL B10

La toma de muestras se realizó en cuatro moldes ubicados en una base fija, con la cámara se analiza el video buscando obtener el momento exacto en el cual el combustible moja al molde, se repite 4 veces para sacar medidas promedio de largo y ancho.

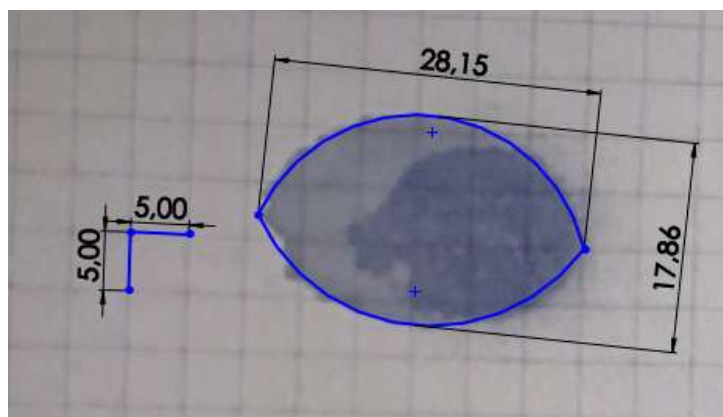


Figura 3.14 Muestra 1 del biodiésel B10

La figura 3.14 indica las mediciones realizadas en la prueba 1 del biodiésel B10, determinando que mide 28,15 mm de largo y 17,86 mm de ancho, en el lado izquierdo de la figura muestra las medidas de cada cuadrícula que es de 5 mm por lado.

La Tabla 3.1 indica los resultados de las 4 muestras obtenidas mediante el banco de pruebas, determinando el ancho y largo de cada una. El resultado promedio en el largo de las muestras obtenidas es de 28,71 mm y el de el ancho de las muestras obtenidas es de 18,08 mm.

Tabla 3.1 Resultados del biodiésel B10 en el banco de pruebas.

Número de Muestra	Largo (mm)	Ancho (mm)
1	28,15	17,86
2	27,37	16,86
3	30,26	18,63
4	29,06	18,98
Promedio	28,71	18,0825

3.3.2. DIÉSEL FÓSIL

El procedimiento realizado con las muestras del diésel fósil son las mismas que las del biodiésel B10, teniendo en cuenta que se ocuparon las mismas condiciones para la obtención de las muestras.

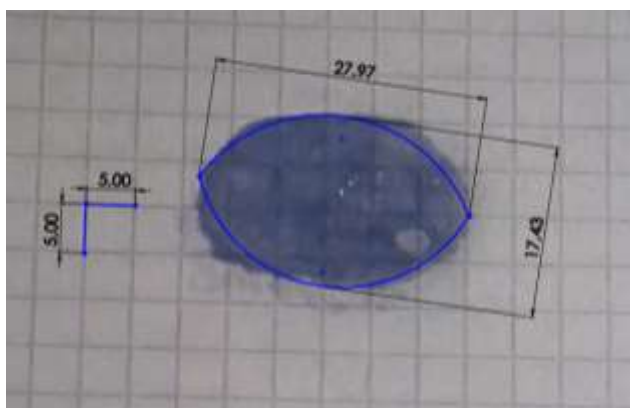


Figura 3.14 Muestra 1 del Diésel Fósil

La figura 3.14 representa la muestra número 1 del spray generado en el banco de pruebas utilizando diésel fósil, dando como resultados una medida de 27,97 mm de largo y 17,43 mm de ancho.

La tabla 3.2 representa los resultados de cada muestra obtenida en el banco de pruebas y el promedio de las medidas del largo y el ancho de cada muestra. El resultado promedio en el largo de las muestras obtenidas es de 27,87 mm y el de el ancho de las muestras obtenidas es de 17,46 mm.

Tabla 3.2 Resultados del diésel fósil en el banco de pruebas

Número de Muestra	Largo (mm)	Ancho (mm)
1	24,14	15,08
2	30,42	19,51
3	27,97	17,43
4	28,96	17,85
Promedio	27,8725	17,4675

3.3.3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

La tabla 3.3 compara los resultados obtenidos de la toma de muestras en el banco de pruebas, se determina que el biodiésel tiene una medida promedio de 28,71 mm de largo y 18,08 mm de ancho y el diésel fósil tiene una medida promedio de 27,87 mm de largo y 17,46 mm de ancho de forma que el biodiésel se esparce 0,84 mm más a lo largo y 0,62 mm a lo ancho, esto se debe a la diferencia de densidad y viscosidad de los combustibles estudiados.

