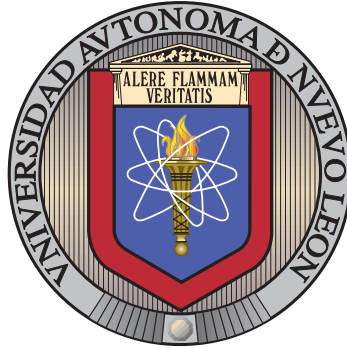


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EVALUACIÓN DE MEZCLAS DIÉSEL-BIODIESEL A  
PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS  
PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE  
COMBUSTIBLE EMPLEANDO ELEVADOS NIVELES  
DE PRESIÓN DE INYECCIÓN.

POR

MARISSA HERNÁNDEZ AGUILAR

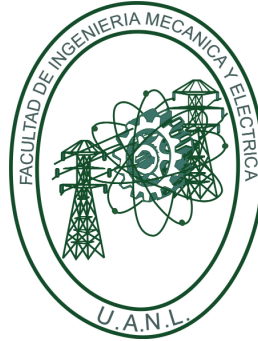
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN ENERGÍAS TÉRMICAS Y RENOVABLES  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

22 DE NOVIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EVALUACIÓN DE MEZCLAS DIÉSEL-BIODIESEL A  
PARTIR DE LA CARACTERIZACIÓN DE LOS  
PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE  
COMBUSTIBLE EMPLEANDO ELEVADOS NIVELES  
DE PRESIÓN DE INYECCIÓN.

POR

MARISSA HERNÁNDEZ AGUILAR

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN ENERGÍAS TÉRMICAS Y RENOVABLES  
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

22 DE NOVIEMBRE DE 2023

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN**  
**Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica**  
**Posgrado**

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Evaluación de mezclas diésel-biodiésel a partir de la caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible empleando elevados niveles de presión de inyección”, realizada por la estudiante Marissa Hernández Aguilar, con número de matrícula 2082174, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

**El Comité de Evaluación de Tesis**

M.C. Miguel García Yera  
Director

Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León  
Co-Director

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo  
Revisor

M.C. Joel González Marroquín  
Revisor

Dr. José Manuel Diabb Zavala  
Revisor

Vo.Bo.

  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa FO505

Acta Núm. 4278

Ciudad Universitaria, a 13 de noviembre de 2023.

*Esta tesis esta dedicada a mi Familia, especialmente a Miguel Hernández Flores  
(Q.E.P.D) y amigos más cercanos.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>XVI</b>
<b>Resumen</b>	<b>XIX</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.1.1. Biodiésel obtenido del aceite usado de cocina . . . . .	4
<b>2. Estado actual del conocimiento sobre el proceso de inyección</b>	<b>7</b>
2.1. Sistema de inyección diésel . . . . .	8
2.2. Partes del sistema de Inyección diesel common-rail . . . . .	8
2.3. Inyector diésel . . . . .	9
2.4. Chorro de inyección . . . . .	11
2.4.1. Proceso de atomización . . . . .	11
2.4.2. Regímenes de atomización . . . . .	11
2.4.3. Parámetros macroscópicos del chorro diésel . . . . .	13
2.5. Área del chorro . . . . .	13

2.6. Penetración del chorro . . . . .	14
2.7. Ángulo del chorro . . . . .	15
2.8. Estrategias de inyección múltiple . . . . .	15
2.9. Revisión de la literatura . . . . .	16
<b>3. Planteamiento de la tesis</b>	<b>34</b>
3.1. Síntesis de la revisión bibliográfica . . . . .	35
3.2. Hipótesis . . . . .	36
3.3. Objetivos . . . . .	37
3.3.1. Objetivo general . . . . .	37
3.3.2. Objetivos específicos . . . . .	37
3.4. Metodología general . . . . .	38
<b>4. Metodología de la tesis</b>	<b>40</b>
4.1. Herramientas experimentales . . . . .	41
4.1.1. Instalación de visualización a volumen constante . . . . .	41
4.1.2. Nuevo sistema de inyección . . . . .	42
4.1.3. Control de presión . . . . .	51
4.1.4. Sistema de enfriamiento . . . . .	54
4.1.5. Técnica óptica de Iluminación directa por dispersión MIE . . . . .	57
4.1.6. Procesado de imagenes . . . . .	58
4.2. Plan de trabajo . . . . .	63

---

4.2.1. Combustibles . . . . .	63
<b>5. Análisis del proceso de mezcla empleando elevados niveles de presión de inyección</b>	<b>66</b>
5.1. Validación de la instalación experimental . . . . .	67
5.2. Efecto de una mezcla binaria diésel-biodiésel derivado del aceite usado de cocina sobre el proceso de mezcla . . . . .	69
5.2.1. Efecto de la presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos de los combustibles . . . . .	69
5.2.2. Efecto del levantamiento de la aguja del inyector sobre los parámetros macroscópicos del chorro de los combustibles . . . . .	79
<b>6. Conclusiones y trabajos futuros</b>	<b>86</b>
6.1. Conclusiones . . . . .	87
6.2. Trabajos futuros . . . . .	88
<b>A. Modificación del color de la tapa de la cámara a volumen constante</b>	<b>89</b>
A.1. Introducción . . . . .	89
A.2. Metodología . . . . .	90
A.3. Resultados . . . . .	90
A.4. Conclusiones . . . . .	92
<b>B. Obtención de la curva característica del sensor de presión</b>	<b>93</b>
B.1. Introducción . . . . .	93

---

B.2. Metodología . . . . .	93
B.3. Resultados . . . . .	95
B.4. Conclusiones . . . . .	97
<b>C. Válvula dosificadora de combustible</b>	<b>98</b>
C.1. Introducción . . . . .	98
C.2. Metodología . . . . .	98
C.3. Resultados . . . . .	100
C.4. Conclusiones . . . . .	101
<b>D. Mejora del enfriamiento del combustible mediante la implementa- ción de un intercambiador de calor</b>	<b>102</b>
D.1. Introducción . . . . .	102
D.2. Metodología . . . . .	103
D.3. Resultados . . . . .	107
D.4. Conclusiones . . . . .	108



# ÍNDICE DE FIGURAS

---

2.1. Esquema del sistema de inyección common-rail . . . . .	8
2.2. Funcionamiento del inyector. . . . .	10
2.3. Regimenes de atomización. . . . .	13
2.4. Evoluciones temporales del chorro de combustibles, resultante de emplear una presión de inyección de 130 MPa, y mezclas ternarias diésel-biodiésel-etanol(Adaptado de Liz et al. [1]). . . . .	19
2.5. Evoluciones temporales del chorro de combustibles, resultante de emplear una presión de inyección de 130 MPa, y mezclas ternarias diésel-biodiésel-etanol (Adaptado de liz et al. [1]). . . . .	20
2.6. Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas al emplear el nivel de presión de 100 MPa, el diésel, y las mezclas binarias diésel- biodiésel (Adaptado de Wang et al .[2]). . . . .	24
2.7. Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas al emplear el nivel de presión de 200 MPa, el diésel, y las mezclas binarias diésel-biodiésel (Adaptado de Wang et al .[2]). . . . .	24
2.8. Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas al emplear el nivel de presión de 300 MPa, el diésel, y las mezclas binarias diésel-biodiésel (Adaptado de Wang et al. [2]). . . . .	25

2.9. Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas al emplear un nivel de contrapresión de 7 MPa, un nivel de presión de inyección de 180 MPa, diésel, y biodieseles derivados de diferentes materias primas. (Adaptado de Bohl et al. [3]). . . . .	26
2.10. Variación del ángulo del chorro con la temperatura para el diésel, y las mezclas binarias B30 y B100 (Adaptado de Moch et al. [4]). . . . .	27
2.11. Evoluciones temporales de la penetración del chorro empleando biodiesel, diésel, y los niveles de presión de inyección de 80 MPa y 160 MPa (Adaptado de Hwang et al. [5]). . . . .	28
2.12. Evoluciones temporales del ángulo del chorro empleando biodiesel, diésel, y los niveles de presión de inyección de 80 MPa y 160 MPa (Adaptado de Hwang et al. [5]). . . . .	28
2.13. Evoluciones temporales de la penetración del chorro, obtenidas al emplear biodiesel, diésel, empleando tres de presiones de inyección de 50 MPa y 150 MPa (Adaptado de Meshack et al. [6]). . . . .	29
2.14. Evoluciones temporales del ángulo del chorro, obtenidas al emplear biodiesel, diésel, empleando tres de presiones de inyección de 50 MPa y 150 MPa (Adaptado de Meshack et al. [6]). . . . .	30
2.15. Esquema de una tobera diésel. . . . .	30
2.16. Levantamiento de la aguja del inyector diésel obtenidas al emplear a tres niveles de presión de inyección 100 MPa, 150 MPa, y 200 MPa, y dos tiempos de energización 0.5 ms y 1.0 ms(Adaptado de Pratama et al. [7]). . . . .	31
2.17. Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas a un levantamiento rápido de la aguja, y a un levantamiento lento de la aguja. (Adaptado de Stegemann al.[8] . . . . .	32

---

2.18. Evoluciones temporales del ángulo del chorro obtenidas a un levantamiento rápido de la aguja, y a un levantamiento lento de la aguja. (Adaptado de Stegemann al. [8] . . . . .	33
3.1. Metodología general de la tesis . . . . .	38
4.1. Diagrama de la instalación experimental para la caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible. . . . .	42
4.2. Vista lateral. . . . .	43
4.3. Depósito de combustible. . . . .	44
4.4. Filtros. . . . .	44
4.5. Bomba de baja presión . . . . .	45
4.6. Motor eléctrico. . . . .	45
4.7. Variador de frecuencia. . . . .	46
4.8. Bomba Bosch CP 4.2. . . . .	47
4.9. Cople de aleación de acero con tungsteno. . . . .	47
4.10. Mangueras de alta presión. . . . .	48
4.11. Conectores de mangueras de alta presión. . . . .	49
4.12. Common-rail. . . . .	50
4.13. Tapones del common-rail. . . . .	50
4.14. Sistema para la energización del inyector diésel tipo solenoide. . . . .	52
4.15. Regulador de presión. . . . .	52
4.16. Sensor de presión montado en el common-rail. . . . .	53

---

4.17. Válvula reguladora de presión. . . . .	54
4.18. Intercambiadores de calor a. . . . .	55
4.19. Intercambiador de calor b. . . . .	55
4.20. Baño térmico a. . . . .	56
4.21. Baño térmico b. . . . .	57
4.22. Configuración experimental empleada para aplicar la técnica óptica de iluminación directa por dispersión Mie. . . . .	58
4.23. Interfaz del programa de procesamiento de imágenes. . . . .	59
4.24. Imagen del papel milimétrico. . . . .	60
4.25. Imágenes del chorro líquido obtenidas a 0.14, 0.42, y 0.56 ASOI. . . .	61
4.26. Superficie interior pintada, en donde se aloja el inyector diésel en la cámara de visualización a volumen constante. . . . .	62
4.27. Levantamiento de la aguja de un inyector solenoide a tres diferentes niveles de presión de inyección 80, 100, 120, 140 y 160 MPa (Adaptado de Martínez-Carrillo [9], y Erick Maqueda [10]). . . . .	65
5.1. Gráfico de penetración del chorro a 100 MPa de presión de inyección y 2 MPa de contrapresión. . . . .	68
5.2. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos, de los cho- rros de diésel y la mezcla binaria B20, empleando los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y un tiempo de energización de 0.8 ms. . . . .	70

5.3. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos, de los cho-  
 rros de diésel y la mezcla binaria B20, teniendo en cuenta los iso-  
 tiempos de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42 ms, y 0.56 ms ASOI, y empleando  
 los niveles de prail de 170 MPa, 180 MPa, 210 MPa, un tiempo de  
 energización de 0.8 ms y una contrapresión de 5 MPa. . . . . 71

5.4. Evoluciones temporales de la penetración, ángulo, y área para el  
 diésel, y la mezcla binaria B20, empleando los niveles de presión de  
 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y un  
 tiempo de energización de 1.5 ms. . . . . 75

5.5. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos, del diésel y  
 la mezcla binaria B20, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms,  
 0.28 ms, 0.42 ms, 0.56 ms, y 0.7 ms ASOI, y empleando los niveles de  
 prail de 170 MPa, 180 MPa, 210 MPa, un tiempo de energización de  
 1.5 ms y una contrapresión de 5 MPa. . . . . 76

5.6. Evoluciones temporales de la penetración, ángulo, y área para el  
 diésel, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42  
 ms, y 0.56 ms ASOI, y empleando los niveles de prail de 170 MPa,  
 180 MPa, 210 MPa, un tiempo de energización de 0.8 y 1.5 ms y una  
 contrapresión de 5 MPa. . . . . 80

5.7. Evoluciones temporales de la penetración, ángulo, y área para la mez-  
 cla binaria B20, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms, 0.28  
 ms, 0.42 ms, y 0.56 ms ASOI, y empleando los niveles de prail de 170  
 MPa, 180 MPa, 210 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y los tiempos  
 de energización de 0.8 ms y 1.5 ms. . . . . 83

A.1. Tapa de la cámara de visualización a volumen constante antes de ser  
 pintada. . . . . 90

---

A.2. Tapa de la cámara de visualización a volumen constante despues de ser pintada. . . . .	91
A.3. Procesamiento de de imagen del chorro líquido sin la tapa pintada. . .	91
A.4. Procesamiento de imagen de chorro líquido con la tapa pintada. . . .	92
B.1. Regulador de presión de la firma GENOTEC . . . . .	94
B.2. Interfaz del regulador de presión de la firma GENOTEC . . . . .	94
B.3. Válvula reguladora de presión. . . . .	95
B.4. Medición del voltaje del sensor de presión de inyección. . . . .	96
B.5. Curva de calibración del sensor de presión de inyección. . . . .	96
C.1. Bomba Bosch CP4.2, y válvula reguladora de caudal. . . . .	99
C.2. Interface del GENOTEC para regular la válvula reguladora de caudal.	99
D.1. Intercambiador de calor . . . . .	104
D.2. Tapa del intercambiador de calor. . . . .	104
D.3. Tubos internos del intercambiador de calor . . . . .	105
D.4. Tapa del intercambiador de calor con silicón. . . . .	105
D.5. Intercambiador de calor limpio. . . . .	106
D.6. Baño térmico. . . . .	107

# ÍNDICE DE TABLAS

---

1.1. Materias primas frecuentemente utilizadas en la fabricación de biodiésel	3
4.1. Especificaciones del inyector diésel tipo Solenoide. . . . .	51
4.2. Propiedades fisicoquímicas del diésel. . . . .	63
4.3. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel . . . . .	63
4.4. Condiciones de operación que se emplearon en el presente estudio . .	65
5.1. Condiciones de operación en la que se compararan los valores de la penetración del chorro. . . . .	67
C.1. Temperaturas del combustible en el retorno, y en el tanque. . . . .	100
D.1. Temperaturas del combustible en el retorno, y en el tanque. . . . .	103
D.2. Temperaturas del combustible en el retorno, y en el tanque. . . . .	107

# AGRADECIMIENTOS

---

Quiero agradecer a mis padres Paula Araceli Aguilar Alcalá y Jaime Hernández León, por haberme apoyado para llegar a este momento de mi vida, todo su apoyo moral sin el que no hubiera podido culminar esta etapa importante de mi vida. Ambos me motivaron con sus respectivas historias acerca del camino que recorrieron para obtener este mismo grado que estoy obteniendo este día tan especial. Los amo y muchas gracias por estas siempre conmigo.

Quiero agradecer por parte de la familia de mi padre a mi abuelo paterno Miguel Hernández Flores, quien a temprana edad de mi vida me incentivó a ser creativa y curiosa en este mundo lleno de posibilidades y a mi abuela Cristina León. Por parte de la familia de mi madre quiero agradecer mucho a mi abuela materna Irma Alcalá Hernández quien siempre estuvo pendiente de mí y me ha cuidado desde que tengo memoria y a mi abuelo Luis Aguilar Martínez, quienes guardo en un lugar muy especial en mí corazón.

Gracias a mi familia, a mis tíos Edgar Shelvy Aguilar Alcalá y Lizbeth Guerrero Nabor, a mis primos Edgar Shelvy, Nayeli Azuara, Litzy Areli y Javier Ulises, por haberme apoyado todo este tiempo en una nueva ciudad y por su gran compañía que fue muy importante y significativa para mí.



Gracias a mis amigos, a Lily Guerrero Robles más que una amiga eres mi hermana, gracias por escucharme todo este tiempo y recordarme quién soy yo, a Yesenia Martínez Pérez por siempre saber que decirme en mis momentos de flaqueza y tu gran apoyo moral y por último, a Saúl Álvarez por su apoyo moral durante este posgrado.

Muchas gracias a las chicas de la "comuna" a Rubí Alvarado, Cristina Santana, Andrea Ortigón, Valeria María Padilla y a Julia Parra. Muchas gracias por su amistad, compañía, los buenos momentos y las risas que no faltaron en la casa, llegue sola a Nuevo León pero me voy con buenas amistades.

A mis compañeros y amigos de laboratorio, María Fernanda Uscanaga (Marissa 2), Erick Valentín Maqueda Aguilar y Ángel Leonides Rodríguez, muchas gracias por su amistad, por sus consejos, apoyo moral durante mis estudios en la maestría y especialmente por su apoyo con "Franky", recuerden la distancia no borrará nuestra amistad y me alegro de haberlos conocido.

A mis amigos y compañeros de generación Juan Medel, Oziel Silva y Antonio Campuzano, gracias por esos buenos momentos de compañía, apoyo moral y por su amistad, personas como ustedes hay muy pocas.

También quisiera agradecer a mi co-asesor M.C Miguel Yera y mí asesor Dr. Óscar de la Garza, por su apoyo durante este proceso, por los viajes realizados para la adquisición de material y su conocimiento necesario para poder culminar este proyecto.

Agradecimientos especiales al Ing. Juan Carlos Costa Jimenez, asesor técnico de Bosch México, por el apoyo brindado para la realización de este proyecto.

Gracias al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) por permitirme realizar el posgrado en el programa de Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovables, con la beca: 791147. A la fundación DENSO North America Foundation (project (1): Impact of multiple injection strategies

---

on the injection process in a diesel common-rail system, and project (2): Influence of multiple injection strategies on the injection process using direct-acting piezoelectric and solenoid diesel injectors) y al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica PAICYT (proyecto PAICYT 570-IT-2022).

El presente trabajo se realizó en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energetica (LIITE), con el apoyo del Grupo de Investigación en Energías Térmicas y Renovable (GETR) de la FIME-UANL

# RESUMEN

---

Marissa Hernández Aguilar.

Candidato para obtener el grado de Maestría en Energías Termicas y Renovables  
con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

Universidad Autónoma de Nuevo León.

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica.

Título del estudio: EVALUACIÓN DE MEZCLAS DIÉSEL-BIODIESEL A PARTIR DE LA  
CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE  
COMBUSTIBLE EMPLEANDO ELEVADOS NIVELES DE PRESIÓN DE INYECCIÓN..

Número de páginas: 116.

Los motores diésel son ampliamente utilizados en sistemas de transporte, estos sistemas comúnmente utilizan diésel como fuente principal de generación de energía, la cual contribuye a la contaminación del ambiente. Es por ello que se buscan alternativas como lo son los biocombustibles los cuales tienen una reducción de emisiones a comparación del diésel. Esta búsqueda del desplazamiento del combustible mineral genera estudios sobre los biocombustibles y su factibilidad en el empleo en motores diésel, es por ello que este estudio se centrará en los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla de una mezcla binaria en un sistema de inyección de alta presión.

El propósito de este estudio es adentrarse más en el análisis del proceso de mezcla y cómo la modificación de la presión de inyección influye en dicho proceso. Esto se logrará evaluando los aspectos generales del chorro de combustible diésel, como su longitud de penetración, área y ángulo. Para cumplir con este propósito, es necesario ajustar un sistema de inyección diésel que pueda operar a presiones de inyección elevadas.

El sistema de inyección diésel renovado se compone de varios componentes, incluyendo una bomba Bosch CP4.2, un common-rail que puede manejar altas presiones de inyección, mangueras de alta presión, un sistema de retorno de combustible, un sistema de enfriamiento del combustible, un inyector diésel, una cámara de volumen constante, una cámara de alta velocidad, un regulador de presión y un sistema de energización para el inyector diésel tipo solenoide. Después de afinar el nuevo sistema de inyección diésel common-rail, se procede a inyectar los diferentes combustibles que se están estudiando, utilizando niveles elevados de inyección. Este proceso se graba con una cámara de alta velocidad para capturar imágenes que luego se procesarán en un programa desarrollado en MATLAB y se evaluarán en este trabajo.

Con el aumento de los niveles de presión de inyección la mezcla binaria diésel-biodiésel presentó un comportamiento similar al del chorro diésel con una diferencia menor al 8 %, también se puede observar la influencia que tiene el tiempo de energización sobre el desarrollo del chorro de ambos combustibles, lo cual está relacionado con el efecto del levantamiento de aguja del inyector. Este método del aumento del nivel de presión de inyección permite el incremento de biodiésel a la mezcla binaria diésel-biodiésel.

Firma del asesor: \_\_\_\_\_  
Dr. Oscar A. de la Garza de León

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

*En este capítulo se encuentran las motivaciones para la realización del presente estudio, así como algunos términos necesarios para el entendimiento de este tema, como lo es información básica acerca de la producción de biodiésel, el proceso de transterificación, microemulsificación y pirolisis.*

## 1.1 MOTIVACIÓN

Una de las principales preocupaciones a nivel global es la contaminación causada por los medios de transporte que utilizan hidrocarburos como combustible, los motores Diesel son una de las fuentes contaminantes de óxidos de nitrógeno ( $NO_X$ ) y partículas de hollín, las cuales tienen un efecto indeseable en la salud pública y el medio ambiente. Los óxidos de nitrógeno contribuyen a la lluvia ácida, mientras que las emisiones de partículas constituyen un peligro importante para la salud. Debido a estos efectos negativos se debe tener regulaciones sobre las emisiones contaminantes, por ejemplo en México se cuenta con la Norma Oficial Mexicana NOM-044-SEMARNAT-2017, esta regulación determina los niveles máximos admisibles de emisiones contaminantes como; monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NO), partículas y amoníaco, que provienen del colector del escape de motores Diesel. Otra manera de contribuir a la reducción de contaminantes en el medio ambiente es a través de la reducción de la implementación de combustibles fósiles buscando otras alternativas como lo son los biocombustibles.

El biodiésel se deriva de diferentes materias primas las cuales pueden ser de origen vegetal o animal. Es un combustible alternativo el cual causa un menor impacto en el medio ambiente, de acuerdo a diversos estudios enfocados a analizar las emisiones al emplear biodiesel, por lo general este tipo de combustible suele tener un precio más alto que el diésel mineral, este precio depende del origen del biodiesel, la ubicación geográfica, la temporada (en caso de ser de origen vegetal) y el precio del barril entre otros.

Materias primas frecuentemente utilizadas en la fabricación de biodiésel	
Canola	Soya
Colza	Girasol
Jatrofa	Coco
Palma	Karanja
Sesamo	Aceite usado de cocina

TABLA 1.1: Materias primas frecuentemente utilizadas en la fabricación de biodiésel

Los biocombustibles se pueden clasificar de la siguiente manera; los desarrollados a partir de cultivos destinados al consumo humano se denominan biocombustibles de primera generación, como lo es la caña de azúcar y el maíz. Los biocombustibles que se desarrollan a partir de biomasa no comestible, excepto las algas, se conocen como biocombustibles de segunda generación o avanzados. La biomasa utilizada para la producción de biocombustibles de segunda generación generalmente se divide en tres categorías principales: homogénea, como astillas de madera blanca; cuasi homogéneos, como residuos agrícolas y forestales y no homogéneos, incluyendo materias primas de bajo valor como desechos sólidos. El biodiésel producido a partir de microalgas se consideraría un biocombustible de tercera generación.

Otro problema ambiental es la contaminación del agua por diferentes medios, el cual uno de ellos es la contaminación por estar en contacto con aceite (grasas), el aceite residual que es vertido por lo general en desagües. Esto conlleva a complicaciones al momento del tratamiento de las aguas residuales. Debido a esta problemática se han estado buscando métodos por los cuales se pueda reciclar el aceite o aprovechar más su uso. En la Ciudad de México están implementando la Norma Ambiental para la Ciudad de México NADF-012-AMBT-2015. En la cual buscan resolver esta gran problemática de contaminación del agua causada por verter aceites al drenaje, esta norma tiene el objetivo de crear concientización acerca de la separación de este tipo de residuos, para reincorporarlos y seguir aprovechándolos.

Uno de estos métodos es la creación de biodiesel a partir de estos desechos, el cual recibe el nombre de aceite usado de cocina o por sus siglas en inglés "Waste cooking oil" (WCO). Este biocombustible afronta dos problemas importantes que son la disminución de la contaminación del agua y la disminución del uso de diésel mineral en los motores Diesel.

### 1.1.1 BIODIÉSEL OBTENIDO DEL ACEITE USADO DE COCINA

La producción de biodiésel a partir de WCO consta de varios pasos, como la recolección de WCO, el pretratamiento de WCO, la reducción de la viscosidad y el procesamiento posterior a la producción. El constante reuso de aceite para freír alimentos aumenta la viscosidad, la acidez y el calor específico. Estos factores hacen necesario el tratamiento previo de WCO, se pueden usar varios métodos de pretratamiento para WCO, decantación, inyección de vapor, neutralización, filtración al vacío, método de resina de intercambio iónico, evaporación al vacío de película y glicerina con reacción de catalizador. Estos procesos reducen la viscosidad, el agua y el contenido de ácidos grasos libres del aceite. La alta viscosidad puede causar la formación de gomas en el sistema de inyección y la cámara de combustión. El alto contenido de agua aumenta el desgaste del motor debido a la corrosión. La alta acidez del combustible también reduce la vida útil del motor. Por estas razones, es necesario bajar todos estos valores al límite permisible. Hay varios métodos utilizados para reducir estos valores y producir biodiesel a partir de aceites usados. Todos estos métodos son los siguientes:

- Transesterificación
- Dilución (mezcla)
- Microemulsificación
- Contenido de craqueo térmico (pirólisis).



#### 1.1.1.1 TRANSTERIFICACIÓN

Es el proceso en el cual las grasas o aceites vegetales se convierten en ésteres metílico de ácido graso (FAME) y glicerol a una temperatura predefinida en presencia de una cantidad definida de alcohol y catalizador. En donde un mol de triglicéridos reacciona con 3 mol de alcohol para producir 3 mol de ésteres y 1 mol de glicerol. La selección de catalizadores es crítica porque si no se usa un catalizador adecuado con una cantidad definida, la reacción lleva a una mayor formación de jabón. Hay diferentes tipos de catalizadores, que se pueden utilizar en esta reacción, tales como el ácido, base, enzima y nanocatalizador.

#### 1.1.1.2 DILUCIÓN

Es el proceso mediante el cual se crean diluciones o mezclas con diésel para disminuir los valores negativos del biodiésel, y que éstos no provoquen gomas en el sistema de inyección.

#### 1.1.1.3 MICROEMULSIÓN

La viscosidad de WCO se puede reducir con la ayuda de esta técnica, se emplean diversos solventes como octanol, hexanol, butanol, etanol y metanol para reducir la viscosidad del aceite al nivel requerido.

#### 1.1.1.4 PIRÓLISIS

Durante la pirólisis el aceite se calienta en ausencia de oxígeno en un rango de temperatura, se utiliza para convertir el aceite en biodiesel con calor adecuado y con un catalizador. Este procedimiento puede emplearse en la fabricación de biodiésel a partir de aceites vegetales, residuos plásticos, entre otros. El parámetro más crítico es la temperatura durante el proceso de pirólisis. El costo del biodiesel producido con esta técnica es alto debido al alto requerimiento de energía.

#### 1.1.1.5 SEPARACIÓN DE BIODIÉSEL

Después de completar el proceso de producción de biodiesel, el biodiesel contiene una cantidad excesiva de glicerol, catalizador y metanol. La separación del glicerol se puede realizar por separación basada en la gravedad debido a la diferencia en la gravedad específica. El método de decantación se puede utilizar para separar el biodiésel del glicerol.

## CAPÍTULO 2

# ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL PROCESO DE INYECCIÓN

---

*En este capítulo se describen conceptos necesarios para la comprensión de esta tesis, como lo es la descripción del sistema de inyección diésel common-rail, información acerca de los inyectores diésel, el proceso de atomización, la descripción de los parámetros macroscópicos del chorro diésel y las estrategias de inyección múltiple. También en este capítulo se describen trabajos recientes relacionados al proceso de combustión, emisiones y parámetros macroscópicos del chorro diésel a elevados niveles de presión .*

## 2.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

El primer motor Diesel del mundo fue producido en 1897 por Rudolf Diesel. Este sistema de inyección se utiliza en una variedad de aplicaciones, desde automóviles y vehículos comerciales hasta barcos. Este sistema es el encargado de suministrar el combustible [11]. El motor Diesel opera comprimiendo el aire alcanzando elevadas temperaturas y presión al final de la compresión, posteriormente provocando el proceso de combustión [12].

## 2.2 PARTES DEL SISTEMA DE INYECCIÓN DIESEL

### COMMON-RAIL

Desde el depósito, el combustible es bombeado por una bomba de baja presión, hasta llegar a la bomba de alta presión, la cual alimenta al rail de combustible, ahí mismo el combustible se acumula para su posterior inyección a elevadas presiones de inyección, tal como se muestra en la Figura 2.1.

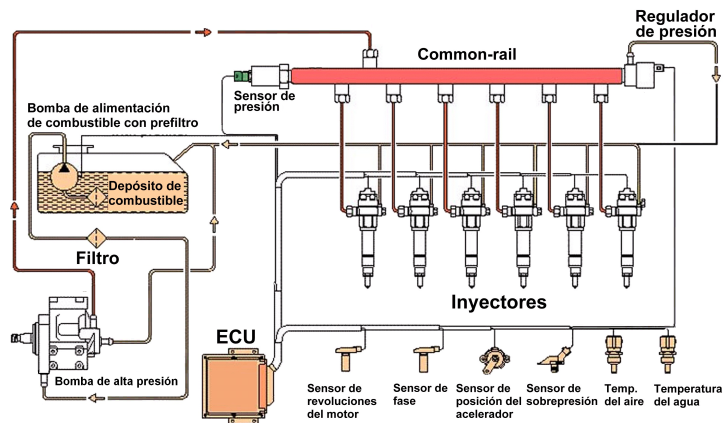


FIGURA 2.1: Esquema del sistema de inyección common-rail

La ECU (por sus siglas en inglés Electronic Control Unit), entre otras de sus funciones es la de controlar la masa de combustible correcta que se deberá inyectar en la cámara de combustión a través de los inyectores para el correcto funcionamiento del motor Diesel [13]. Esta masa depende de los siguientes parámetros:

- Tiempo de apertura del inyector
- Contrapresión
- Presión de inyección
- Permeabilidad de la tobera diésel

## 2.3 INYECTOR DIÉSEL

En el sistema de inyección diésel common-rail actual, se utilizan dos tecnologías de inyectores diésel el inyector tipo solenoide y el tipo piezoeléctrico. El inyector diésel tipo solenoide vibra más que el inyector diésel tipo piezoeléctricas, lo que conduce a más ruido [14]. Por otro lado, el inyector diésel tipo piezoeléctrico consume menos energía y requiere una corriente más baja que un inyector diésel tipo solenoide [14]. La presión del combustible tiende a cerrar la válvula de control de los inyectores piezoeléctricos, pero esta presión puede lograr abrir las válvulas de control en algunos inyectores diésel tipo solenoides, lo cual representa un límite al aumento de la presión máxima en el sistema de inyección common-rail. En los inyectores diésel tipo piezoeléctrico el combustible a alta presión se entrega constantemente al saco de la tobera diésel donde descansa la aguja del inyector, la cual bloquea la inyección de combustible. La presión del combustible tiende a cerrar la válvula de control en los inyectores diésel tipo piezoeléctricos, pero tiende a abrir esta válvula en los inyectores diésel tipo solenoides, la fuga a través de la válvula piloto es mayor para los inyectores diésel tipo solenoides, y esto puede representar un límite al aumento de la presión de inyección. Al energizar el cristal piezoeléctrico, se

abre una válvula en la parte superior de la aguja, y esto permite que el combustible presurizado en la parte superior de la aguja regrese al tanque a través de la línea de retorno. Cuando no se realiza presión en la parte superior de la aguja, esta se abre, permitiendo que se inyecte combustible en la cámara de combustión. Al desactivar el actuador piezoeléctrico, la válvula se cierra y el combustible a alta presión obliga a la aguja a volver a la posición cerrada. El proceso de inyección ocurre en cuestiones de microsegundos [15]. Este proceso se puede visualizar en la Figura 2.2. Donde la Figura 2.2.1 representa el inyector cerrado, la Figura 2.2.2 representa el comienzo del levantamiento de la aguja, la Figura 2.2.3 el inicio del proceso de inyección, el levantamiento de la aguja y la Figura 2.2.4 representa el descenso de la aguja.

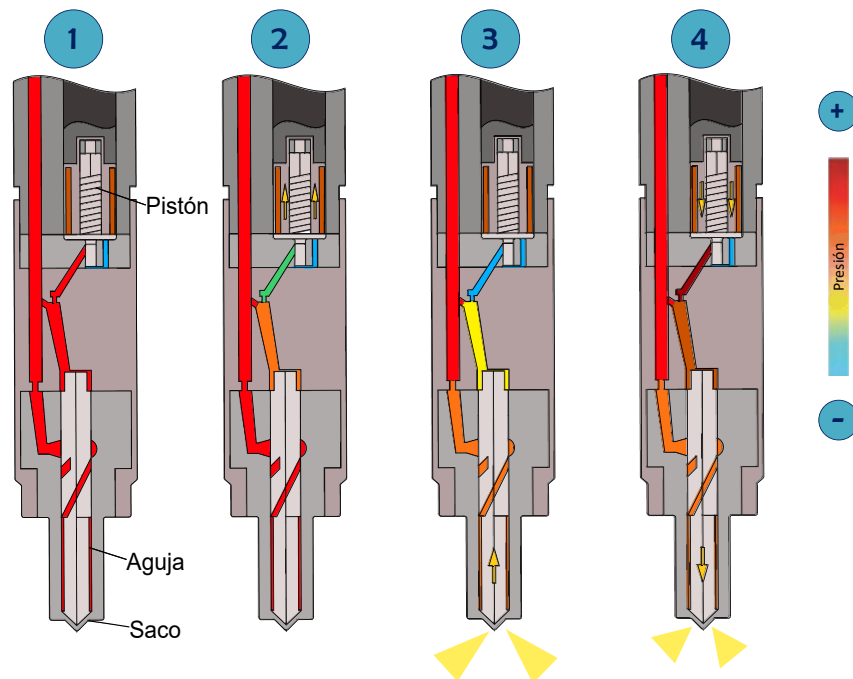


FIGURA 2.2: Funcionamiento del inyector.

## 2.4 CHORRO DE INYECCIÓN

### 2.4.1 PROCESO DE ATOMIZACIÓN

Para llevar a cabo el proceso de visualización de un chorro diésel, se inyecta el combustible en una cámara de combustión a través de la tobera del inyector. El combustible, en este punto, sale en estado líquido y está compuesto por pequeñas gotas, con el propósito de facilitar su evaporación de manera eficiente. A este proceso se le conoce como atomización. Durante la inyección, cuando el combustible se encuentra en estado líquido, está sometido a fuerzas que intentan mantenerlo cohesionado y a fuerzas disruptivas que intentan alterar su estructura. Si las alteraciones superan la fuerza cohesiva, se produce la atomización primaria, pero si las gotas son grandes, el equilibrio entre las fuerzas disruptivas y cohesivas sigue siendo inestable, lo que conduce a la creación de otra ruptura, hasta que las gotas alcanzan un tamaño adecuado para mantener el equilibrio. Este proceso es conocido como atomización secundaria [16].

### 2.4.2 REGÍMENES DE ATOMIZACIÓN

Los regímenes de atomización esta estrechamente relacionados con el número de Reynolds [16], ya que dependiendo de la velocidad del chorro de combustible y el tamaño de sus gotas va a caer en una categoría de los diversos regímenes de de atomización los cuales se explican a continuación:

- **Régimen de Raleigh:** Este régimen es típico en situaciones de velocidades de inyección bajas, generalmente alrededor de 10 metros por segundo. Debido a la acción de la tensión superficial y a las velocidades de inyección reducidas, se produce una atomización en forma de una vena continua. En el régimen de Rayleigh, se generan deformaciones de manera simétrica en el chorro, causadas por perturbaciones en su superficie y la influencia de la tensión superficial. El aumento de estas deformaciones conduce a la formación de gotas con un diámetro uniforme, como se ilustra en la Figura 2.3.
- **Primer régimen inducido por interacción aerodinámica:** es generada en velocidades de inyección que superan los 10 m/s. Por consecuencia el chorro de combustible comienza a oscilar, adquiriendo así una forma helicoidal, esto se debe a las fuerzas aerodinámicas.
- **Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica:** CA medida que la velocidad de inyección aumenta, se producen oscilaciones pequeñas en la vena continua. Estas perturbaciones se amplifican gradualmente hasta dar lugar a la formación de pequeñas gotas que se separan de esta vena intacta.
- **Régimen de atomización:** en este régimen la separación de las gotas diésel se generan a la proximidad de los orificios de la tobera conforme aumenta la presión de inyección. Una consecuencia de las altas velocidades que se experimentan en este régimen es la aparición de fenómenos de cavitación y turbulencia.

Estos regimenes son representados en la Figura 2.3, donde el inciso 1 corresponde al regimen de Raleigh, el inciso 2 régimen inducido por interacción aerodinámica, el inciso 3 el segundo régimen inducido por interacción aerodinámica, el inciso 4 representa el régimen de atomización y el inciso 5 representa régimen de atomización completa causado por el aumento de velocidad.



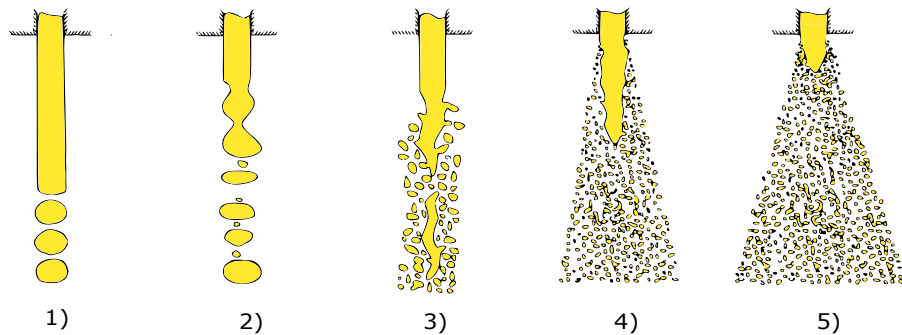


FIGURA 2.3: Regímenes de atomización.

### 2.4.3 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DIÉSEL

La caracterización del proceso de mezcla se puede llevar a cabo a través de la medición de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, estos parámetros son: el área, ángulo y la penetración; o bien a través de los parámetros microscópicos del chorro, tales como el tamaño y la velocidad de las gotas.

## 2.5 ÁREA DEL CHORRO

Este parámetro representa la calidad de la mezcla aire-combustible, este parámetro depende de las condiciones ambientales a las cuales se inyecta. En algunos casos se determina mediante un programa de procesamiento de imagen, donde primero se debe obtener el contorno de la imagen del chorro para su posterior cálculo. En la Ecuación 2.1 se muestra una correlación empírica, realizada por Desantes et al.[17], para determinar el área del chorro.

$$A = 4.351d_2 \sqrt{\frac{\Delta P t - t_0}{p_g d}} \theta \sin \frac{\alpha}{2} \frac{4\pi\theta}{(2 + \theta)^2} \quad (2.1)$$

Donde  $\Delta P$  es la diferencia de presión (la presión de entrada menos la presión de salida a través del orificio de la tobera),  $d$  es el diámetro de la tobera,  $\theta$  es el ángulo del chorro de combustible y  $p_g$  es la densidad del gas.

## 2.6 PENETRACIÓN DEL CHORRO

La penetración es la distancia que es recorrida por el chorro de combustible desde la sección de salida del orificio de la tobera hasta el frente del chorro de combustible. Este parámetro se ve afectado por la contrapresión, la presión de inyección del combustible, la densidad del combustible, el empleo de una estrategia de inyección múltiple y el diámetro de los orificios de la tobera [18], a partir de la experimentación con inyectores diésel con toberas con multiorificios, encontraron una correlación empírica para determinar la penetración del chorro de combustible, la cual se describe en la Ecuación 2.2.

$$S(t) = 0.00243 \cdot (P_a)^{-0.218} \cdot (\Delta P)^{0.575} \cdot (t)^{0.997} \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)^{-0.197} \quad (2.2)$$

donde  $\Delta P$  representa la diferencia entre la presión del ambiente y la presión de inyección,  $t$  es el tiempo que transcurre desde la inyección,  $\theta$  es el diámetro del orificio de la tobera y,  $P_a$  es la densidad del gas.

Hiroyasu et al. [3] consideraron que la penetración del chorro hasta el tiempo de ruptura era una función lineal con el tiempo, mientras que la penetración después de la ruptura inicial progresa con el comportamiento de la raíz cuadrada del diámetro del orificio de la tobera por el tiempo que transcurre, como se observa en las Ecuaciones 2.3 y 2.4.

$$S(t) = 0.39 \cdot \left( \frac{2 \cdot \Delta P}{\rho_l} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot t \quad (2.3)$$

$$S(t) = 2.95 \cdot \left( \frac{\Delta P}{\rho_g} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \sqrt{d_0 \cdot t} \quad (2.4)$$

donde  $S$  es la penetración del chorro;  $t$ , tiempo ;  $\Delta P$ , diferencia de presión a través del orificio de la tobera;  $\rho_l$  , densidad del combustible líquido;  $\rho_g$ , la densidad del ambiente, y  $d_0$  el diámetro de la boquilla.