Tabla 3.3 Comparación de resultados en el banco de pruebas

Medida Promedio	Biodiésel B10	Diésel	Diferencia del biodiésel B10 respecto al diésel
Largo (mm)	28,71	27,87	0,84
Ancho (mm)	18,08	17,46	0,62

Los datos tomados en el banco de pruebas determinan una concordancia con la simulación computacional, y al igual el resultado es que el biodiésel B10 presenta una mejor formación del spray que el diésel fósil dentro de la cámara de combustión, aumentando su eficiencia al momento de distribuirse en el cilindro y generando la mezcla aire combustible.

CAPÍTULO IV

4. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

4.1. CONCLUSIONES

- Se realizó la simulación de la inyección de los combustibles utilizando una presión atmosférica de 101 325 Pa, para el diésel la densidad es 840 kg/m^3 y viscosidad de $0,005 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, un flujo másico de $0,0041 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ y una presión de inyección 800 bares; para el biodiésel B10, la densidad es $854,16 \text{ kg/m}^3$ y viscosidad de $0,0041 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$, el flujo másico de $0,0547 \text{ kg/m}\cdot\text{s}$ y una presión de inyección de 800 bares. El resultado gráfico de la simulación indica que el biodiésel B10 tiene una dispersión de $15,67^\circ$, el diésel fósil tiene un ángulo de dispersión de $14,04^\circ$ demostrando que el biodiésel B10 tiene una dispersión de $1,63^\circ$ más que el diésel fósil, generando un mayor cubrimiento del volumen dentro de la cámara de combustión y creando una mezcla aire-combustible optimizada.
- Los resultados del número de Reynolds que son 8 000 para el biodiésel B10 y 7 000 para el diésel fósil, determinan que el biodiésel B10 realiza un cambio de estado a menor distancia del orificio de la tobera del inyector; el resultado de la velocidad para el biodiésel B10 es de $8\,236,35 \text{ m/s}$ y del diésel es $8\,233,70 \text{ m/s}$, indica que el biodiésel B10 llega en menor tiempo a las paredes del cilindro aumentando la pulverización y la eficiencia de la mezcla; la presión que es $32\,248,07 \text{ MPa}$ para el biodiésel B10 y $31\,718,75 \text{ MPa}$ para el diésel fósil determina que el biodiésel almacena mayor energía que el diésel fósil permitiendo mayor cambio de energía al aire dentro de la cámara de combustión.
- La toma de muestras en el banco de pruebas generará valores promedios de largo y ancho, para el biodiésel B10, el largo es $28,71 \text{ mm}$ y el ancho es $18,08 \text{ mm}$; para el diésel, el largo es $27,87 \text{ mm}$ y el ancho es $17,46 \text{ mm}$, dando como resultado que el biodiésel ocupa mayor área de dispersión dentro de la cámara de combustión generando una mezcla de aire-combustible óptima y aumentando la eficiencia de la combustión.