## 2.7 ÁNGULO DEL CHORRO

Es obtenido por dos rectas paralelas que parten de un origen localizado en la sección de salida del orificio de la tobera, este parámetro esta influenciado por las condiciones a las cuales el combustible es inyectado, la geometría de la tobera, propiedades ambientales de la cámara, y propiedades fisicoquímicas del combustible tales como la densidad

Senda et al. [19] definieron que el ángulo está formado por dos líneas trazadas desde el orificio de la tobera hasta la periferia exterior del chorro a una distancia  $S/3$ , como se muestra en la ecuación 2.5.

$$\tan \frac{\theta}{2} = \frac{W}{\frac{S}{3}} \quad (2.5)$$

donde  $W$  son las líneas rectas que parte desde el orificio de la tobera hasta la periferia exterior del chorro y  $S$  es la penetración del chorro de combustible.

## 2.8 ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN MÚLTIPLE

Existen diferentes estrategias de inyección múltiple, las más comunes son la inyección piloto, post-inyección e inyección dividida. La inyección piloto se caracteriza por realizar una pequeña inyección antes de la inyección principal. La post-inyección

al contrario de la inyección piloto, realiza primero la inyección principal y posterior a ésta se realiza una pequeña inyección. Mientras que la inyección dividida consiste en la realización de dos inyecciones con la misma cantidad de masa.

De acuerdo con la literatura se puede mejorar la eficiencia de la combustión y reducir el ruido del motor con el uso de estrategias de múltiple inyección [20] [21]. La inyección piloto contribuye a reducir las emisiones de NO<sub>x</sub>, y el ruido de la combustión; mientras que la estrategia de post-inyección contribuye en reducir las emisiones de hollín [22] [23] [21] [24]. Otra estrategia que se puede implementar en los motores Diesel para reducir las emisiones contaminantes es la estrategia de inyección dividida.

How et al. [25] hallaron, que la eficiencia térmica del freno se incrementó con una mezcla binaria diésel-biodiésel B20 debido a su contenido de oxígeno inherente. Por otro lado si se aumenta la cantidad de biodiésel a la mezcla binaria, la eficiencia térmica se reduce debido al bajo poder calorífico de las mezclas de biodiesel.

## 2.9 REVISIÓN DE LA LITERATURA

Existen tres clasificaciones de biocombustibles, primera, segunda y tercera generación, los cuales se pueden evaluar a través de diferentes vías; específicamente, a través de caracterizar las propiedades fisicoquímicas del combustible, las emisiones contaminantes, y los parámetros macroscópicos y microscópicos del chorro. Las propiedades fisicoquímicas del biodiesel, tales como la viscosidad, densidad y tensión superficial varían en función de su materia prima. El biodiésel está compuesto por ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME), producidos a través del proceso de transterificación de grasas animales o aceites vegetales.

Hoekman et al. [26], resumieron los perfiles de ácidos grasos de 12 materias primas comunmente empleadas para producir biodiésel, donde concluyeron que no pudieron definir una composición única que sea óptima teniendo en cuenta todas las propiedades fisicoquímicas del combustible; esto debido a las características de los ácidos grasos.

Una de las propiedades fisicoquímicas del biodiésel es el número de cetano, el cual está asociado con la facilidad con la que se autoenciende el combustible dentro de la cámara de combustión. Este número depende de la composición del combustible y puede afectar la capacidad de arranque del motor y las emisiones de escape [27]. Jon Van Gerpen [28] en su evaluación de diferentes tipos de biodiesel concluyó que el número de cetano del biodiésel depende de la distribución del aceite empleado como materia prima para la producción del biodiésel. Cuanto más largas sean las cadenas de carbono de los ácidos grasos y más saturadas las moléculas, mayor será el índice de cetano.

Como se mencionó previamente, una de las vías para evaluar un biocombustible antes de su posterior implementación, es a través de la caracterización de las emisiones contaminantes. Hoekman et al. [29] concluyeron que la literatura presenta inconsistencias en cuanto al origen de las emisiones de NO<sub>x</sub>, se debe a que ningún factor es responsable de estos efectos de manera específica. Más bien, se debe a numerosos factores que contribuyen a su formación y su importancia relativa varía con la tecnología del motor, y las condiciones de operación. Algunas teorías propuestas para ayudar a explicar los efectos del biodiesel en las emisiones de NO<sub>x</sub>, se relacionan principalmente con el efecto del biodiesel en el momento de la inyección, el retraso de la ignición, la temperatura adiabática de la llama, y la pérdida de calor por radiación.

Thiyagarajan et al.[30], llevaron a cabo varias propuestas para la disminución de  $CO_2$  empleando biodiésel derivado del aceite de karanja a una concentración del 100 %, mezclas de biocombustibles de bajo carbono, sistema de captura de carbono posterior a la combustión; oxígeno en la mezcla, y un sistema de tratamiento de precombustión. Concluyendo así que el método con mayor disminución de dióxido de carbono es el que esta asociado con la cantidad de oxígeno en la mezcla.

Un problema actual para la sustitución de los combustibles fósiles por los biocombustibles se debe a sus propiedades fisicoquímicas tales como la tensión superficial, la viscosidad y el poder calorífico. Una de estas propiedades se estudió en el trabajo de Kaisan et al. [31] donde examinaron las propiedades fisicoquímicas del biodiesel puro de jatrofa, árbol de margosa de la india y aceite de algodón, al igual que sus mezclas binarias con diésel, donde se estableció que la mayoría de las muestras de combustible tienen valores caloríficos superiores al mínimo establecido por la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales (ASTM), valores muy cercanos a los del diésel.

Al emplear en un sistema de inyección un 100 % de biocombustible causa problemas como taponamientos en los filtros e inyectores, derivado de la formación de gomas y sedimentos, similarmente este combustible, provoca un peor proceso de mezcla aire-combustible en comparación al diésel [32] [33]. Este efecto se puede observar con mayor claridad en el estudio de Komariah et al. [34], en donde investigaron el perfil y mecanismo de obstrucción del filtro debido al uso de biodiesel y sus mezclas, empleando filtros que cuentan con un cartucho elaborado de materiales sintéticos porosos. Dando como resultado que el filtro que estuvo en contacto con la mezcla binaria B20 se obstruyó de manera rápida en comparación al filtro donde se utilizó diésel.

Por estos motivos comúnmente se realizan mezclas binarias diésel-biodiésel para disminuir estos inconvenientes provocados por el biodiésel [33]. También existen diversos aditivos como lo son los alcoholes que pueden mejorar el proceso de atomización; como es el caso de Liz corral et al. [1], donde estudiaron mezclas ternarias diésel-biodiésel- alcohol DB20E5, DB30E5, DB40E5, DB30E10, DB40E10 DB30E20 evaluando las características macroscópicas, en donde ellos descubrieron que al aumentar la proporción de mezcla de etanol, se produce una disminución de la viscosidad cinemática, tensión superficial de las mezclas de biodiesel-etanol diésel y la densidad. Estos cambios afectan los parámetros macroscópicos del chorro, esto se puede apreciar en las Figuras 2.4 y 2.5. Específicamente, observaron que la mezcla BD20E5 presenta un comportamiento similar al diésel cuando se utilizan niveles de presión de inyección de 100 y 130 MPa.

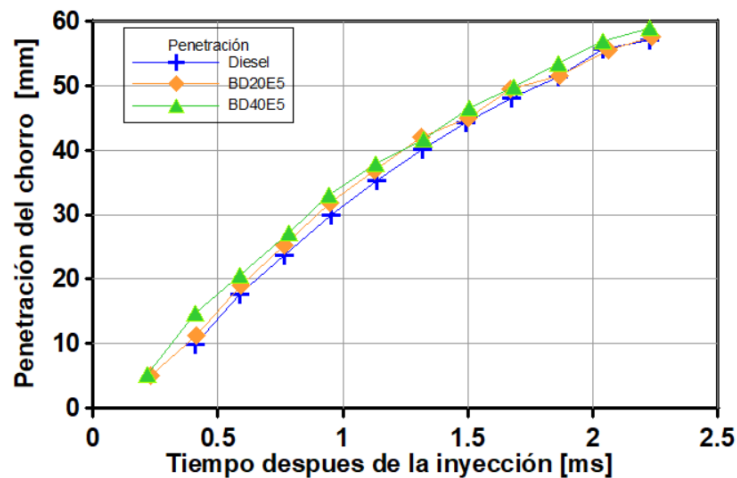


FIGURA 2.4: Evoluciones temporales del chorro de combustibles, resultante de emplear una presión de inyección de 130 MPa, y mezclas ternarias diésel-biodiésel-etanol(Adaptado de Liz et al. [1]).

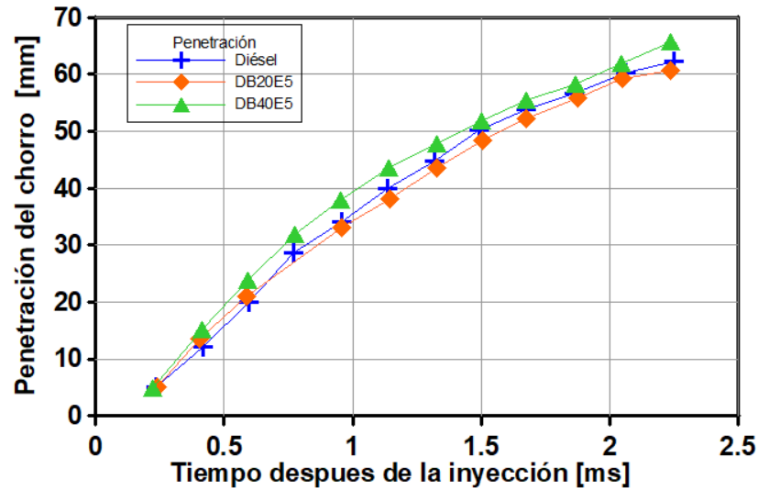


FIGURA 2.5: Evoluciones temporales del chorro de combustibles, resultante de emplear una presión de inyección de 130 MPa, y mezclas ternarias diésel-biodiésel-etanol (Adaptado de liz et al. [1]).

Rajendra et al. [35] analizaron la influencia de una mezcla ternaria de diésel-biodiésel-propano B10PROP20; encontrando una reducción de las emisiones de NO-xen el rango de 10.11 a 16.13 %, y de 22.51 a 51.41 % en comparación con el diésel y la mezcla binaria B30, respectivamente, y también encontraron una mejora del rendimiento del motor y la combustión.

Behcket et al. [36] Investigaron las emisiones de CO y HC generadas de una mezcla binaria B25 de un biodiésel derivado de aceite de pescado. Las emisiones fueron comparadas con las generadas por el diésel mineral, dando como resultado una disminución del 20.82 % de emisiones para el caso del CO y una disminución del 16.49 % en HC, en comparación a las generadas por el diésel. También se observó una disminución en la densidad del humo de las emisiones en un 15.36 %.



De acuerdo con Marina et al. [37] las propiedades fisicoquímicas tales como la viscosidad y la tensión superficial influyen en el desarrollo del chorro de combustible, el cual afecta a las características del proceso de combustión.

Para entender el comportamiento del proceso de combustión, primero es necesario analizar el proceso de mezcla, el cual se puede caracterizar a través de la visualización de los parámetros macroscópicos del chorro diésel. Allen et al. [38], analizaron el proceso de atomización de 15 diferentes tipos de biocombustibles a través de la medición del diámetro medio de Sauter, y de la distribución de Rosin-Rammler. Encontrando así que las viscosidades de los biodiésels de éster metílico pueden variar hasta en un 100 % y pueden ser un factor que contribuya a la diferencia de rendimiento en el proceso de atomización entre algunos biodiésels. La diferencia en el diámetro medio de Sauter entre algunos biodiésels es del orden de 32 %. Sin embargo, es similar para los aceites que contienen principalmente ácidos grasos insaturados C18. También encontraron que los aceites con un bajo número de carbono tienen un diámetro medio de Sauter menor en comparación a los aceites con un alto número de carbono; y los aceites con cadenas insaturadas presentan diámetro medio de Sauter moderado. También encontraron que las características de atomización del biodiésel con éster metílico (ME) derivado de aceite de coco no fueron significativamente diferentes de las del diésel con un nivel de confianza del 95 %.

El proceso de combustión en un motor diésel se ve afectado por las características de los procesos de atomización y mezcla. Por lo tanto, las características del chorro diésel son esenciales estudiarlas para comprender el proceso de combustión [39]. El desarrollo del chorro de combustible es complejo e involucra un flujo multifásico y varios fenómenos físicos como la cavitación, la turbulencia en el interior del orificio de la tobera, la atomización primaria y secundaria, la evaporación, y la coalescencia. No obstante, los parámetros macroscópicos del chorro de combustible tales como el ángulo, la penetración y el área del chorro, son esenciales para comprender los procesos de atomización y mezcla.

Esta comprensión de las características macroscópicas de un biodiesel contribuye a mejorar el proceso de mezcla aire-combustible. Desantes et al. [40], realizaron varios experimentos usando diésel mineral con un 5.75% de éster metílico de colza denominado B5, otro con un 30%, y un combustible de éster metílico de colza puro, en condiciones no evaporativas. Dando como resultado las siguientes observaciones: la dinámica de la aguja del inyector se ve afectada por elevados valores de viscosidad del biodiesel, específicamente, la aguja del inyector se levanta más lentamente. El biodiesel puro tiene una velocidad efectiva más lenta que las mezclas B5 y B30, debido a su mayor densidad, y que la tensión superficial afecta de manera significativa el desarrollo del chorro. El biodiesel provoca gotas de mayor tamaño en comparación a las del diésel, a raíz de las disparidades en los niveles de tensión superficial y viscosidad.

Las características del chorro de combustible, dependen principalmente de la presión de inyección, la densidad del combustible, la viscosidad del combustible, la contrapresión, y la temperatura ambiente. Argawal et al. [41], investigaron el efecto de la presión ambiental en el chorro de biodiésel de Karanja. Ellos encontraron, que un aumento en la presión ambiente provoca una disminución de la penetración del chorro, un aumento del ángulo y área del chorro. Adicionalmente, observaron que los valores de la penetración, ángulo y área del chorro correspondientes al biodiesel puro son más altos en comparación a los de las mezclas binarias diésel-biodiesel, e indicando que este comportamiento puede ser atribuido a las diferencias en los valores de densidad.

En los últimos años se han estudiado diferentes biocombustibles derivados de diferentes materias primas, tales como soya, maíz, karanja, higuierilla, entre otros, donde se han observado diferentes limitantes, como el bajo poder calorífico, la alta viscosidad y densidad, que tienen estos biocombustibles a comparación a un diésel mineral, se han propuesto diversas vías con el fin de contrarrestar estas limitantes, una de ellas es la implementación de un aditivo. Los alcoholes suelen ser los aditivos comúnmente empleados. Por ejemplo L.Corrall et al.[1] analizaron los parámetros

macroscópicos del chorro empleando una mezcla ternaria diésel biodiesel-etanol, concluyendo que al aumentar la cantidad de alcohol en la mezcla se reduce la densidad, y la viscosidad cinemática de la mezcla, provocando una reducción en la penetración y ángulo de chorro.

En el estudio de los parámetros macroscópicos de los biocombustibles, se busca que el biocombustible a estudiar tenga resultados similares a los que presenta el diésel. Para ello, se llevan a cabo mezclas binarias, ternarias o cuaternarias, compuestas principalmente de alcoholes, biodiésels derivados de diferentes materias primas, y diésel [42] [43]. Estas mezclas buscan disminuir algunas propiedades fisicoquímicas tales como la viscosidad y la densidad, con el fin de equipararlas con las del diésel.

Otra vía explorada para lograr que un biodiesel tenga un comportamiento similar al diésel, es empleando elevados niveles de presión de inyección. Wang et al. [2], estudiaron los parámetros macroscópicos del chorro diésel utilizando aceite de palma (BDFp) y aceite usado de cocina (BDFc), y aplicando niveles elevados de presión de inyección en el rango de 100 a 300 MPa. En los primeros microsegundos posteriores al inicio de la inyección, observaron que la penetración del chorro de aceite usado de cocina era similar a la del diésel al aumentar la presión de inyección a 100 MPa y 200 MPa, como se muestra en las Figuras 2.6 y 2.7. Además, notaron que la penetración del BDFp era semejante a la del diésel durante toda su evolución temporal cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 300 MPa, como se ilustra en la Figura 4.8.

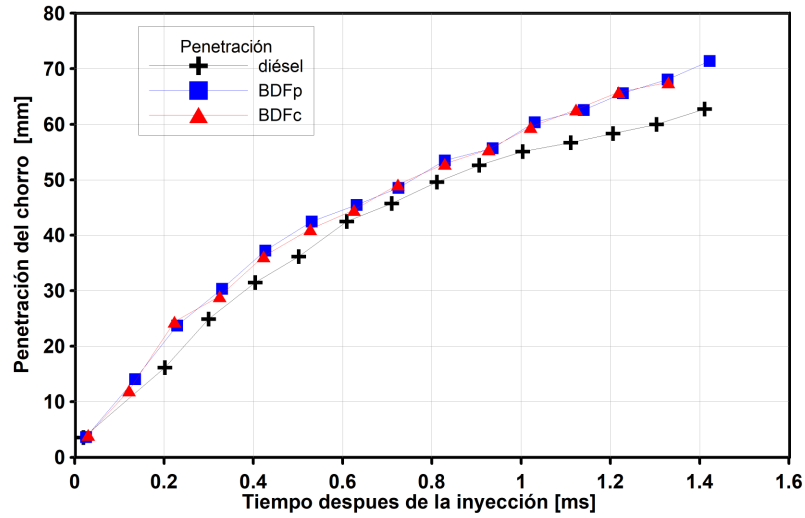


FIGURA 2.6: Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas al emplear el nivel de presión de 100 MPa, el diésel, y las mezclas binarias diésel- biodiésel (Adaptado de Wang et al .[2]).

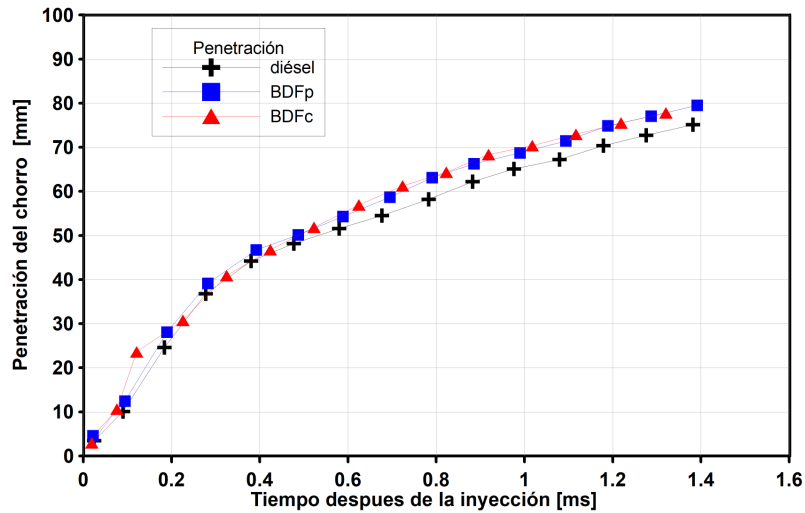


FIGURA 2.7: Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas al emplear el nivel de presión de 200 MPa, el diésel, y las mezclas binarias diésel- biodiésel (Adaptado de Wang et al .[2]).

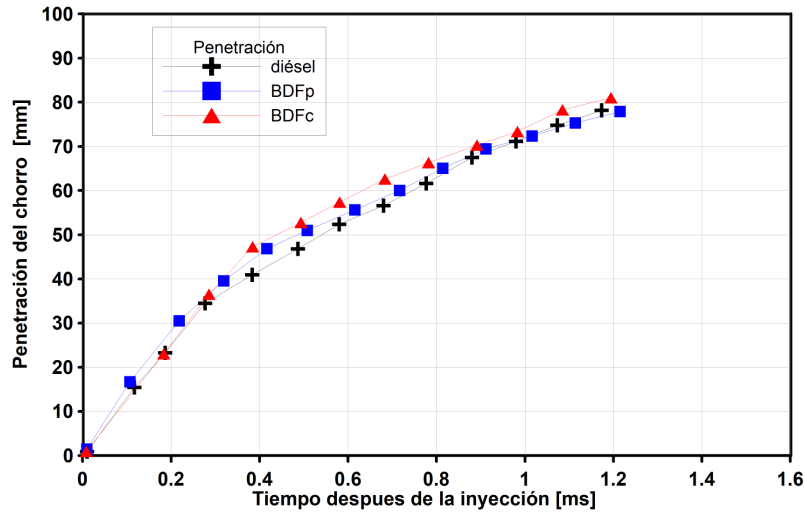


FIGURA 2.8: Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas al emplear el nivel de presión de 300 MPa, el diésel, y las mezclas binarias diésel-biodiésel (Adaptado de Wang et al. [2]).

Bohl et al. [3], en su investigación, examinaron las características macroscópicas del chorro utilizando varios tipos de combustibles, incluyendo aceite vegetal hidrotratado (HVO), éster metílico de aceite de soya (SME), éster metílico de aceite usado de cocina (UCOME), éster metílico de aceite de palma (PME), así como diésel como referencia. Estos experimentos se llevaron a cabo a niveles de presión de inyección de 100 MPa y 180 MPa. Sus hallazgos revelaron que los valores de penetración del chorro eran idénticos para todos los combustibles estudiados, como se ilustra en la Figura 2.9.

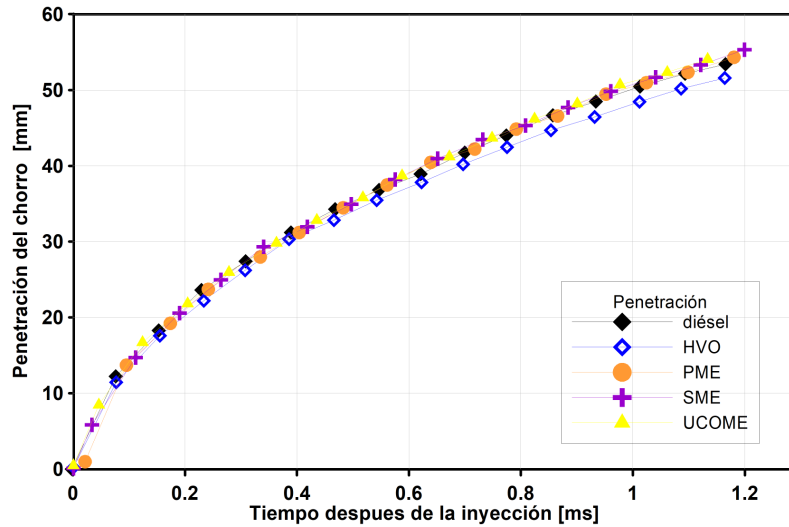


FIGURA 2.9: Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas al emplear un nivel de contrapresión de 7 MPa, un nivel de presión de inyección de 180 MPa, diésel, y biodieseles derivados de diferentes materias primas. (Adaptado de Bohl et al. [3]).

Al momento de emplear elevadas presiones de inyección, también se eleva la temperatura del combustible, esto puede implicar pequeñas modificaciones en los parámetros macroscópicos, y esto se debe a la disminución de la viscosidad por el aumento de la temperatura. Moch et al. [4], estudiaron la influencia de la temperatura del combustible sobre los parámetros macroscópicos del chorro, empleando mezclas binarias biodiesel-gasolina. Ellos, encontraron un incremento de 20 en el ángulo, y una disminución de 5 mm en la penetración del chorro, al elevar la temperatura del combustible en un rango de 30 a 100 °C, tal como se muestra en la Figura 2.10.

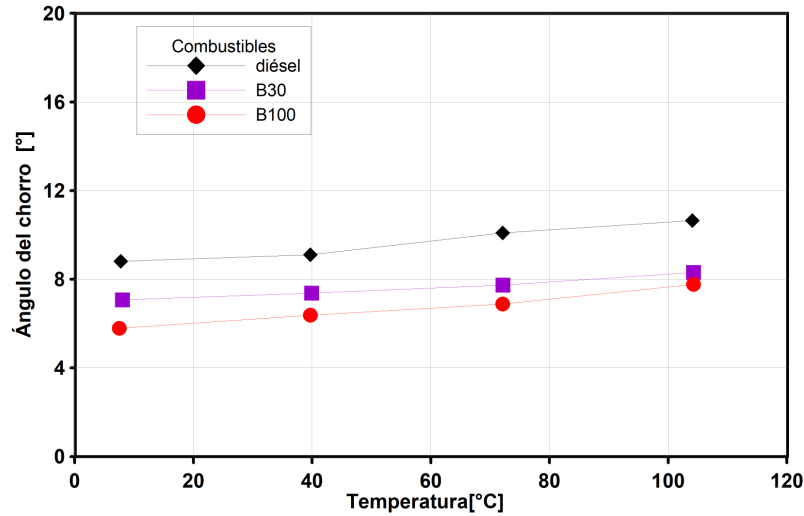


FIGURA 2.10: Variación del ángulo del chorro con la temperatura para el diésel, y las mezclas binarias B30 y B100 (Adaptado de Moch et al. [4]).

Joonsik Hwang et al. [5], en su investigación, se centraron en las características macroscópicas del chorro y el proceso de combustión utilizando biodiésel (B100) derivado de aceite usado de cocina (WCO) y diésel como referencia. Realizaron experimentos con niveles de presión de inyección de 160 y 180 MPa. Sus observaciones revelaron que el biodiésel mostraba una mayor penetración y un ángulo del chorro menor en comparación con el diésel para los niveles de presión de inyección que fueron analizados. También notaron una similitud en la penetración del chorro entre el biodiésel y el diésel cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 160 MPa, mientras que para el nivel de 180 MPa, se observaron diferencias entre ambos combustibles. Las Figuras 2.11 y 2.12 ilustran las evoluciones temporales del ángulo y la penetración para el biodiésel obtenido del aceite usado de cocina, el diésel, y los niveles de presión de inyección de 160 MPa y 180 MPa.

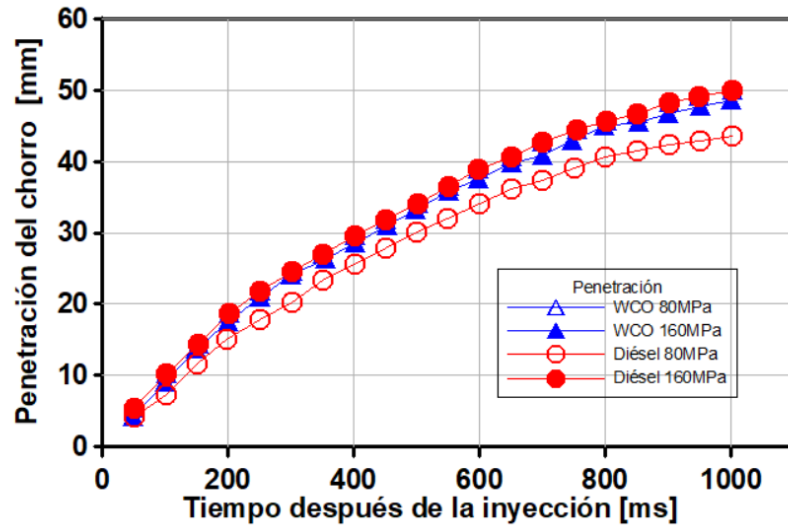


FIGURA 2.11: Evoluciones temporales de la penetración del chorro empleando biodiesel, diésel, y los niveles de presión de inyección de 80 MPa y 160 MPa (Adaptado de Hwang et al. [5]).

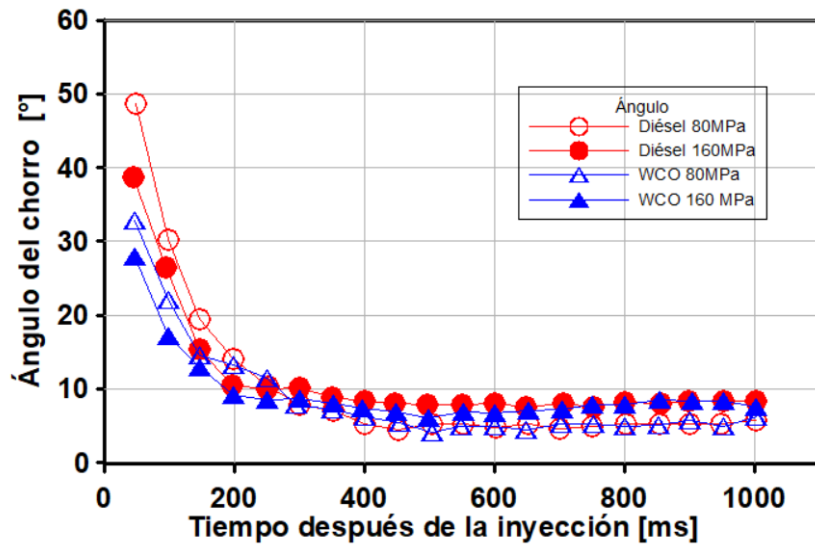


FIGURA 2.12: Evoluciones temporales del ángulo del chorro empleando biodiesel, diésel, y los niveles de presión de inyección de 80 MPa y 160 MPa (Adaptado de Hwang et al. [5]).



Meshack et al. [6], estudiaron la Influencia de la presión de inyección y la contrapresión sobre el comportamiento del chorro diésel, empleando tetradecano como sustituto del diésel, oleato de metilo como sustituto del biodiesel, y un rango de niveles de presión de inyección de 50 MPa a 150 MPa . Ellos, encontraron que la presión de inyección, y la densidad ambiental tiene un efecto significativo sobre el comportamiento del chorro. Específicamente, ellos observaron que un aumento en el nivel de presión de inyección de 50 MPa a 150 MPa provoca un incremento en la penetración del chorro del orden del 33.3%, 21.5% y 24.4% para el diésel, el tetradecano, y el oleato de metilo, respectivamente. En las Figuras 2.13 y 2.14, se muestran las evoluciones temporales de la penetración y el ángulo del biodiesel, diésel, obtenidas al emplear los niveles de presión de inyección de 50 MPa y 150 MPa.

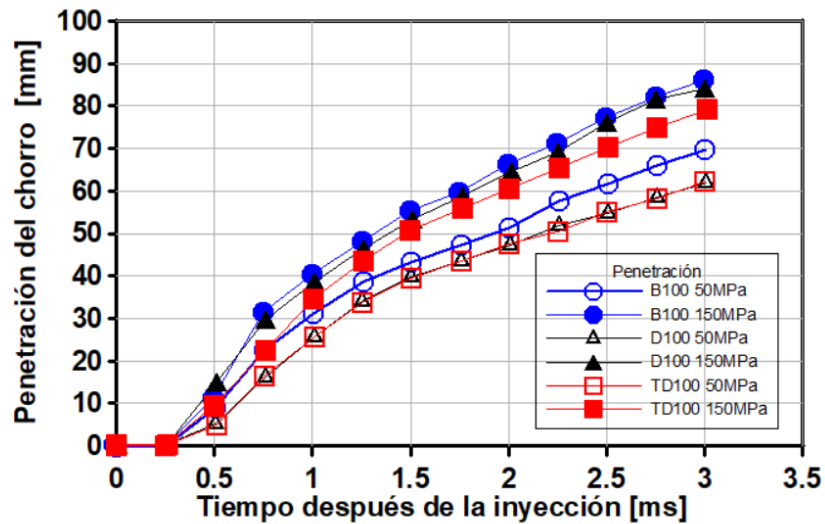


FIGURA 2.13: Evoluciones temporales de la penetración del chorro, obtenidas al emplear biodiesel, diésel, empleando tres de presiones de inyección de 50 MPa y 150 MPa (Adaptado de Meshack et al. [6]).

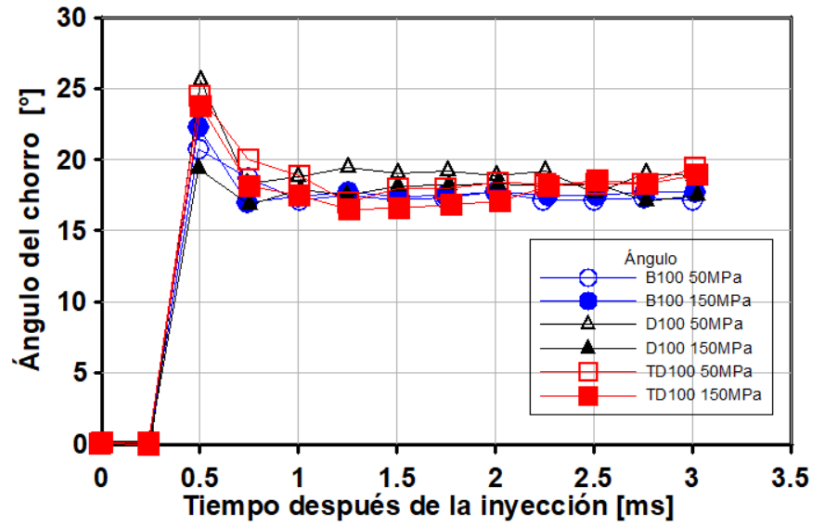


FIGURA 2.14: Evoluciones temporales del ángulo del chorro, obtenidas al emplear biodiesel, diésel, empleando tres de presiones de inyección de 50 MPa y 150 MPa (Adaptado de Meshack et al. [6]).

El proceso de inyección se lleva a cabo cuando se tiene un levantamiento de la aguja del inyector. En la Figura 2.15, se muestra un diagrama de la tobera, la punta de la aguja, y el saco. La aguja al ser parte del proceso de atomización es clave importante el desarrollo del chorro de combustible.

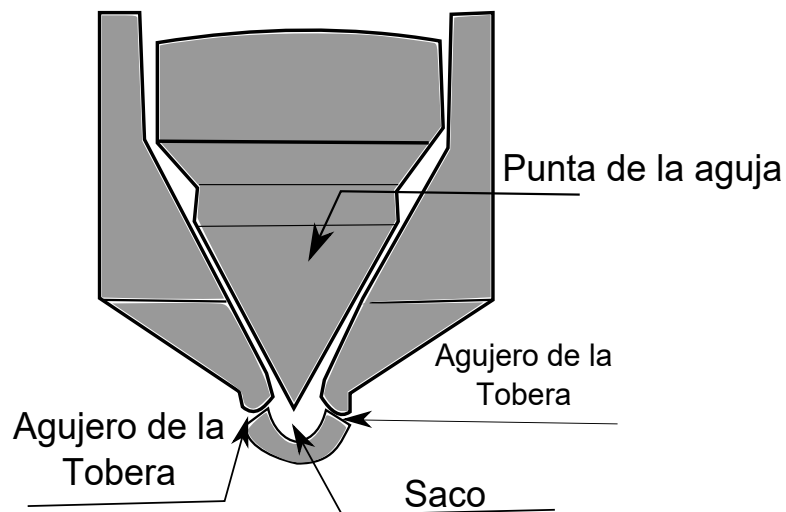


FIGURA 2.15: Esquema de una tobera diésel.

Por ejemplo, en el estudio realizado por Pratamá et al. [7], se analizó el impacto del ascenso de la aguja del inyector diésel en las características del chorro cercano a la tobera. Observaron que la elevación de la aguja del inyector afecta al flujo del vórtice dentro del saco de la tobera, lo que ocasiona una modificación en el ángulo del chorro. En la Figura 2.16, se presenta la elevación de la aguja en tres niveles de presión de inyección: 100 MPa, 150 MPa y 200 MPa, junto con dos duraciones de pulso eléctrico, 0.5 ms y 1 ms. A partir de estos resultados, se evidenció que el desplazamiento de la aguja del inyector varía según la presión de inyección y la duración del pulso eléctrico. Como conclusión, se determinó que a una presión de inyección más alta y una mayor duración del pulso eléctrico provocan un aumento en la elevación de la aguja del inyector, lo cual afecta la dinámica del chorro. La elevación de la aguja baja corresponde al período transitorio del proceso de inyección de combustible, mientras que la elevación de la aguja alta corresponde al estado estable del proceso de inyección.

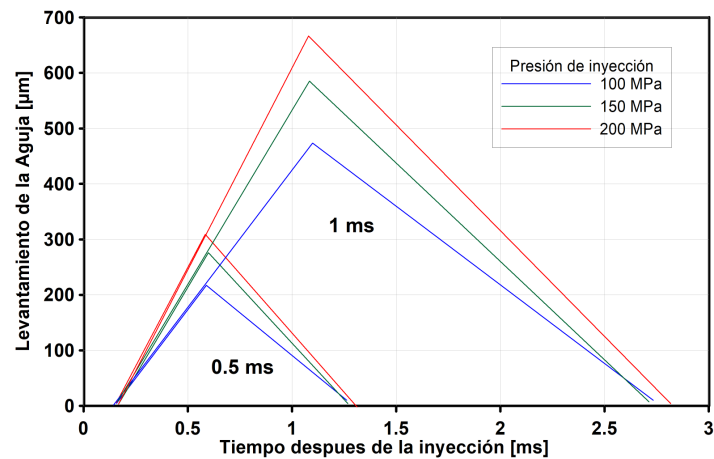


FIGURA 2.16: Levantamiento de la aguja del inyector diésel obtenidas al emplear a tres niveles de presión de inyección 100 MPa, 150 MPa, y 200 MPa, y dos tiempos de energización 0.5 ms y 1.0 ms (Adaptado de Pratama et al. [7]).

Stegemann et al. [8] analizaron la tasa de inyección, la velocidad del chorro, la penetración y ángulo del chorro en condiciones no evaporativas, empleando biodiésel derivado de colza B100, y mezclas binarias diésel-biodiésel B05 y B0. Ellos, concluyeron que la densidad del combustible afecta a la velocidad de inyección, provocando un levantamiento lento de la aguja. En la Figura 2.18 se muestra la Amplitud de los ángulos del diésel para un levantamiento de aguja rápido y para un levantamiento de aguja lento.

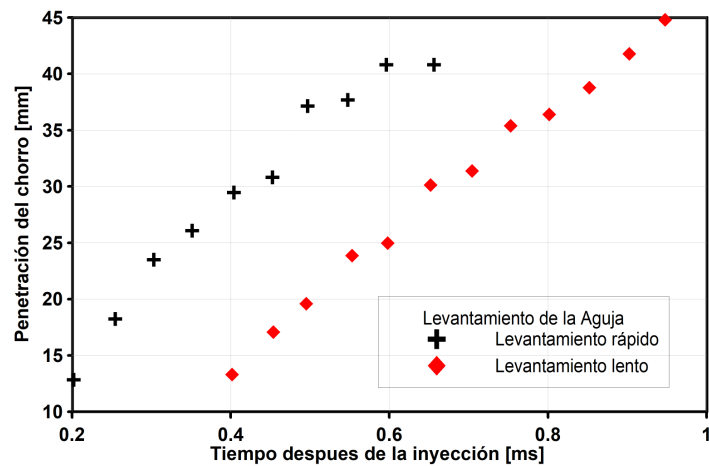


FIGURA 2.17: Evoluciones temporales de la penetración del chorro obtenidas a un levantamiento rápido de la aguja, y a un levantamiento lento de la aguja. (Adaptado de Stegemann al.[8])

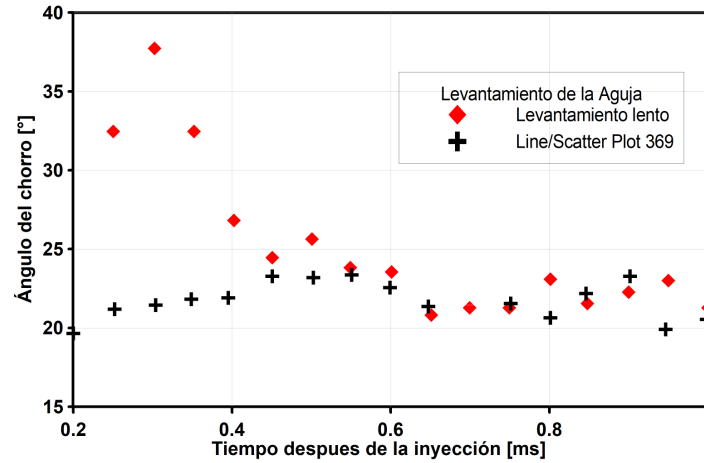


FIGURA 2.18: Evoluciones temporales del ángulo del chorro obtenidas a un levantamiento rápido de la aguja, y a un levantamiento lento de la aguja. (Adaptado de Stegemann al. [8])

Desantes et al. [40], analizaron la velocidad del chorro, la tasa de inyección, el ángulo del chorro y la penetración en condiciones no evaporativas, empleando biodiésel derivado de colza B100, y mezclas binarias diésel-biodiésel B05 y B0. Ellos, concluyeron que la densidad del combustible afecta a la velocidad de inyección, provocando un levantamiento lento de la aguja.

## CAPÍTULO 3

# PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

---

*Dentro de este capítulo se presenta la síntesis de la revisión bibliográfica, a partir de la cual se establece la hipótesis, el objetivo general, y objetivos específicos. Finalmente, se presenta la metodología general que se empleará para lograr los objetivos definidos.*

### 3.1 SÍNTESIS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con el fin de disminuir las emisiones contaminantes, tales como los  $NO_x$ , CO,  $CO_2$  y partículas con el propósito de reducir las emisiones perjudiciales para el medio ambiente, tales como los  $NO_x$ , CO,  $CO_2$ , y partículas, se han explorado diferentes vías, una de ellas es el uso de los biocombustibles. Existen varias vías para evaluar un biodiesel para su posterior implementación en los motores Diesel. Una de ellas es midiendo las emisiones contaminantes [44]; otra es a través de la visualización de proceso de combustión, específicamente, la caracterización de las partículas de hollín. Finalmente, la otra vía consiste en la visualización de los parámetros macroscópicos del chorro, tales como el área, la penetración, y el ángulo del chorro, los cuales caracterizan el proceso de mezcla [39].