4.2. RECOMENDACIONES

- Al realizar el mallado de la geometría en el programa computacional de simulación CFD, enfatizar los puntos colindantes entre combustible y aire, generando el mallado más fino porque es el lugar en donde se producen los fenómenos de la simulación, y comprobar que la calificación se encuentra dentro del rango de excelente en la calificación Skewness.
- Para la introducción de los parámetros de combustibles, cilindro e inyección trabajar hasta con 4 decimales para incrementar la precisión de los resultados y facilitar el análisis del comportamiento y la comparación entre combustibles.
- La capacidad de computo para realizar la simulación debe ser igual o superior a una memoria RAM de 16 Gb, tarjeta gráfica de 1 Gb y 6 núcleos de procesamiento; evitando la sobrecarga del equipo y permitiendo obtener resultados en un tiempo aproximado de 5 horas por combustible.
- Para las pruebas realizadas en el banco es necesario controlar los factores relacionados con las características del combustible, presión de inyección, pulsos de inyección y temperatura ambiental, así como la posición relativa en la que se ubica el inyector con respecto al molde.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Acosta, A. (2012). *Biocombustibles*. Buenos Aires: ANI.
2. ANSYS. (2019). *Theory Reference*. ANSYS.
3. Báez Chamorro, O. (2015). *Análisis de la eficiencia energética en un motor diésel electrónico usando biodiésel*. Ibarra: UTN.
4. Battistoni, M., Grimaldi, C., & Mariani, F. (2012). *Coupled Simulation of Nozzle Flow and Spray Formation Using Diesel and Biodiesel for CI Engine Applications*. Perugia: Universidad de Perugia.
5. BOSCH. (2015). Toberas Bosch y Zexel. *Inyectores Common Rail Bosch*, B5.
6. Castro, M. (2011). *Hacia una Matriz Energética Diversificada en Ecuador*. Quito: Centro Ecuatoriano de Derecho Ambiental.
7. Chaparro Gonzáles, F. V. (2015). *Dirección por objetivos*. Valencia: Editorial de la Universidad Politécnica de Valencia.
8. Copete, H., Amell, A., & Cadavid, F. (2008). *Simulación numérica de una cámara de combustión de alta velocidad con dos configuraciones de inyección de combustible*. Colombia: DYNA.
9. Copete, H., Amell, A., & Cadavid, F. (2008). *Simulación numérica de una cámara de combustión de alta velocidad con dos configuraciones de inyección de combustible*. Medellín: DYNA.
10. Delgado, A. E. (2011). *Influencia del porcentaje de mezcla del aceite de higuera en la obtención de combustible alternativo para motores diesel*. Bogotá: Revista Facultad de ingeniería Universidad de Antioquia.
11. Fernández Oro, J. M. (2012). *Técnicas numéricas en ingeniería de fluidos: introducción a la dinámica de fluidos computacional (CFD) por el método de volúmenes finitos*. Barcelona: Reverté.
12. García López, M. (2015). *Estudio con el código CFD Converge de la tasa de inyección para un inyector con tobera microsaco y una modificación geométrica de ésta*. Valencia: Universidad Politécnica de Valencia.

13. García, J. G. (2008). *DESARROLLO Y APLICACIÓN DE LA MEDIDA DEL*. Valencia: Universidad politécnica de valencia.
14. González Querubín , E. (2008). *Modelado computacional del flujo en el interior de una tobera mono-orificio de un inyector diésel*. Bucaramanga: UST.
15. INEN, I. E. (2012). *NTE INEN 1489:2012*. Quito: INEN.
16. INEN, I. E. (2013). *INEN 2482*. Quito: INEN.
17. Laboratorio Universidad Central del Ecuador. (2017). *Informe de Resultados Biodiésel B10*. Quito: Universidad Central del Ecuador.
18. Mafla Yépez, C. N. (2018). *Caracterización y análisis comparativo de biodiesel a base de higuera B10, respecto de diésel comercial de alta calidad*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte.
19. Mantilla, D. M. (2017). Estudio del proceso de combustión en un motor de alto swirl. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para*, 212-224.
20. Mata Cárdenas, G. F. (2017). *Aplicación de la dinámica de fluidos computacional y el modelado mecánico en el estudio del sistema de bombeo electrocentrífugo sumergido*. Distrito Federal de México: Universidad Autónoma de México.
21. Maurad Guncay, K. M. (2017). *ESTUDIO DEL DESEMPEÑO HIDRÁULICO DEL CANAL*. Cuenca: Universidad de Cuenca.
22. Melo Espinosa, E. &. (julio de 2012). Investigación experimental de la prestaciones de un motor mono-cilíndrico usando combustible diésel emulsionado. *Ingeniería energética*, 11-20. Obtenido de Ingeniería energética.
23. Meselhe, E. (2012). *Numerical modeling of hydrodynamics and sediment transport in lower Mississippi at proposed delta building diversion*. New Orlands: Journal of Hydrology.
24. Moldovanu, D., & Burnete, N. (2013). *Computational fluid dynamics simulation of a single cylinder research engine working with biodiesel*. Cluj-Napoca: Universidad Técnica de Cluj-Napoca.

25. Morán Vega, C. H., & Passo Guamangate, M. R. (2016). *Diseño y construcción del sistema de activación y control de inyectores diesel riel común CRDI*. Latacunga: Universidad de las Fuerzas Armadas.
26. Patiño , E. (2014). *Estudio del comportamiento hidráulico de un flujo a través de un sistema de vórtice gravitacional utilizando técnicas de dinámica de fluidos computacional CFD*. Loja: UCL.
27. Pérez Sánchez, A., Montero Alpírez, G., Ayala Bautista, R., Coronado Ortega, M. A., Campbell Ramírez, H. E., & García Gonzales, C. (2015). *Simulación en Aspen de la combustión de mezclas diesel-biodiesel*. California: UABC.
28. Pérez, J. (2016). *Biocombustibles*. México D.F.: FCE.
29. Presidente Constitucional de la Republica Rafael Correa. (2012). *Decreto 1303*. Quito: Presidencia de la República del Ecuador.
30. Ramajo, D., Zanotti, A., & Nigro, N. (2010). *Estimación de la turbulencia en cámaras de combustión y su incidencia en la velocidad de avance del frente de llama*. Argentina: INTEC.
31. Rodríguez Fernández, J. (2007). *Estudio bibliográfico y experimental de las emisiones y prestaciones de un motor trabajando con biodiésel*. Ciudad Real: UCLM.
32. Rodriguez Rodriguez, D. A. (2016). *Obtención de biodiésel a partir de mezclas de aceite de cocina usado y aceite de higuera por transesterificación*. Bogotá: Jóvenes en la ciencia.
33. S. Pérez-Cortes a, Y. A.-C.-C.-N. (2017). Modelación y simulación fluido-dinámica computacional de sistema. *Revista Internacional de Métodos Numéricos para*, 179-187.
34. Salazar, A. (2015). *Matriz energética y los biocombustibles en el Ecuador*. Quito: Flacso Ecuador.
35. Samaniego Burmeo , S. (2015). *Simulación numérica del funcionamiento de una rejilla de efecto Coanda utilizando metodología CFD*. Loja: UTPL.
36. Sánchez, E. (2009). *Sistemas Auxiliares del motor*. Madrid: Mc millan, Iberia S.A.

37. Sarmiento, J. A., & Lazo, J. P. (2015). *Estudio experimental y computacional mediante cfd ansys del flujo de aire a través de techos de edificaciones usando un tunel de viento*. Cuenca: Universidad politécnica salesiana.
38. Secundino, E. G. (2009). *Motores*. Madrid: Macmillan Iberia, S.A.
39. Shenghao, Y., Bifeng, Y., Weixin, D., Hekun, J., Ze, Y., & Bin, X. (2018). *Experimental study on the diesel and biodiesel spray characteristics emerging from equilateral triangular orifice under real diesel engine operation conditions*. Zhenjiang: Elsevier.
40. Solórzano Ríos, J. A. (2012). *Desarrollo de prácticas Avanzadas para el laboratorio de diseño y manufactura asistido por computadora*. Distrito Federal de México: Universidad Nacional Autónoma de México.
41. Subiabre Sánchez, P. (2017). *Diseño básico de una cámara de combustión para una micro turbina a gas*. santiago de chile: Universidad de chile.
42. Toapanta Cunalata, E. G. (2013). *Diseño e implementacion de un laboratorio de modelado y diseño mecanico asistido por computadora mediante software cad 3D-2D y solidworks en la universidad técnica de cotopaxi*. La Maná: Universidad Técnico de Cotopaxi.
43. Viera, A. A. (2013). *Estudio del chorro Diesel producido por un inyector de actuación directa en condiciones*. Barcelona: universidad politécnica de catalunya.
44. Zapata, L. D. (2010). *Caracterización de los Procesos de Inyección y Combustión Diesel Mediante Visualización*. Valencia: UNIVERSIDAD POLITECNICA DE VALENCIA.
45. Zarate Cruz, R. (2016). *Diseño y simulación de una impresora 3D REPRAP compatible con solidworks y mastercam*. Madero: Instituto Tecnológico de Ciudad Madero.