La literatura acerca de las características macroscópicas de biodiésel, es menos extensa que la literatura centrada en emisiones contaminantes utilizando biodiesel. Gran parte de la literatura se centra en biodiésel derivados de materias primas asequibles como lo es la soya, palma y karanja. En cuanto a la literatura sobre el biodiesel derivado de aceite usado de cocina, existen estudios en donde éste ha sido evaluado a diferentes niveles de presión de inyección [45], específicamente, niveles de presión de inyección que están en el rango de 50 a 130 MPa; y mezclado con el diésel mineral, en las siguientes proporciones B10, B20, B50, y B100 [39], en estas investigaciones, se ha observado que los biodiésel, debido a sus elevados valores de tensión superficial, viscosidad y densidad, generan una mayor penetración del chorro y un ángulo de chorro más reducido en comparación con el diésel.

Una vía para reducir las emisiones contaminantes, es disminuyendo el uso de los combustibles fósiles, mediante el empleo de los biocombustibles. Es por ello, que muchos investigadores se han centrado en analizar la influencia de la mezclas binarias diésel-biodiesel sobre el proceso de combustión y el de formación de emisiones contaminantes, así como en los parámetros microscópicos del chorro. En el caso de los

parámetros macroscópicos del chorro, se busca que la mezcla binaria diésel-biodiesel tenga un mejor proceso de mezcla en comparación al del diésel. Como se destacó en el capítulo anterior algunos trabajos han encontrado que los parámetros macroscópicos del chorro utilizando mezclas binarias diésel-biodiesel, y elevados niveles de presión de inyección, tienden a tener un comportamiento similar al del diésel. A partir de lo anterior se puede destacar que la proporción de biodiesel en la mezcla binaria se puede incrementar utilizando elevados niveles de presión de inyección.

Finalmente, se puede destacar la importancia de analizar el comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro utilizando mezclas binarias diésel-biodiesel, y elevados niveles de presión de inyección. Es por ello que uno de los objetivos de presente trabajo se centra en la puesta a punto de un sistema de inyección diésel common-rail capaz de alcanzar un nivel de presión de inyección de 200 MPa.

## 3.2 HIPÓTESIS

Los elevados valores de viscosidad, tensión superficial y densidad del biodiesel en comparación al diésel mineral provocan un peor proceso de mezcla. Al aumentar la presión de inyección estas propiedades cambian, por lo tanto, se plantea que, al aumentar la presión de inyección, se puede añadir una mayor proporción de biodiesel en la mezcla binaria diésel-biodiesel y esta mezcla pueda tener un comportamiento similar al diésel.



## 3.3 OBJETIVOS

### 3.3.1 OBJETIVO GENERAL

Puesta a punto de un nuevo sistema de inyección diésel common-rail para evaluar el comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, empleando mezclas binarias de diésel y biodiésel, empleando elevados niveles de presión de inyección.

### 3.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Puesta a punto de un nuevo sistema de inyección diésel common-rail, capaz de alcanzar niveles de presión de inyección de 200 MPa.
- Definición y caracterización de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla binaria diésel-biodiesel.
- Caracterizar el proceso de mezcla mediante el análisis los parámetros macroscópicos del chorro, tales como la penetración, ángulo, y área del chorro.

### 3.4 METODOLOGÍA GENERAL

En la Figura 3.1, se muestra un diagrama de la metodología general, que se empleará en el presente estudio para alcanzar los objetivos previamente descritos.



FIGURA 3.1: Metodología general de la tesis

- **Puesta a punto de un nuevo sistema de inyección diésel common-rail:** Esta etapa consiste en la puesta a punto de un sistema de inyección diésel common-rail conceptualmente similar al desarrollado por Omar Torres [46], el cual alcanza un nivel de presión máximo de inyección de 130 MPa. Este nuevo sistema es capaz de alcanzar un nivel de presión de inyección de 200 MPa, dado que ahora éste está constituido de una bomba de alta presión de la marca Bosch, modelo CP4.2, mangueras de alta presión, un common-rail, entre otros componentes que se abordarán en el siguiente capítulo. .
- **Validación de la instalación experimental:** Esta etapa consiste en reproducir condiciones de operación en la instalación experimental que se ha puesto a punto, y que están reportadas en la literatura. Con el fin de comparar los resultados sobre los parámetros macroscópicos del chorro reportados en la literatura, con los obtenidos en la instalación experimental; y así de esta manera averiguar la robustez de dicha instalación experimental.
- **Selección y caracterización de combustibles:** Esta etapa consiste en la selección, y caracterización de las propiedades fisicoquímica de los combustibles.
- **Visualización del chorro de combustible:** Esta etapa consiste en la visualización del chorro de combustible. Para ello, se emplea la instalación de visualización a volumen constante.
- **Procesamiento de imágenes del chorro líquido:** Esta etapa consiste en la determinación de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, tales como el ángulo, penetración, y área del chorro. Para ello, se emplea un programa desarrollado en MATLAB.
- **Resultados y análisis:** Esta etapa consiste en la representación gráfica de los resultados obtenidos relacionados con los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, para su posterior análisis.

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA DE LA TESIS

---

*En este capítulo se describe el nuevo sistema de inyección de combustible, los elementos más importantes de este nuevo sistema de inyección, el plan de trabajo, los parámetros de operación, para la caracterización de los parámetros macroscópicos de la mezcla binaria disel-biodisel, así como el posterior procesamiento de las imágenes adquiridas del chorro de combustible para determinar dichos parámetros macroscópicos.*

## 4.1 HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

En la Figura 4.1, se representa un diagrama del sistema de inyección diésel common-rail actual, el cual incluye componentes como un circuito de baja presión, un circuito de alta presión, un sistema de inyección, un sistema de refrigeración, una cámara de volumen constante, un sistema de iluminación, una cámara de alta velocidad, un control para la energización del inyector, y la regulación de la presión. El nuevo sistema de inyección esta conformado por dos sistemas, el hidráulico y el de control, el sistema hidráulico esta conformado por el tanque de almacenamiento de combustible, la bomba de alta presión y los intercambiadores de calor, el inyector y el common-rail, mientras que el sistema de control esta conformado por el generador de señal, la unidad de inyección la cual energiza al inyector y el controlador de presión el cual regula la presión a la cual se inyectará el combustible. En este trabajo se detallará el sistema hidraulico, los detalles sobre el sistema de control y la cámara a volumen constante se pueden encontrar en el trabajo de Torres [46].

### 4.1.1 INSTALACIÓN DE VISUALIZACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

La Figura 4.2, se muestra la instalación de visualización a volumen constante, esta instalación está conformada por una cámara a volumen constante, un sistema de iluminación directa por dispersión MIE, un sistema de inyección y el empleo de una técnica óptica de visualización del chorro. La cámara a volumen constante tiene tres accesos ópticos, dos que se emplean para iluminar el chorro de combustible, mientras que el otro se emplea para visualizar el chorro de combustible. Esta cámara se presuriza con nitrógeno con el propósito de simular las condiciones que se experimentan en un motor diésel [46]. . Esta cámara se puede apreciar en la Figura 4.2.

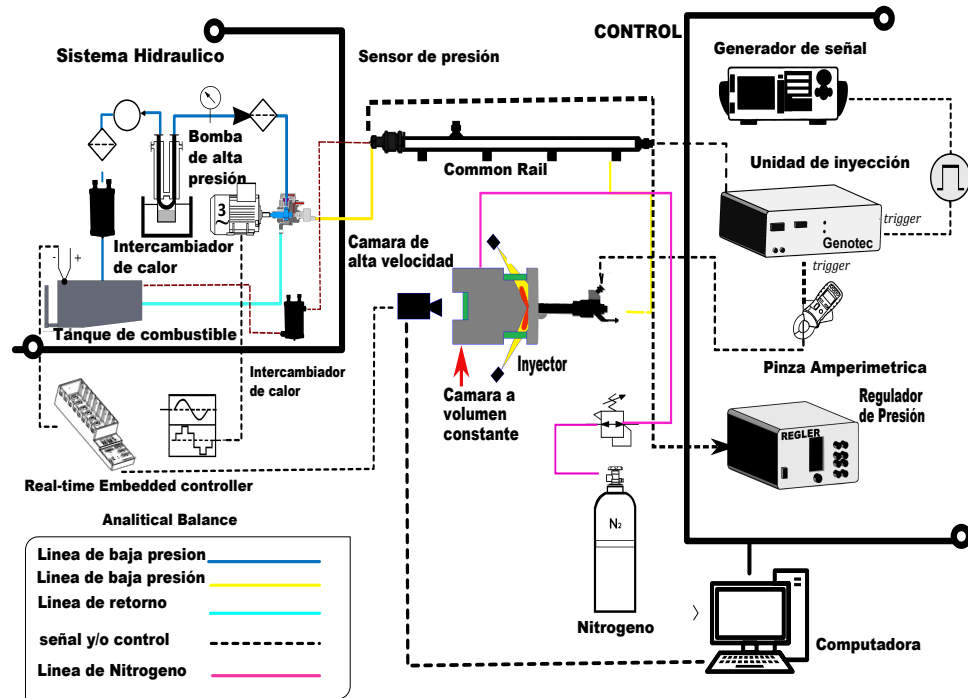


FIGURA 4.1: Diagrama de la instalación experimental para la caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible.

#### 4.1.2 NUEVO SISTEMA DE INYECCIÓN

El sistema de inyección como se destacó previamente, está conformado por dos sistemas, uno de baja y uno de alta presión.

Específicamente, el sistema de baja presión está conformado por un tanque de combustible, filtros, bomba de flujo continuo y un regulador de control del flujo. Por otro lado, el sistema de alta presión está constituido por un variador de frecuencia, motor eléctrico, una bomba de inyección de alta presión y un sistema de inyección diésel common-rail.

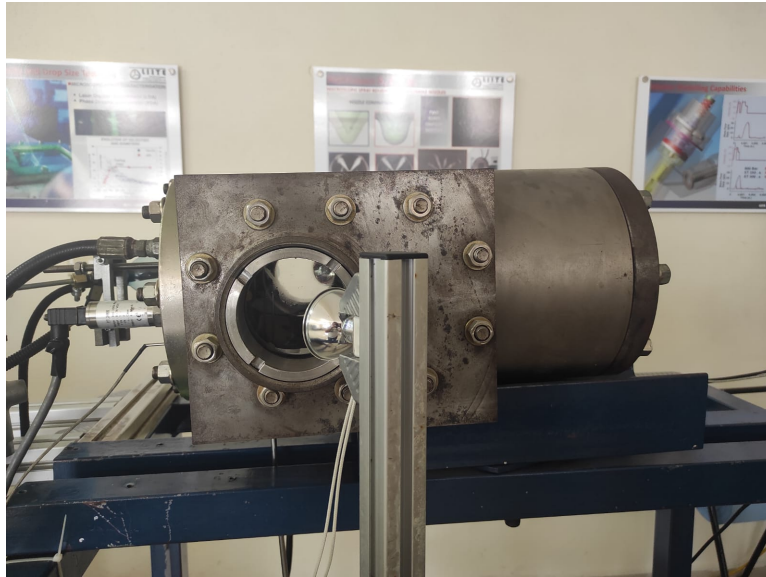


FIGURA 4.2: Vista lateral.

#### 4.1.2.1 SISTEMA DE BAJA PRESIÓN

##### **Depósito de combustible**

La Figura 4.3 muestra el depósito de combustible, el cual posee una capacidad de 20 litros y se encuentra situado en la parte trasera de la instalación. Este depósito cuenta con una línea que se conecta a un purgador de aire equipado con una válvula diseñada para expulsar el aire atrapado en el sistema, con el propósito de prevenir problemas en el sistema de inyección

##### **Filtros**

Se muestra un par de filtros en la Figura 4.4, los cuales se han incorporado en el nuevo sistema de inyección, con la finalidad de prevenir la entrada de elementos no deseados. Ambos filtros son del tipo cartucho, el primer filtro se ha instalado en la entrada de la bomba de baja presión, mientras que el segundo filtro se encuentra en la entrada del sistema de alta presión.

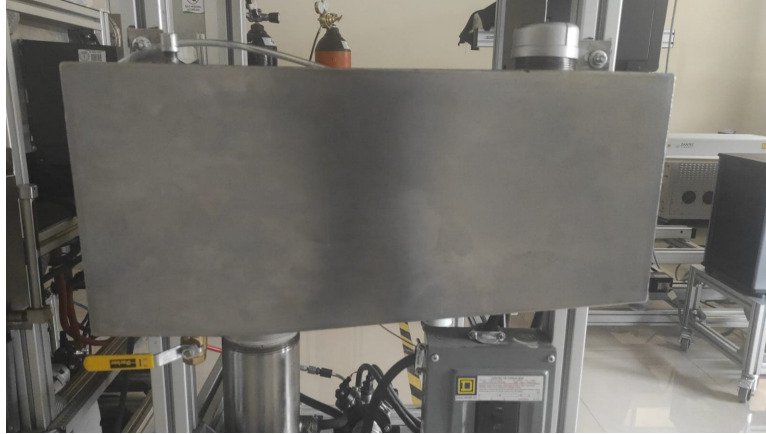


FIGURA 4.3: Depósito de combustible.



FIGURA 4.4: Filtros.

### Bomba de baja presión

La bomba de baja presión se muestra en la Figura 4.5, ésta trabaja con un voltaje de 12 V generando una presión de 0.4 MPa .Esta bomba circula el combustible desde el depósito hacia la bomba de alta presión, posteriormente el combustible se presuriza y es enviado al rail para su posterior inyección.





FIGURA 4.5: Bomba de baja presión

#### 4.1.2.2 SISTEMA DE ALTA PRESIÓN

##### **Motor eléctrico**

Se muestra en la Figura 4.6 el motor eléctrico de corriente alterna de la marca SIEMENS, modelo GP100, de 30 caballos de fuerza, y con una eficiencia del 89.5 %, el cual es empleado para el accionamiento de la bomba de alta presión Bosch CP4.2.



FIGURA 4.6: Motor eléctrico.

### Variador de frecuencia

El motor eléctrico es contralado mediante un variador de frecuencia para poder establecer su régimen de giro del motor eléctrico, y por consiguiente el de la bomba de altapresión . El variador de frecuencia es de la marca SIEMENS, modelo micromaster 420, el cual se muestra en la Figura 4.7



FIGURA 4.7: Variador de frecuencia.

### Bomba de alta presión

El sistema de alta presión consta de una bomba de alta presión CP4.2, la cual se muestra en la Figura 4.8, opera en el rango de los 23 MPa a 180 MPa. En el presente estudio, se utiliza una frecuencia de 34 Hz en el variador de frecuencia, la cual equivale a 1000 rpm; régimen de giro que se utiliza en los bancos de prueba BOSCH, cuando se alcanza un nivel de presión de 180 MPa.

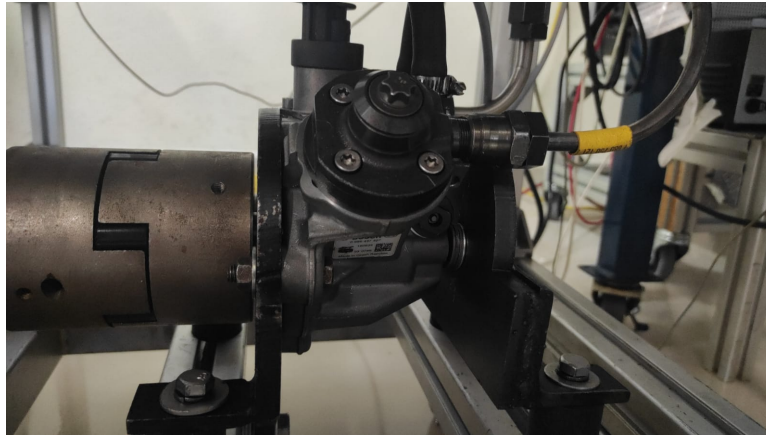


FIGURA 4.8: Bomba Bosch CP 4.2.

### Cople de aleación de acero con tungsteno

Anteriormente se contaba con un cople de aluminio, que unía al eje del motor eléctrico con el eje de la bomba de alta presión; sin embargo debido al régimen de giro de 1000 rpm que era sometido dicho cople, se provocaba un desgaste en el material de dicho cople. Con el fin de solucionar este problema, se diseñó un nuevo cople, pero ahora éste manufacturado de acero con aleación de tungsteno, mismo que se muestra en la Figura 4.9.

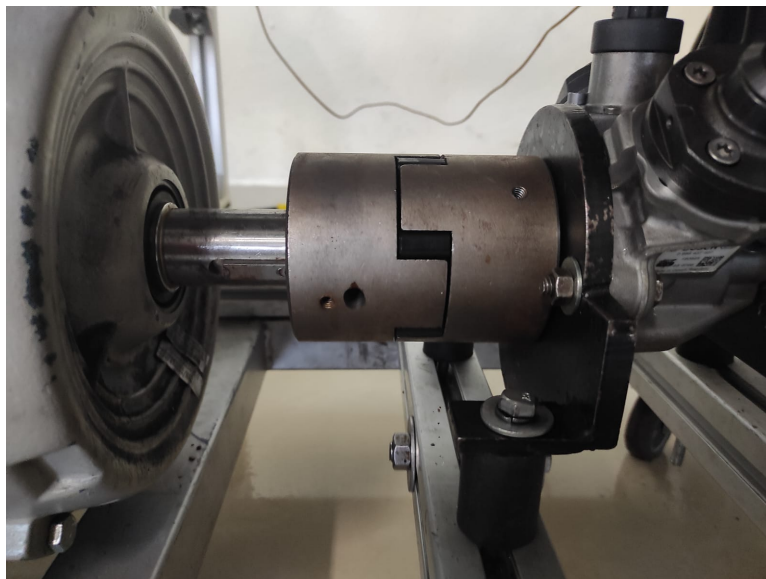


FIGURA 4.9: Cople de aleación de acero con tungsteno.

### Mangueras de alta presión

En los sistemas de inyección diésel common-rail, generalmente se emplean tubos de acero resistentes a elevados valores de presión, para unir la bomba de alta presión con el rail. En el presente estudio, en lugar de usar tubos de acero, se emplean mangueras de la marca Parker modelo 2640D-03V32, las cuales están hechas de polyoximetileno y son de una longitud de 1.5 m, con un diámetro interno y externo de 4.8 mm y 13 mm, respectivamente, tal como se muestran en la Figura 4.10. Adicionalmente, estas mangueras resisten hasta 280 MPa, debido a su reforzamiento de 6 capas de acero.

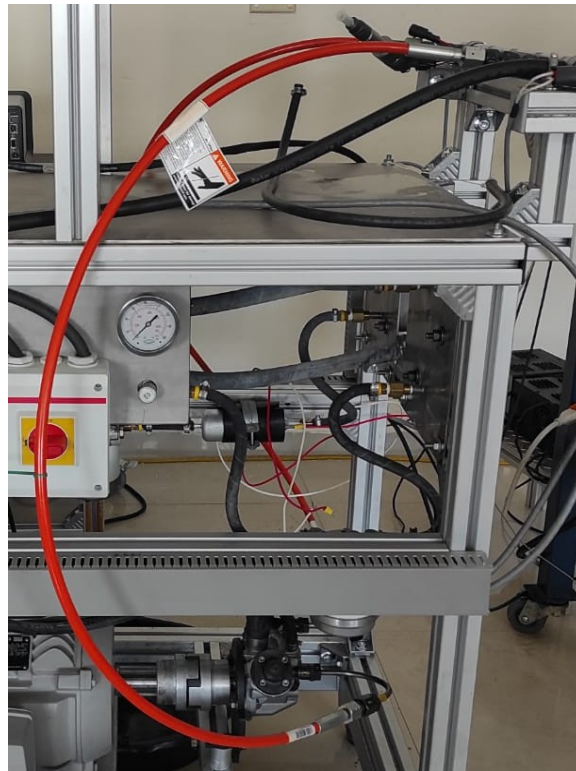


FIGURA 4.10: Mangueras de alta presión.

### Conectores

En la Figura 4.11 , se muestran los conectores, los cuales unen a la Bomba CP4.2 con las mangueras de alta presión. Dichos conectores fueron fabricados por la compañía Bosch.

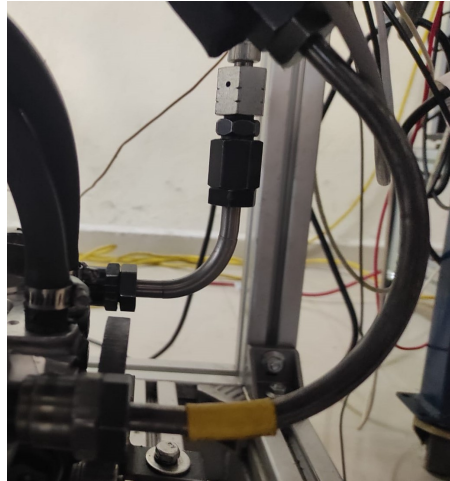


FIGURA 4.11: Conectores de mangueras de alta presión.