ANEXOS

ANEXO I
OBTENCIÓN DE LA TOBERA



Figura AI.1 Placa de identificación del motor Mazda BT-50 CRDI



Figura AI.2 Extracción del inyector



Figura AI.3 Colocación del inyector en la prensa de banco



Figura AI.4 Extracción de la tobera del inyector

ANEXO II

BANCO DE PRUEBAS



Figura AII.1 Simulador de pulsaciones de inyección



Figura AII.2 Colocación del inyector en el banco de pruebas



Figura AII.3 Conexión del inyector y el simulador de pulsaciones en el banco de pruebas

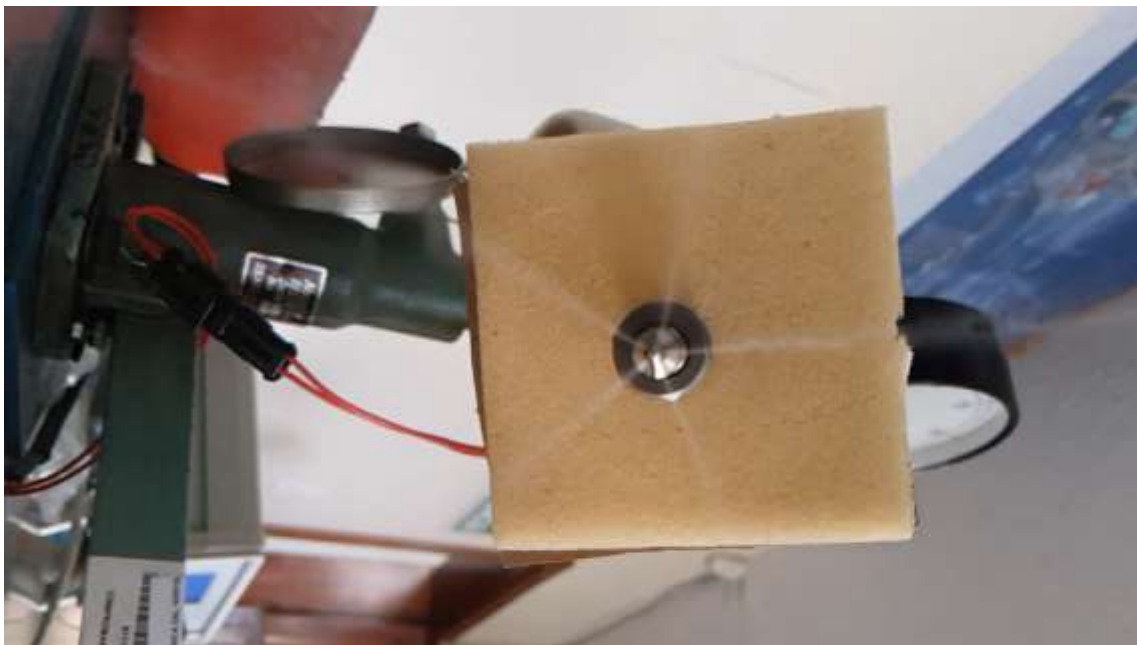


Figura AII.4 Formación del chorro de combustible

ANEXOS III
TABLAS DE RESULTADOS DE LA SIMULACIÓN

Velocidad			
Diesel		Biodiesel	
Axial Coordinate [m]	Velocity [m s ⁻¹]	Axial Coordinate [m]	Velocity [m s ⁻¹]
0,000940384	3411,67261	0,000940384	3413,77954
0,00094041	4010,62622	0,00094041	4012,99243
0,000940444	4808,85498	0,000940444	4811,57031
0,000940532	6837,11816	0,000940532	6839,72217
0,00094064	8233,70215	0,000940641	8236,35156
0,000940867	7912,25342	0,000940866	7915,40137
0,00094122	7915,97021	0,000941218	7916,08252
0,000941398	7348,72852	0,000941396	7351,48242
0,00094174	6250,67627	0,000941739	6253,75244
0,000942793	6489,40137	0,000942794	6488,94922
0,000944535	7151,64404	0,000944541	7158,06152
0,000946209	6524,54297	0,000946213	6527,87646
0,000949053	6775,87842	0,000950667	6162,38184
0,000951876	5657,85205	0,000959614	6126,80859
0,000957341	5615,76758	0,000970759	6305,78076
0,00096592	6491,3501	0,000987869	5958,19678
0,000979135	6421,44434	0,001013433	5551,07617
0,000993626	5657,40088	0,001037961	4678,58887
0,001018351	5230,85986	0,001063086	4337,38672
0,001051643	4430,11963	0,001072091	4483,6167
0,001057468	4379,73242	0,001090228	4269,26514
0,00106979	4425,12402	0,001099717	3817,32031
0,001095319	3989,02319	0,001115656	3060,4043
0,001109212	3329,53052	0,001140308	2936,89136
0,001131145	3020,47144	0,001187081	2694,20435
0,001165155	2809,52637	0,001211048	2247,29712
0,001225534	2224,13916	0,001245737	2179,28076
0,001277947	2204,58618	0,001273649	2203,57861
0,00132737	1685,14941	0,001307128	2062,86108
0,001379341	1547,86169	0,001345747	1652,67651
0,001458783	1265,68542	0,001383811	1538,28662
0,00149586	1139,64893	0,001449707	1320,7865
0,00156244	882,664734	0,001525997	1030,37976
0,001655329	747,638794	0,001569925	856,809204