#### 4.1.2.3 SISTEMA DE INYECCIÓN COMMON-RAIL

El funcionamiento del sistema de inyección consiste en la circulación del combustible desde depósito a una bomba de alta presión donde posteriormente pasa al common-rail, en el cual se acumula el combustible a alta presión, y a partir de este se distribuye el combustible al inyector objeto de estudio, para su inyección. Una ventaja de este tipo de sistema es el control que se tiene sobre las estrategias de inyección múltiple. En la Figura 4.12, se muestra el common-rail empleado , es de la firma Bosch, y su modelo es 0445216036; éste lo utilizan automóviles tales como el BMW X6 Eli 2008.

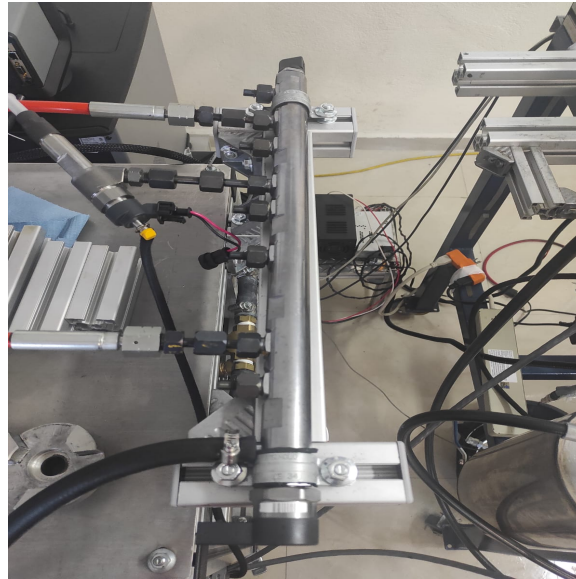


FIGURA 4.12: Common-rail.

### Tapones

Los sistemas diésel cuentan con un common-rail, en el cual se encuentran conectados los inyectores para realizar la inyección de combustible al interior de la cámara de combustión. En esta instalación experimental se emplea un sólo inyector diésel, debido a que se trabaja en condiciones controladas de laboratorio. Para poder trabajar bajo estas condiciones, las conexiones donde estarían presentes los inyectores tipo diésel, se deben obstruir con tapones especiales, como los que se muestran en la Figura 4.13.



FIGURA 4.13: Tapones del common-rail.

### Inyector diésel tipo Solenoide

El inyector diésel a utilizar es un inyector BOSCH CRI 2.1 de 6 orificios, cuyos datos geométricos del mismo, se muestran en la Tabla 4.1. Los datos geométricos de los orificios de la tobera, se obtuvieron mediante la técnica de tomografía computarizada, para ello se empleó un Metrotomo modelo 1500 de la firma Zeiss, se localiza en el Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica (CIIA) de la Universidad Autónoma de Nuevo León. Donde después de la toma de tomografías de la tobera diésel, éstas fueron procesadas en un programa desarrollado en MATLAB. Para mayor información consultar el artículo de Uscanga et al. [47].

Geometría del orificio	Diámetro interno [ $\mu m$ ]	Diámetro externo [ $\mu m$ ]	k-factor [-]
Cónico	139	126	1.3

TABLA 4.1: Especificaciones del inyector diésel tipo Solenoide.

### 4.1.3 CONTROL DE PRESIÓN

#### 4.1.3.1 UNIDAD DE INYECCIÓN

Es un sistema electrónico, cuya función es el control del proceso de inyección, por medio de la frecuencia de inyección, el tiempo de energización del inyector, y los eventos de inyección. Este sistema de control es operado mediante el programa MagnetinjektorV.2; el sistema mencionado se representa en la Figura 4.14.

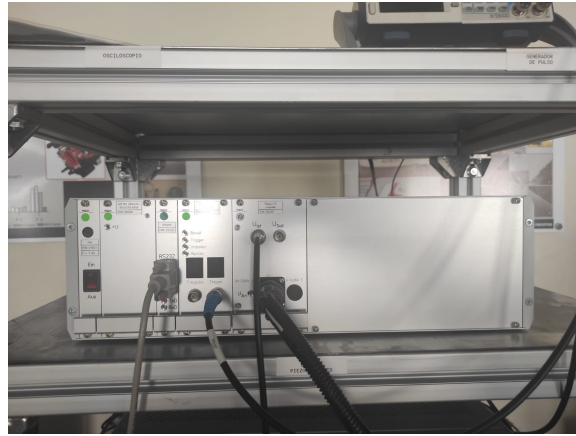


FIGURA 4.14: Sistema para la energización del inyector diésel tipo solenoide.

#### 4.1.3.2 REGULADOR DE PRESIÓN

Es el equipo mediante el cual se regula la presión de la inyección en la instalación experimental, dispone de una interfaz que permite regular la presión de inyección y el caudal másico de combustible que fluye hacia la bomba de alta presión; así mismo a través de dicha interfaz se introduce la curva característica del sensor, con el fin de pasar la unidad de Volt a bar; dicho regulador de presión se representa en la Figura 4.15.

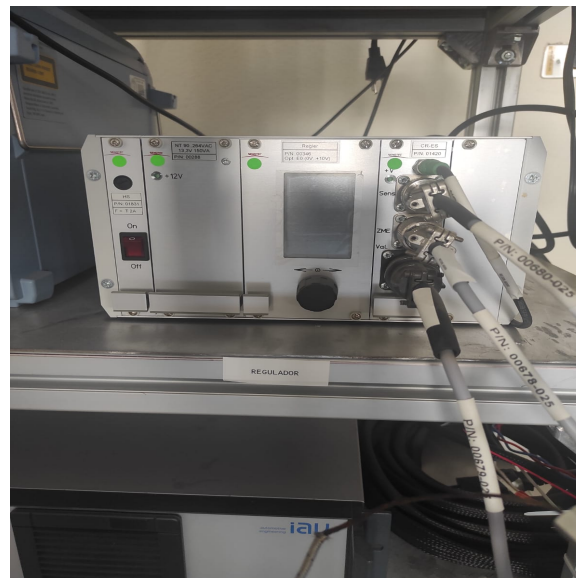


FIGURA 4.15: Regulador de presión.



#### 4.1.3.3 SENSOR DE PRESIÓN

En la Figura 4.16, se muestra el sensor de presión de la firma Bosch modelo 0281002405 empleado en la instalación experimental, en donde la función del mismo es sensar la presión que se tiene en el interior del rail. Para el correcto funcionamiento del sensor es necesario conocer la curva característica del sensor. Más detalles sobre dicha curva característica se describen en el Anexo B.

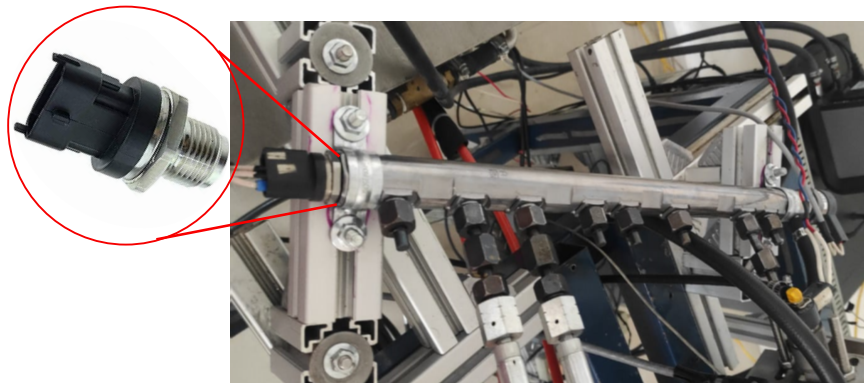


FIGURA 4.16: Sensor de presión montado en el common-rail.

#### 4.1.3.4 VÁLVULA REGULADORA DE PRESIÓN.

Esta válvula tiene la función de regular la presión desviando el diésel por la línea de retorno, del nuevo sistema de inyección, en caso de que la presión en el sistema sea mayor a la establecida, o en caso contrario de que la presión sea baja esta válvula se va cerrando para causar el efecto de aumento de presión. En el nuevo sistema de inyección diésel common-rail, se cuenta con una válvula de la marca BOSCH con el número de serie 0281006074, como se representa en la Figura 4.17.



FIGURA 4.17: Válvula reguladora de presión.

#### 4.1.4 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

##### **Intercambiadores de calor**

Con el fin de controlar la temperatura del combustible al momento del inicio del proceso de inyección, se instalaron un par de intercambiadores de calor con sus respectivos baños térmicos.

Inicialmente, el nuevo sistema de inyección diésel common-rail contaba con una par de intercambiadores de calor automotrices, los cuales se ilustran en la Figura 4.18, como se comentó previamente para controlar la temperatura del combustible antes del inicio del proceso de inyección; sin embargo al elevar el valor de la presión de inyección, los intercambiadores previamente descritos eran insuficientes para controlar la temperatura del combustible; por consiguiente, se decidió instalar un intercambiador de calor adicional con un baño térmico, justo en la línea de retorno del combustible del rail, tal como se representa en la Figura 4.19.

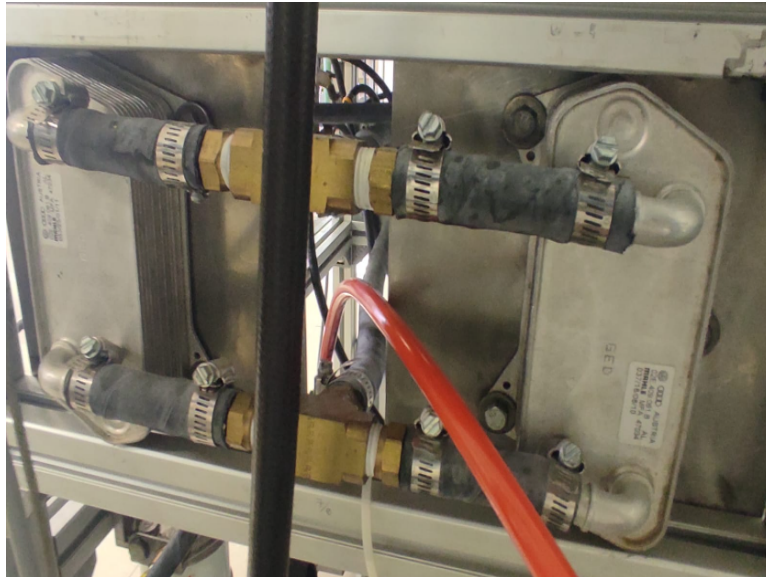


FIGURA 4.18: Intercambiadores de calor a.



FIGURA 4.19: Intercambiador de calor b.

## 4.1.4.1 BAÑOS TÉRMICOS

**Baño térmico A.** Este baño térmico era parte del antiguo sistema de inyección, con el fin de controlar la temperatura del combustible en el retorno del rail, se ópto para incluirlo también en este nuevo sistema de inyección. Es un baño de la marca PolyScience 9002A11B, con capacidad de 6 litros de refrigerante, el cual se muestra en la Figura 4.20.



FIGURA 4.20: Baño térmico a.

**Baño térmico B.** En la figura 4.21, se muestra el baño b, es un baño de la marca polyscience PP15R-40-A11B, con capacidad de 15 litros de refrigerante, a través el cual se puede regular temperaturas de un rango de -20 a 200 °C.

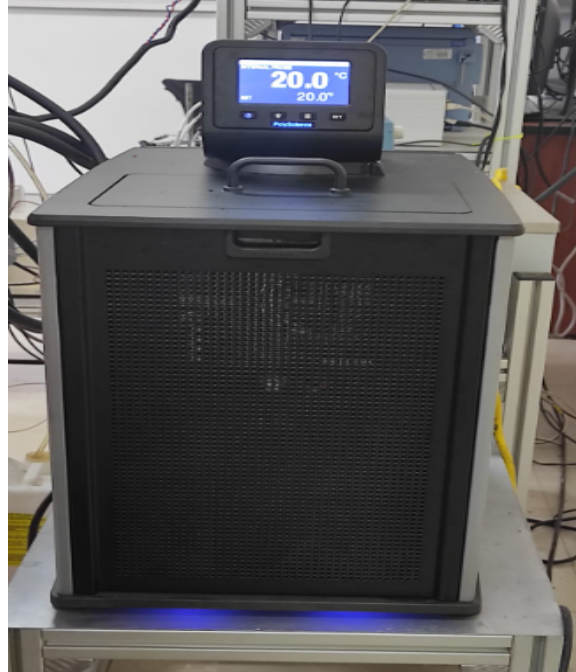


FIGURA 4.21: Baño térmico b.

#### 4.1.5 TÉCNICA ÓPTICA DE ILUMINACIÓN DIRECTA POR DISPERSIÓN MIE

##### 4.1.5.1 ILUMINACIÓN

Con el propósito de visualizar el chorro de combustible en la cámara de visualización a volumen constante, se requiere un método de observación. En este estudio, se utilizará la técnica óptica conocida como Iluminación Directa por Dispersión Mie. En la Figura 4.22, se presenta el conjunto experimental utilizado para implementar esta técnica óptica, específicamente, la cámara de visualización a volumen constante consta de tres accesos ópticos, uno de ellos es empleado para visualizar el chorro de combustible, mediante una cámara de alta velocidad, la cual se describirá seguidamente; mientras que los otros dos accesos ópticos se emplean para iluminar el chorro de combustible, mediante dos lámparas de halógeno.

#### 4.1.5.2 CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD

Para la adquisición del evento de inyección, se cuenta con una cámara de alta velocidad, marca Motion, modelo PRO X4, cuenta con la capacidad de adquirir 5,130 imágenes por segundo, cuenta con un sensor tipo CMOS, y un objetivo Nikon de 60 mm. Más detalles sobre el montaje experimental se dan en Guillermo et al. [48].

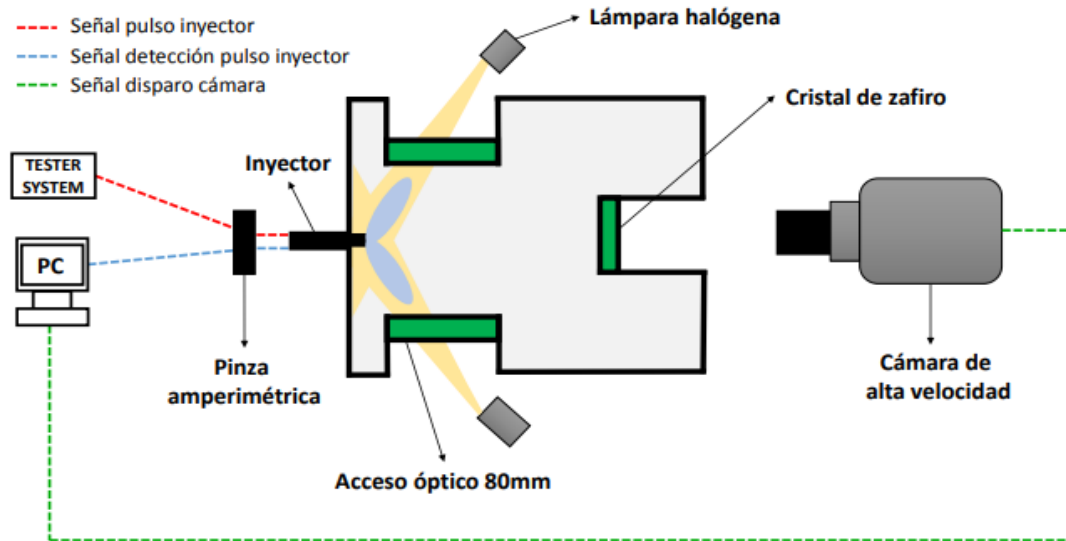


FIGURA 4.22: Configuración experimental empleada para aplicar la técnica óptica de iluminación directa por dispersión Mie.

#### 4.1.6 PROCESADO DE IMAGENES

Las imágenes adquiridas en la experimentación con el uso de una cámara de alta velocidad son procesadas en un código desarrollado en Matlab, a través del cual se determinan los parámetros macroscópicos del chorro tales como el área, el ángulo del chorro, y la penetración. De acuerdo al programa, el parámetro de la penetración se calcula desde el pixel más cercano a la tobera del inyector diésel del chorro de combustible, hasta la punta de la nube del chorro. El parámetro del área se obtiene como la suma de los píxeles con valor uno, lo cual visualmente es representado de

color blanco, en la imagen binarizada del chorro de combustible. El ángulo se calcula como el ángulo formado entre dos líneas rectas, obtenido desde el pixel del chorro de combustible más cercano a la tobera del inyector, estas líneas rectas abarcan hasta el 70 % de la distancia de la penetración del chorro. Más detalles del algoritmo empleado para determinar los parámetros macroscópicos del chorro se dan Rubio Gómez et al. [48]. En la Figura 4.23, se presenta la interfaz del programa.

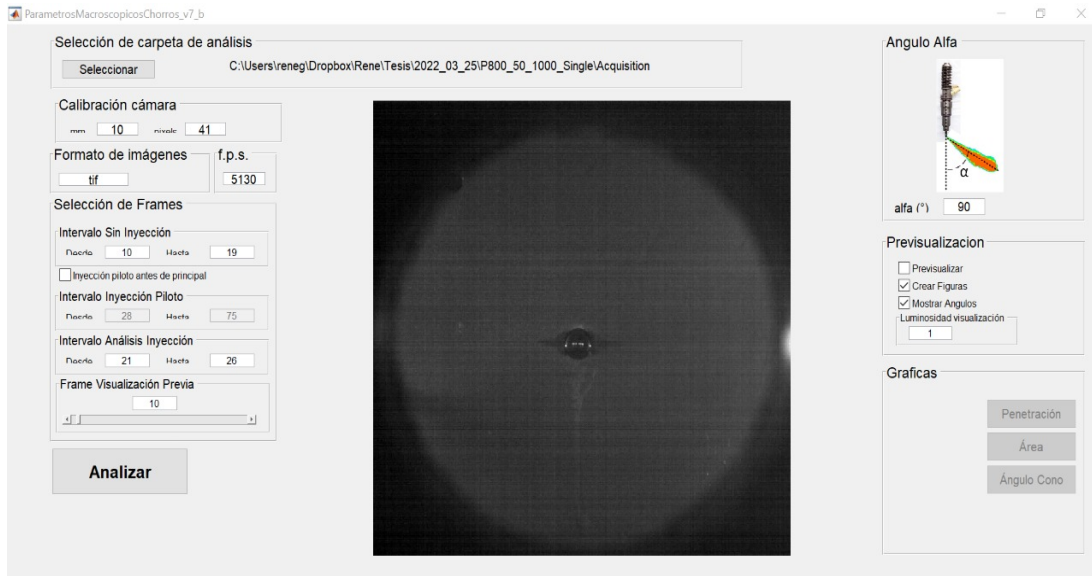


FIGURA 4.23: Interfaz del programa de procesamiento de imágenes.

#### 4.1.6.1 RESOLUCIÓN ESPACIAL

Antes de iniciar la experimentación, es necesario tomar una imagen de calibración que permita pasar los pixeles de la imagen a mm. Para ello, se emplea una hoja de papel milimétrico cuadrado, del cual se conocen sus dimensiones, y es colocado en el interior de la cámara de visualización a volumen constante, específicamente, al nivel de donde se localiza la tobera diésel; seguidamente, una vez adquirida la foto, se señalan las coordenadas  $(x, y)$  de dos puntos como se muestran en la Figura 4.24. Se debe de comprobar que ambos puntos se encuentren a la misma altura. Luego de obtener estos valores, se procede a medir la distancia en milímetros entre los puntos

mencionados. Posteriormente, esta distancia se divide por el número de píxeles contenidos en ese espacio, lo que nos proporciona la resolución espacial de pixel/mm. En el presente trabajo se empleará una resolución espacial de 4.3 pixel/mm.

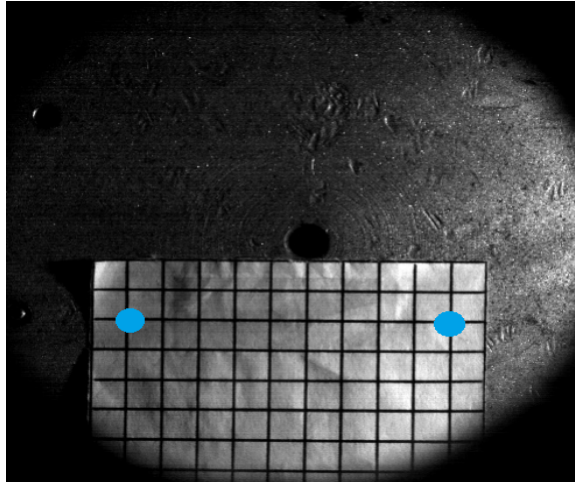


FIGURA 4.24: Imagen del papel milimétrico.

#### 4.1.6.2 DESCRIPCIÓN DEL TRATAMIENTO

El tratamiento consiste en cuatro fases. La primera consiste en la obtención de la imagen del fondo, la permite al programa distinguir entre el fondo y el área del combustible. La segunda fase consiste en la eliminación del fondo, lo cual permite analizar el chorro de manera individual. En la tercer fase, después de que el fondo es eliminado, la imagen se convierte a un formato binario, asignado valores de 0 y 1, donde blanco es 1, y 0 es negro. Este procedimiento facilita la determinación del contorno de los chorros de combustible. Finalmente, la cuarta fase consiste en la determinación de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible.



En la Figura 4.25, se muestran ejemplos de imágenes de chorro líquido obtenidas a 0.14, 0.42, y 0.56 ASOI (por sus siglas en inglés After Start of Injection). Adicionalmente, en las imágenes se ha añadido el contorno detectado por el algoritmo previamente descrito.

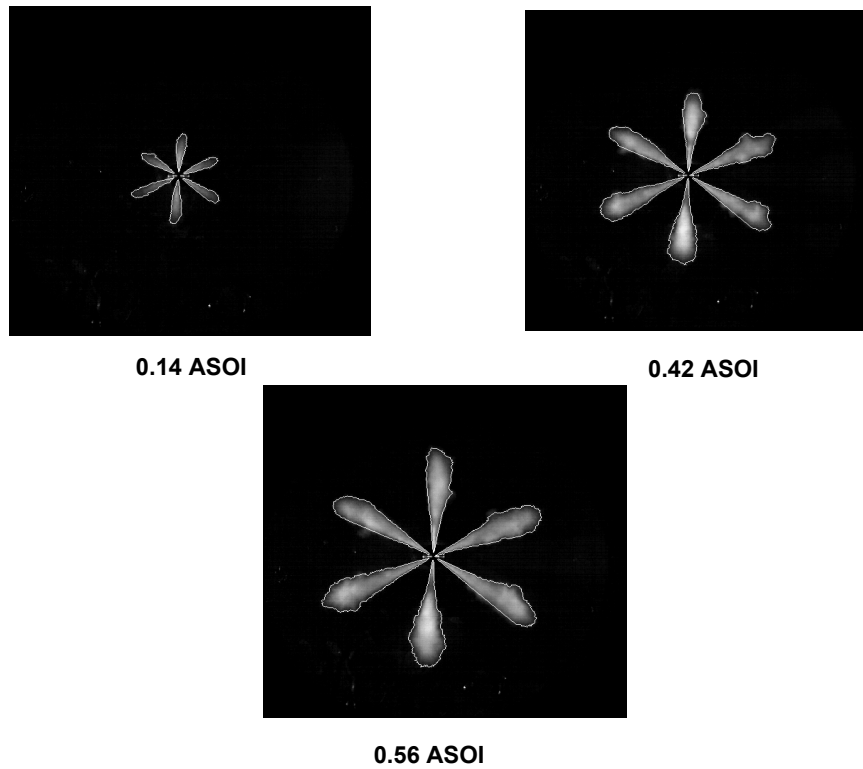


FIGURA 4.25: Imágenes del chorro líquido obtenidas a 0.14, 0.42, y 0.56 ASOI.

Para el procesamiento de los datos de estas imágenes se realizó un promedio de los seis chorros en las tres repeticiones realizadas y la desviación estandar de éstos.

En trabajos anteriores debido a las sombras del chorro de combustible causadas por las no uniformidades de la superficie interior de la cámara de visualización a volumen constante, en donde se encuentra alojado el inyector diésel; el algoritmo del programa solía detectar algún de estas sombras como parte del chorro de combustible, lo cual dificultaba el procesamiento de las imágenes. Para abordar esta dificultad, se decidió pintar la superficie interior de la cámara de visualización a volumen constante de color verde, como se ilustra en la Figura 4.26. Para obtener información adicional sobre el impacto de esta uniformización en el procesamiento de las imágenes, se proporcionan detalles adicionales en el Anexo A.

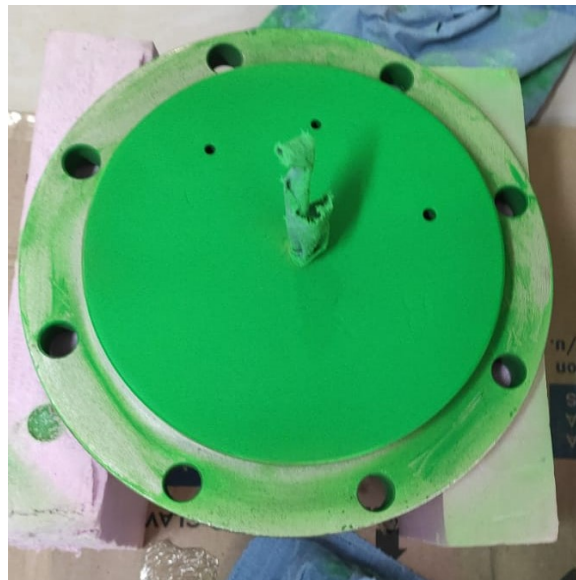


FIGURA 4.26: Superficie interior pintada, en donde se aloja el inyector diésel en la cámara de visualización a volumen constante.

## 4.2 PLAN DE TRABAJO

### 4.2.1 COMBUSTIBLES

#### 4.2.1.1 DIÉSEL

Se empleara diésel mineral como combustible de referencia en la experimentación. En la Tabla 4.2 se describen las propiedades fisicoquímicas del diésel.

Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	Viscosidad dinámica [mPa · s]	Tensión superficial[mN/m]	Poder calorífico [MJ/kg]
0.8467	2.3610	28.91	45.7851

TABLA 4.2: Propiedades fisicoquímicas del diésel.

#### 4.2.1.2 MÉZCLA BINARIA B20

El biodiésel es obtenido del aceite usado de cocina el cual ha sido proporcionado por el LaNDACBio, las propiedades fisicoquímicas del mismo se describen en la Tabla 4.3. Para la determinación de la densidad se empleó un densímetro, el cual opera bajo la norma ASTM D86; mientras que para la viscosidad se utilizó un viscosímetro Anton Paar SVM 3001, el cual opera de acuerdo con la norma ASTM D445; para la tensión superficial se utilizó un tensiómetro dataphysics, modelo DCAT-15, el cual opera bajo la norma ASTM D1331; finalmente para el poder calorífico, se usó un bomba calorimétrica Parr modelo 1341 EB, la cual opera bajo la norma ASTM D-240 [49].

Densidad [gr/cm <sup>3</sup> ]	Viscosidad dinámica [mPa · s]	Tensión superficial [mN/m]
0.8479	3.876	28.38

TABLA 4.3: Propiedades fisicoquímicas del biodiésel

#### 4.2.1.3 CONDICIONES DE TRABAJO

Una parte esencial de este trabajo es la puesta a punto de un nuevo sistema de inyección diésel common-rail para trabajar a elevados valores de presión de inyección; este sistema incluye diversos componentes, uno de los cuales es la bomba de alta presión. En este estudio, se empleó una bomba de alta presión de la marca Bosch, modelo CP 4.2, con capacidad para alcanzar una presión de hasta 200 MPa.

Para la determinación de la proporción de biodiesel en la mezcla binaria diésel-biodiesel se tuvieron en cuenta los siguientes aspectos: (1) de acuerdo con la literatura [34, 50] al aumentar la cantidad de biodiesel en las mezcla binarias, durante la experimentación, se aumenta la probabilidad de la formación de gomas en los componentes del sistema de inyección diésel common-rail; (2) de acuerdo con la norma estadounidense ASTM D7467, que establece los parámetros fisicoquímicos de mezclas binarias diésel-biodiesel y la norma europea EN 14214, contemplan una proporción máxima de biodiesel del 20 %. Uno de los objetivos del presente trabajo, es evaluar el comportamiento de una mezcla binaria a elevados niveles de presión de inyección; con el fin de compensar el efecto negativo del biodiesel al emplear elevados niveles de presión de inyección. Es por ello, que en el presente estudio se utilizará una mezcla binaria B20.

En este trabajo también se evaluará el efecto del levantamiento de la aguja sobre los parámetros macroscópicos, para ello se toma como referencia el trabajo de Martínez et al. [9], y de Maqueda et al. [10], donde caracterizaron el inyector solenoide que se empleará para la experimentación, encontraron los tiempos de energización en los cuales la aguja se encuentra en pleno levantamiento y en cuales no, para seis presiones de inyección 80, 100, 120, 140 y 160 MPa. Tomando en cuenta estas relaciones se asume para este estudio que el tiempo de energización de 0.8 ms la aguja no se encontrará en pleno levantamiento, mientras que a los 1.5 ms la aguja se encontrará plenamente levantada, como se muestra en la Figura 4.25.

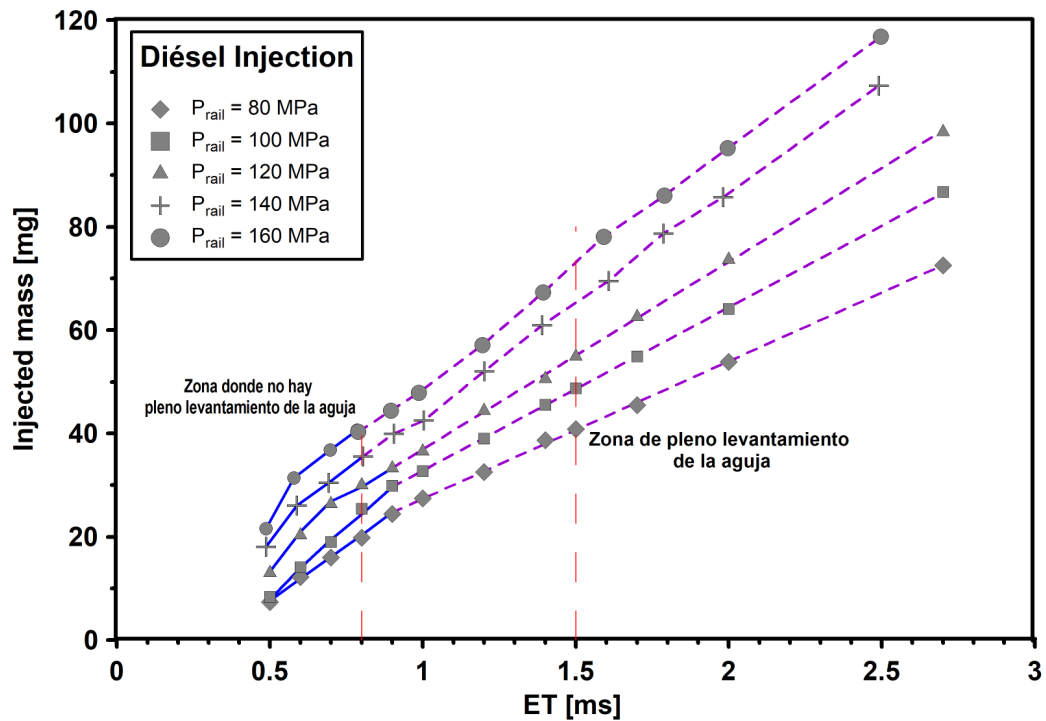


FIGURA 4.27: Levantamiento de la aguja de un inyector solenoide a tres diferentes niveles de presión de inyección 80, 100, 120, 140 y 160 MPa (Adaptado de Martínez-Carrillo [9], y Erick Maqueda [10]).

En la Tabla 4.4, se desglosan los parámetros de operación que se emplearon en el presente estudio; y las cuales son representativas de los motores Diesel.

Presión de inyección (MPa)	Contrapresión (MPa)	Mezclas binarias (%)	Tiempo de Energización (s)
170, 180, 210	5	B20	0.8 y 1.5
170, 180, 210	5	B0	0.8 y 1.5

TABLA 4.4: Condiciones de operación que se emplearon en el presente estudio

## CAPÍTULO 5

# ANÁLISIS DEL PROCESO DE MEZCLA EMPLEANDO ELEVADOS NIVELES DE PRESIÓN DE INYECCIÓN

---

*Este capítulo se estructura en dos segmentos: El primer segmento se enfoca en la validación del sistema de inyección diésel common-rail, mientras que en el segundo segmento se exploran los efectos de la presión de inyección y el tiempo de energización en los parámetros macroscópicos ( ángulo, área y penetración) de una mezcla binaria diésel-biodiésel, que contiene un 20 % de biodiésel obtenido a partir de aceite usado de cocina. Específicamente, en esta segunda sección, en primer lugar se muestran las evoluciones temporales tanto de la mezcla binaria diésel-biodiesel como del diésel; seguidamente, con el fin analizar el efecto de la presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro, éstos se analizarán a diferentes instantes de tiempo de la evolución temporal, para cada uno de los niveles de presión de inyección analizados.*

## 5.1 VALIDACIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Este nuevo sistema de inyección tiene como base el sistema implementado por Omar [46], con la finalidad de confirmar el correcto funcionamiento del mismo, éste será validado. Dicha validación consiste en comparar el valor de la penetración del chorro empleando diésel reportado en la literatura, con el obtenido en el nuevo sistema de inyección diésel common-rail; si dichos valores son similares se podría destacar el correcto funcionamiento de la instalación experimental.

A partir del trabajo de Bohl et al. [3], se obtuvieron los valores de la penetración del chorro, los cuales se compararán con los obtenidos en el nuevo sistema de inyección diésel common-rail. En la Tabla 5.1, se describen las condiciones de operación en las que se compararán los valores de la penetración del chorro obtenidos a partir de la literatura, con los obtenidos en el nuevo sistema de inyección diésel common-rail.

Presión de inyección [MPa]	Pback [MPa]	Tiempo de Energización [ms]
180	6	1.5

TABLA 5.1: Condiciones de operación en la que se compararan los valores de la penetración del chorro.

En la Figura 5.1, se presentan las evoluciones temporales de la penetración del chorro. En particular, los valores de penetración del chorro derivados del trabajo de Bohl et al.[3], logrados mediante el empleo de una presión de 180 MPa, un tiempo de energización de 1.5 ms y una contrapresión de 6 MPa, se muestran en color negro. Por otro lado, en color azul se representan los valores de la penetración del chorro obtenidos en el nuevo sistema de inyección diésel common-rail.

Debido a la limitación que se tiene por el diámetro del acceso óptico de la cámara a volumen constante, los datos son truncados a los 0.82 ms después del tiempo de inyección o por sus siglas en inglés ASOI, esto se debe a la influencia de la contrapresión la cual a bajos niveles genera una penetración más rápida. En este caso el acceso óptico de la cámara a volumen constante tiene una limitante de entre 50 mm a 60 mm de radio.

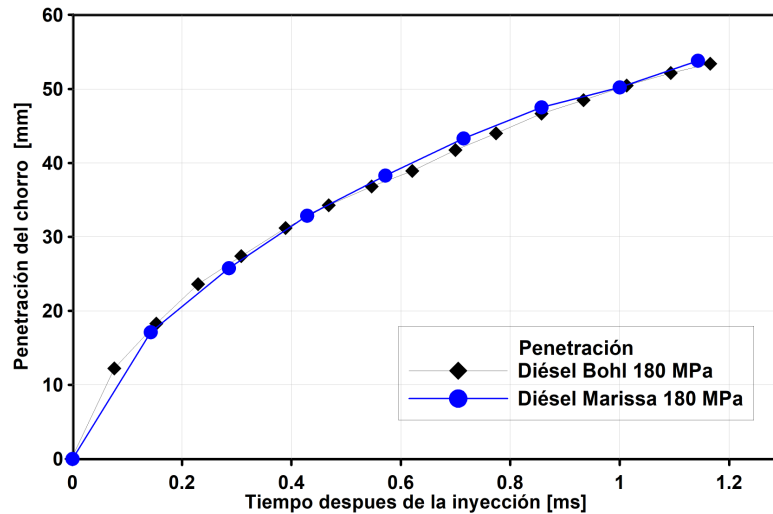


FIGURA 5.1: Gráfico de penetración del chorro a 100 MPa de presión de inyección y 2 MPa de contrapresión.

Observando los resultados obtenidos de estos experimentos de validación, se puede concluir que este nuevo sistema de inyección diésel common-rail reproduce resultados satisfactorios. Con estos se concluye la puesta punto del nuevo sistema de inyección diésel common-rail, el cual puede se pueden realizar un aproximado de 12 experimentos en una hora en comparación del antiguo sistema de inyección, donde a estas condiciones de trabajo solo se pueden realizar 3 experimentos en una hora.

Una vez realizada la validación de este nuevo sistema de inyección, en la siguiente sección se abordarán los experimentos realizados con mezclas binarias diésel-biodiésel los cuales tienen el objetivo de respaldar la hipótesis de este documento.



## 5.2 EFECTO DE UNA MEZCLA BINARIA DIÉSEL-BIODIÉSEL DERIVADO DEL ACEITE USADO DE COCINA SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA

### 5.2.1 EFECTO DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DE LOS COMBUSTIBLES

En esta subsección se analizará el efecto de la presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos del diésel y la mezcla binaria B20, empleando dos tiempos de energización, 0.8 y 1.5 ms, estos tiempos corresponden a un caso donde la aguja del inyector aun no se encuentra en pleno levantamiento y un caso donde la aguja se encuentre en pleno levantamiento.

#### **Tiempo de energización: 0.8 ms**

En la Figura 5.2, se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos de los combustibles estudiados al emplear los niveles de presión de inyección de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, y un tiempo de energización de 0.8 ms; específicamente, se muestra en a) la evolución temporal de la penetración, en b) la evolución temporal del ángulo, y en c) la evolución temporal del área. Las líneas de color azul corresponden al diésel como combustible de referencia, mientras que las líneas de color rojo corresponden a la mezcla binaria B20 diésel-biodiésel.

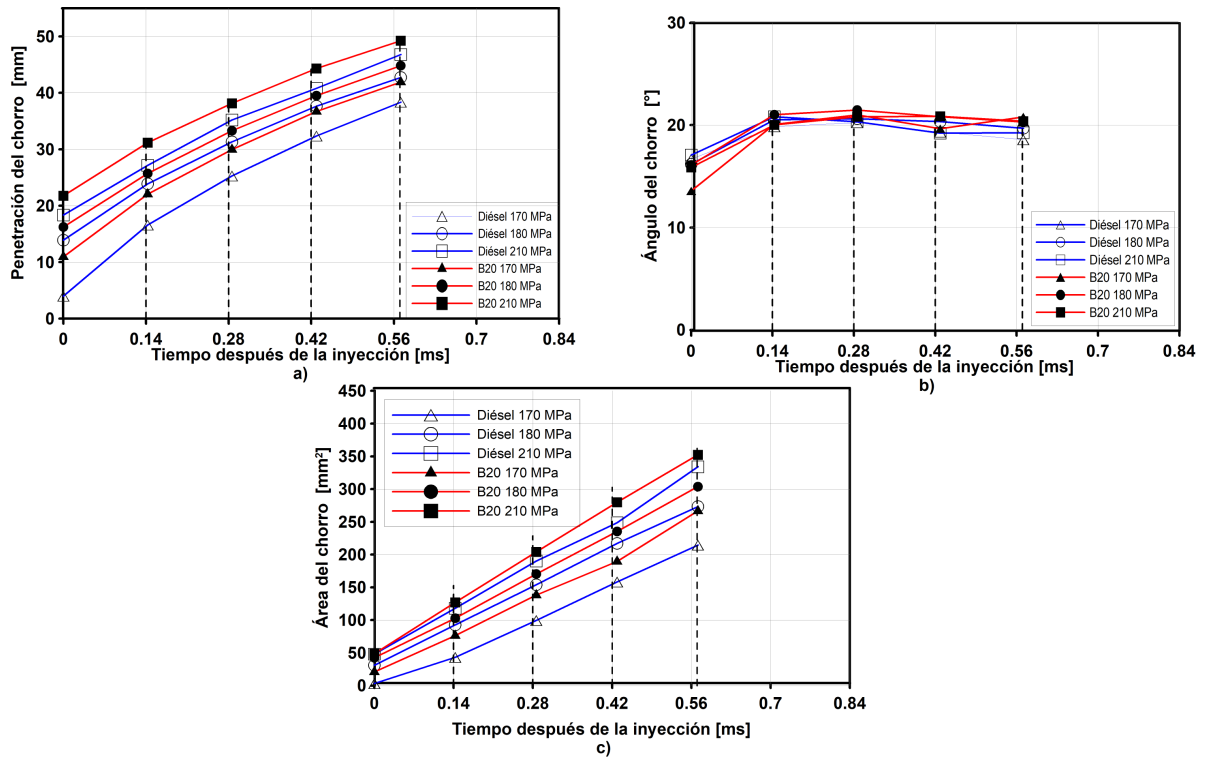


FIGURA 5.2: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos, de los chorros de diésel y la mezcla binaria B20, empleando los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y un tiempo de energización de 0.8 ms.

Para llevar a cabo el análisis del impacto de la presión de inyección en los parámetros macroscópicos del chorro, la Figura 5.3 presenta las evoluciones temporales de la penetración, ángulo, y área para el diésel, y la mezcla binaria B20, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42 ms, y 0.56 ms ASOI (por sus siglas en inglés After Start of Injection), al emplear los niveles de presión de inyección de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, y un tiempo de energización de 0.8 ms. Las líneas de color azul corresponden al diésel como combustible de referencia, mientras que las líneas de color rojo corresponden a la mezcla binaria B20 diésel-biodiésel.