Figura AIII.1 Tabla de resultados de velocidad

Presión			
Diesel		Biodiesel	
Axial Coordinate [m]	Total Pressure [Pa]	Axial Coordinate [m]	Total Pressure [Pa]
0,000940384	29299552300	0,000940384	29774323700
0,00094041	29638508500	0,00094041	30120427500
0,000940444	30105169900	0,000940444	30596880400
0,000940532	31128272900	0,000940532	31638226900
0,00094064	31718754300	0,000940641	32248078300
0,000940867	30309351400	0,000940866	30848639000
0,00094122	29256241200	0,000941218	29784342500
0,000941398	26349516800	0,000941396	26874251300
0,00094174	23959586800	0,000941739	24438034400
0,000942793	22546913300	0,000942794	22954881000
0,000944535	25175351300	0,000944541	25640448000
0,000946209	23777851400	0,000946213	24232306700
0,000949053	24981524500	0,000950667	22390530000
0,000951876	19393480700	0,000959614	19965024300
0,000957341	17636380700	0,000970759	22517108700
0,00096592	22315026400	0,000987869	19289804800
0,000979135	21580322800	0,001013433	18117552100
0,000993626	17083537400	0,001037961	13772469200
0,001018351	15402870800	0,001063086	11677533200
0,001051643	12735227900	0,001072091	11921066000
0,001057468	12103246800	0,001090228	10708185100
0,00106979	11600588800	0,001099717	8893844480
0,001095319	9444625410	0,001115656	5851537410
0,001109212	6823952900	0,001140308	5046437890
0,001131145	5243356160	0,001187081	4012614140
0,001165155	4312961540	0,001211048	3040306690
0,001225534	2860233730	0,001245737	2719290620
0,001277947	2516917500	0,001273649	2594675710
0,00132737	1484957950	0,001307128	2191823100
0,001379341	1255378050	0,001345747	1445868030
0,001458783	825207552	0,001383811	1264382980
0,00149586	707938944	0,001449707	918396992
0,00156244	492980192	0,001525997	627868288
0,001655329	344210208	0,001569925	479626112

Figura AIII.2 Tabla de resultados de presión

Reynolds			
Diesel		Biodiesel	
Axial Coordinate [m]	Cell Reynolds Number	Axial Coordinate [m]	Cell Reynolds Number
0,000940384	46,3427811	0,000940384	52,1120758
0,00094041	46,1672783	0,00094041	51,9317398
0,000940444	45,9182968	0,000940444	51,6742401
0,000940532	45,4505081	0,000940532	51,0859756
0,00094064	43,8590431	0,000940641	49,2787704
0,000940867	34,9474792	0,000940866	39,6865997
0,00094122	33,8187485	0,000941218	38,3910103
0,000941398	35,8017654	0,000941396	40,4166031
0,00094174	43,8190956	0,000941739	49,8544884
0,000942793	67,7593994	0,000942794	77,1958923
0,000944535	85,2418823	0,000944541	97,144455
0,000946209	113,555946	0,000946213	131,131592
0,000949053	174,998291	0,000950667	238,177689
0,000951876	235,148804	0,000959614	413,152039
0,000957341	324,665649	0,000970759	565,687927
0,00096592	444,436401	0,000987869	697,802612
0,000979135	582,272217	0,001013433	791,473999
0,000993626	677,602661	0,001037961	567,136597
0,001018351	693,252686	0,001063086	360,554779
0,001051643	456,48999	0,001072091	340,905548
0,001057468	405,301941	0,001090228	289,568268
0,00106979	340,455994	0,001099717	243,102814
0,001095319	260,467621	0,001115656	165,186462
0,001109212	191,721451	0,001140308	151,016754
0,001131145	153,321503	0,001187081	151,607925
0,001165155	144,937073	0,001211048	156,730545
0,001225534	159,425247	0,001245737	166,577744
0,001277947	177,469849	0,001273649	176,256866
0,00132737	168,078369	0,001307128	179,300476
0,001379341	182,003555	0,001345747	169,984558
0,001458783	216,203186	0,001383811	183,607758
0,00149586	224,599487	0,001449707	211,502075
0,00156244	234,923187	0,001525997	226,097031
0,001655329	270,700073	0,001569925	229,440536

Figura AIII.3 Tabla de resultados del número de Reynolds

ANEXO IV

RESULTADOS DE LAS PRUEBAS DEL BIODIÉSEL B10



UNIVERSIDAD CENTRAL DEL ECUADOR
FACULTAD DE INGENIERÍA QUÍMICA
DEPARTAMENTO DE PETRÓLEOS, ENERGÍA Y CONTAMINACIÓN



INFORME DE RESULTADOS
PETRÓLEO

Informe N° 17-03-02-P-1
Fecha 2017-04-04

Referencia: OT-17-03-02-P
Atención: Ing. Carlos Maña
Empresa: UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Dirección: Ibarra
Tipo de ensayos: Análisis Fisicoquímicos
Tipo de muestra: BIODIÉSEL
Identificación de la muestra: BIODIÉSEL A BASE DE ACEITE HIGUERILLA MEZCLA B10
Descripción de la Muestra: Sin descripción específica
Fecha de ingreso de la muestra: 2017-03-08
Código de muestra: OE-17-03-02-P-1
Fecha de realización de ensayos: 2017-03-09 a 2017-03-31

DETERMINACIÓN	UNIDADES	MÉTODO	RESULTADO
DENSIDAD API A 60°F*	°API	PNE/DPEC/P/ASTM D-287	34,0
PUNTO DE INFLAMACIÓN*	°C	PNE/DPEC/P/ASTM D-92 PNE/DPEC/P/ASTM D-93	72,1
SEDIMENTO BÁSICO Y AGUA (%MSW)*	%V	ASTM D-4007	0,05
AGUA POR DESTILACIÓN*	%V	ASTM D-95	0,050
CENIZAS*	%P	ASTM D-462	0,0080
VISCOSIDAD CINEMÁTICA A 40°C*	cSt	PNE/DPEC/P/ASTM D-445	4,21
AZUFRE*	%P	PNE/DPEC/P/MIO4 Ref. ASTM D-4294	0,0148
RESIDUO CARBONOSO SOBRE 10% DE RESIDUO DE DESTILACIÓN ASTM D-86*	%P	ASTM D-189	0,13
CORROSIÓN A LA LÁMINA DE CU*	Unidad de Corrosión	PNE/DPEC/P/ASTM D-130	1b
ÍNDICE DE CETANO CALCULADO*	-	PNE/DPEC/P/ASTM D-287	51
SODIO*	mg/kg	Método Interno Ref. ASTM D-5863/ APHA 3111 B	28,418
POTASIO*	mg/kg	Método Interno Ref. ASTM D-5056/ APHA 3111 B	7,268
CALCIO*	mg/kg	Método Interno Ref. ASTM D-5056/ APHA 3111 B	4127,586
MAGNESIO*	mg/kg	Método Interno Ref. ASTM D-5056/ APHA 3111 B	10,268
TEMPERATURA DE DESTILACIÓN AL 90 %*	°C	ASTM D-86	350,7

Nota.- Los ensayos marcados (*) no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE

Condiciones Ambientales.- Presión 542,9 mm Hg; Temperatura: 17,5 °C

Realizado por: VRT

Revisado por:

Ing. Fernanda Toasa L.
RESPONSABLE TÉCNICO



Aprobado por:

Ing. Ghem Carvajal C.
DIRECTOR DEL LAB. DEL DPEC

ADVERTENCIA: EL USUARIO DEBE EXIGIR EL ORIGINAL. EL DPEC NO SE RESPONSABILIZA POR DOCUMENTOS FOTOCOPIADOS.

Dirección: Enrique Ritter s/n y Bolivia

Teléfono: 2904794 / 2544631 ext. 26
QUITO - ECUADOR

E-mail: figsecretaria.dpec@uce.edu.ec

MC2201-P01-6

Hoja 1 de 1.

Figura AIV.1 Resultados de las propiedades del Biodiésel B10

ANEXO V
PLANOS