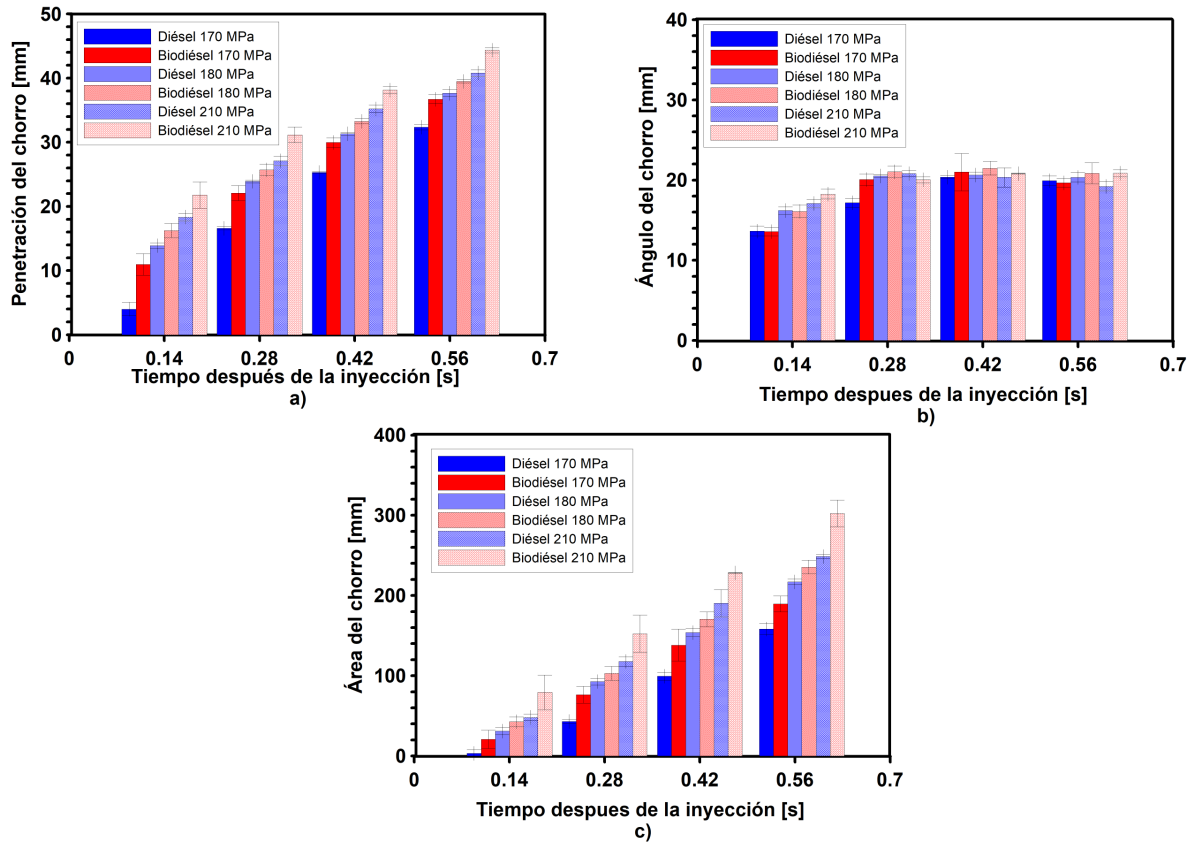


FIGURA 5.3: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos, de los chorros de diésel y la mezcla binaria B20, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42 ms, y 0.56 ms ASOI, y empleando los niveles de prail de 170 MPa, 180 MPa, 210 MPa, un tiempo de energización de 0.8 ms y una contrapresión de 5 MPa.

### Penetración

A partir de la Figura 5.2a, se observa que al elevar la presión de inyección se genera un aumento de la velocidad del chorro, provocando que la penetración del combustible sea más rápida. En la Figura 5.3a, se puede observar que la penetración de la mezcla binaria es mayor a la del diésel, esto puede ser debido a que el valor de la viscosidad de la mezcla binaria es mayor a la del diésel.

Este comportamiento también fue observado por Anisa et al. [51], en donde estudiaron los parámetros macroscópicos del biodiesel derivado de aceite usado de cocina, diésel y n-tridecano en condiciones evaporativas pero no reactivas.

Para poder analizar el efecto de la alta presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos del biodiésel, se realizó la Figura 5.3 inciso a), en la cual se muestra una gráfica de barras en cada tiempo después de la inyección por sus siglas en inglés (ASOI), de esta manera, se pueden observar los tres niveles de presión de inyección y su efecto sobre los combustibles. A partir de la Figura 5.4a, se observa que hay una diferencia en los valores de la penetración del chorro entre la mezcla binaria B20 y el diésel, para el nivel de presión de 170 MPa y a los 0.14 ASOI, mientras que para los niveles de presión de 180 MPa y 210 MPa dicha diferencia es de 8 % y 10 %, respectivamente.

Así mismo, se observa que conforme transcurre el evento de inyección, la diferencia entre los valores de la penetración del diésel y los de la mezcla binaria va disminuyendo. Específicamente, para los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, y a los 0.57 ms ASOI, dicha diferencias entre los valores de la penetración va disminuyendo en el orden de 10 %, 5 %, y 7 %, respectivamente. Esto es debido a que al incrementar el nivel de presión de inyección se mejora el proceso de atomización de la mezcla binaria diésel-biodiesel, alcanzado un comportamiento similar al diésel. Este comportamiento también fue observado por Wang et al. [2], cuando ellos estudiaron las características macroscópicas del chorro empleando diésel, y biodiesel obtenido de aceite de palma y coco, y elevados niveles de presión de inyección de hasta 300 MPa.

### Ángulo

En la Figura 5.3b, se presenta la evolución temporal del ángulo del chorro tanto para la mezcla binaria como para el diésel, empleando niveles de presión de inyección del orden de 170 MPa, 180 MPa y 210 MPa, junto con un tiempo de energización de 0.8 ms. A partir de la figura se puede observar entre los valores del ángulo del chorro para el diésel, y el de la mezcla binaria es del orden del 2% en los tres niveles de presión estudiados. Este comportamiento también fue observado por Gupta et al. [52], en donde al estudiar los parámetros macroscópicos y microscópicos empleado diésel, niveles de presión de 500 bar a 1500 bar, y un inyector diésel tipo solenoide, concluyeron que el ángulo del chorro no está influenciado por el nivel de presión de inyección.

### Área

En la Figura 5.2c, se presenta la evolución temporal del área del chorro para la mezcla binaria y el diésel, y empleando los tres niveles de presión de inyección objeto de estudio. A partir de la figura 5.2c, se observa que el biodiésel en los tres niveles de presión de inyección presenta una mayor área del chorro en comparación a la del diésel, por lo que se puede destacar que con el biodiesel se tiene una mejor distribución de la mezcla aire-combustible en el interior de la cámara de combustión.

A partir de la Figura 5.3c, también se puede observar que a los 0.14 ASOI el área del diésel es mayor que el área proyectada por la mezcla binaria, esto se debe a que el tamaño del ángulo del diésel a este tiempo después de la inyección es mayor que la de la mezcla binaria. A partir de los 0.28 ASOI y hasta los 0.57 ASOI la mezcla binaria muestra una mayor área proyectada que la del diésel. Esta diferencia entre las áreas de ambos combustibles va disminuyendo conforme aumenta el nivel de presión de inyección.

Al incrementar el nivel de presión de inyección también se aumenta la masa inyectada, lo cual genera ese efecto de estratificación que se puede observar en un mismo tiempo ASOI a diferentes niveles de presión de inyección. Igualmente, se

puede observar que en el nivel de presión de 170 MPa, la diferencia entre áreas del chorro de los combustibles tiene un valor máximo a los 0.14 ms ASOI, el cual es del orden del 45 %, y a los 0.57 ms ASOI la diferencia es del orden del 19 %, mientras que para el nivel de presión de 180 MPa, la diferencia entre áreas del chorro de los combustibles se mantiene entre un 10 % y 9 %, debido a que los valores de la penetración del chorro entre ambos combustibles poseen un bajo porcentaje de diferencia entre ellos. Para el caso del nivel de presión de inyección de 210 MPa, se puede observar que la diferencia entre áreas del chorro de los combustibles tiene un valor máximo a los 0.14 ms ASOI, el cual es del orden del 19 %, y a los 0.57 ms ASOI la diferencia es del orden del 12 %.

Xie et al. [53], investigaron las características macroscópicas de diferentes mezclas derivadas del aceite de cocina y diesel, estudiaron la penetración del chorro, la velocidad promedio, ángulo, área y volumen del chorro bajo diferentes niveles de presión de inyección y niveles de presión ambiente. Ellos encontraron que la presión de inyección y la presión ambiente tienen efectos significativos en las características del chorro. A medida que incrementa el nivel de presión de inyección, aumenta la penetración y el área del chorro. De acuerdo con sus resultados, la penetración y el área del chorro evolucionaron más rápido con una mayor nivel de presión de inyección, lo que provocó en un mejor procesos de atomización. Esto se debió a que las pequeñas gotas desintegradas adquirieron mayor impulso a presiones de inyección más altas, lo que indujo a una mayor área del chorro, principalmente debido a la mayor penetración del chorro.

**Tiempo de energización: 1.5 ms**

En la Figura 5.4, se presentan las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos de los combustibles estudiados al emplear los niveles de presión de inyección de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, y un tiempo de energización de 1.5 ms; específicamente, se muestra en a) la evolución temporal de la penetración, en b) la evolución temporal del ángulo, y en c) la evolución temporal del área. Como en el caso previo, las líneas de color azul corresponden al diésel como combustible de referencia, mientras que las líneas de color rojo corresponden a la mezcla binaria B20 diésel-biodiésel.

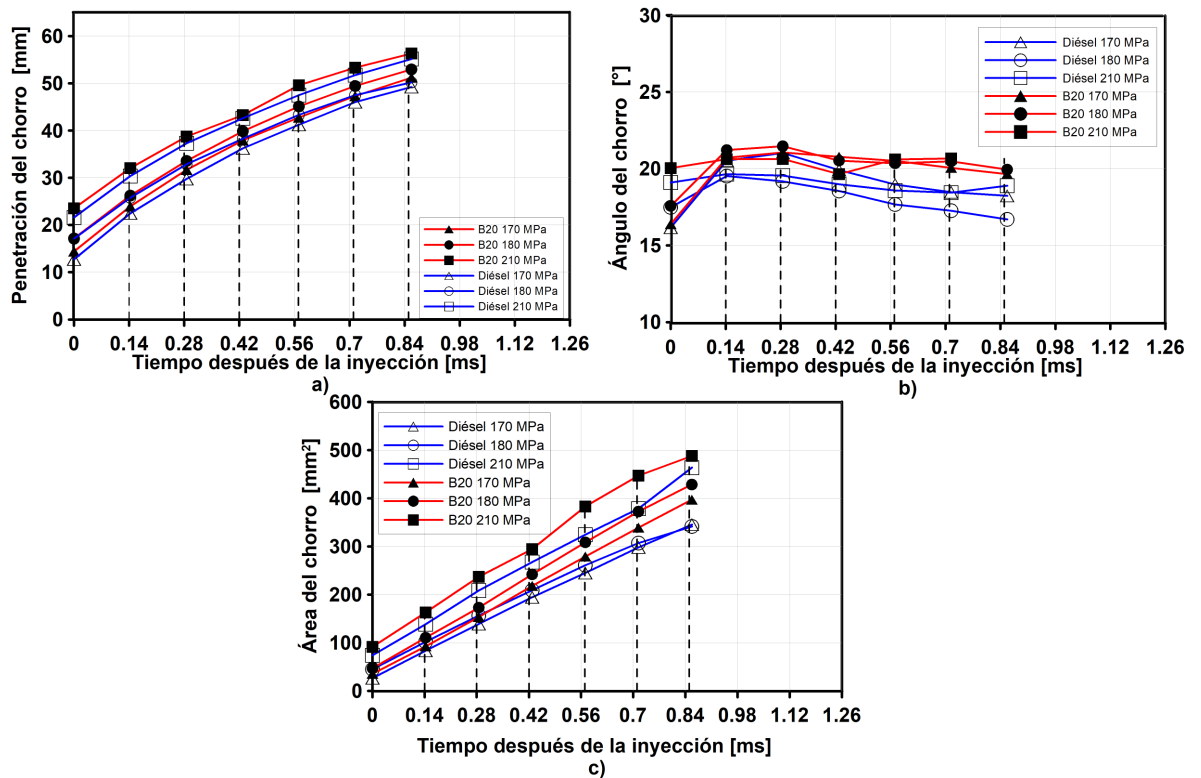


FIGURA 5.4: Evoluciones temporales de la penetración, ángulo, y área para el diésel, y la mezcla binaria B20, empleando los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y un tiempo de energización de 1.5 ms.

Para realizar el análisis del impacto de la presión de inyección en los parámetros macroscópicos del chorro, la Figura 5.5 presenta las evoluciones temporales de la penetración, ángulo y área, ya sea en el caso del diésel o en el de la mezcla binaria B20. Se han considerado los tiempos iso de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42 ms, 0.56 ms y 0.7 ms después del inicio de la inyección (ASOI). Las líneas de color azul corresponden al diésel como combustible de referencia, mientras que las líneas de color rojo corresponden a la mezcla binaria B20 diésel-biodiésel.

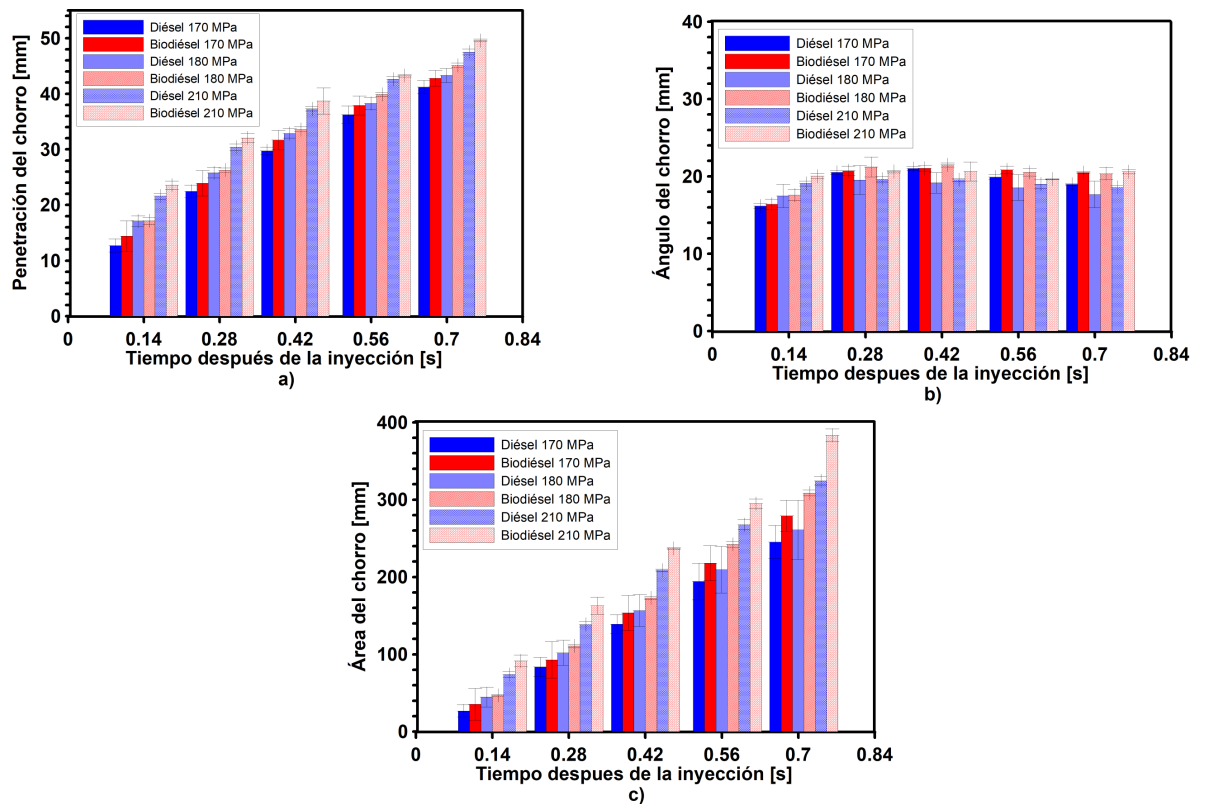


FIGURA 5.5: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos, del diésel y la mezcla binaria B20, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42 ms, 0.56 ms, y 0.7 ms ASOI, y empleando los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, 210 MPa, un tiempo de energización de 1.5 ms y una contrapresión de 5 MPa.

### Penetración

De acuerdo a lo que muestra la Figura 5.5a, se aprecia que a 0.14 ASOI, existe



una diferencia del 6 % entre los combustibles a una presión de inyección de 170 MPa. Esta diferencia disminuye a medida que el chorro de combustible se estabiliza. Por otro lado, para los niveles de presión de 180 MPa y 210 MPa, la discrepancia en los valores de la penetración del chorro entre ambos combustibles es del 2 % y 5 %, respectivamente.

A medida que el tiempo después de la inyección avanza, la diferencia entre el valor de la penetración del diésel y la mezcla binaria va reduciéndose. Para un nivel de presión de inyección de 170 MPa, esta diferencia disminuye hasta un 4 % a los 0.71 ms después del inicio de la inyección (ASOI). En cuanto a los niveles de presión de inyección de 180 MPa y 210 MPa, dicha diferencia se reduce en un 4.38 % y 4.12 %, respectivamente.

La disminución de la diferencia entre ambos chorros de combustibles, con el del nivel de presión de inyección es mayor que la observada cuando se empleó un tiempo de energización de 0.8 ms. Esto puede ser debido a la estabilización del chorro que se logró cuando se empleó un tiempo de energización de 1.5 ms.

### **Ángulo**

A partir de la Figura 5.5b, se puede observar que la mezcla binaria B20 provoca ángulos del chorro mayores que los del diésel a partir de los 0.28 ms ASOI. A los 0.14 ms ASOI la diferencia entre los ángulos del chorro para el nivel de presión de 170 MPa es de 1°, mientras que para los niveles de presión de 180 MPa, y 210 MPa es de 2°. Conforme transcurre el tiempo los ángulos del diésel disminuyen de 21° a 18° al pasar de 0.14 ms a 0.71 ms ASOI para el nivel de presión de 170 MPa. Mientras que para los niveles de presión de 180 MPa y 210 MPa, las variación del ángulo del chorro al transcurrir de 0.14 ms a 0.71 ms, fueron de 19° a 17°, y de 19° a 18°, respectivamente.

Mientras que la mezcla binaria para los tres niveles de presión de inyección los ángulos oscilaron entre los 20° y 19°, mostrando un comportamiento uniforme al igual que en el caso de un tiempo de energización de 0.8 ms. Este comportamiento podría

ser atribuido a la influencia del levantamiento de la aguja. Este comportamiento fue también observado por Stegemann et al. [8], en donde estudiaron los efectos de la velocidad del levantamiento de la aguja sobre los parámetros macroscópicos del diésel, encontrando variaciones en el tamaño del ángulo dependen de la velocidad del levantamiento de la aguja. Este tema será analizado en la siguiente sección del presente capítulo.

### Área

A partir de la Figura 5.5c, se puede observar que a los 0.14 ms ASOI, se tiene una diferencia porcentual entre el área del diésel y el de la mezcla binaria de 9.86 %, 8 %, y 13 %, para los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, respectivamente. Conforme el tiempo ASOI transcurre estas diferencias aumentan hasta un 12 %, 14 % y 15 % para los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, respectivamente.

Este aumento de las diferencias entre las áreas del diésel y el de la mezcla binaria, se ve influenciado por la disminución del ángulo del chorro de combustible, debido a que el ángulo del diésel con el paso del tiempo ASOI disminuyó, por lo tanto, el área de este combustible es menor que el de la mezcla binaria.

## 5.2.2 EFECTO DEL LEVANTAMIENTO DE LA AGUJA DEL INYECTOR SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE LOS COMBUSTIBLES

En esta sección, se llevará a cabo un análisis del impacto del levantamiento de la aguja en los parámetros macroscópicos tanto del diésel como de la mezcla binaria B20. Se realizará este análisis utilizando dos tiempos de energización: 0.8 ms y 1.5 ms. Estos tiempos corresponden a dos situaciones: una en la que la aguja del inyector aún no ha alcanzado su pleno levantamiento y otra en la que la aguja se encuentra en pleno levantamiento.

### **Diésel**

En la Figura 5.6 se muestran las gráficas de isotiempos de los parámetros macroscópicos del diésel empleando los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, y los dos tiempos de energización analizados, en el inciso a) se muestra la penetración, en el inciso b) el ángulo y en el inciso c) el área del chorro. De color morado se muestran los resultados empleando un tiempo de energización de 0.8 ms, y de color verde los resultados empleando un tiempo de energización de 1.5 ms

### **Penetración**

En la Figura 5.6a se observan diferencias en los valores de la penetración del chorro con tiempos de energización de 0.8 ms y 1.5 ms esto se debe a que, a mayor tiempo de energización, mayor es la cantidad de masa de combustible inyectada. Este comportamiento es reportado también en la tesis de Rubio [46] donde emplea tiempos de energización de 0.5 ms y 2 ms, dando como resultado una mayor penetración del chorro para un tiempo de energización de 2 ms.

En la Figura también se observan diferencias de los valores de la penetración de chorro entre el tiempo de energización de 0.8 ms y 1.5 ms para el nivel de presión de inyección de 170 MPa, las cuales son entre un 20% a un 10%, lo que equivale

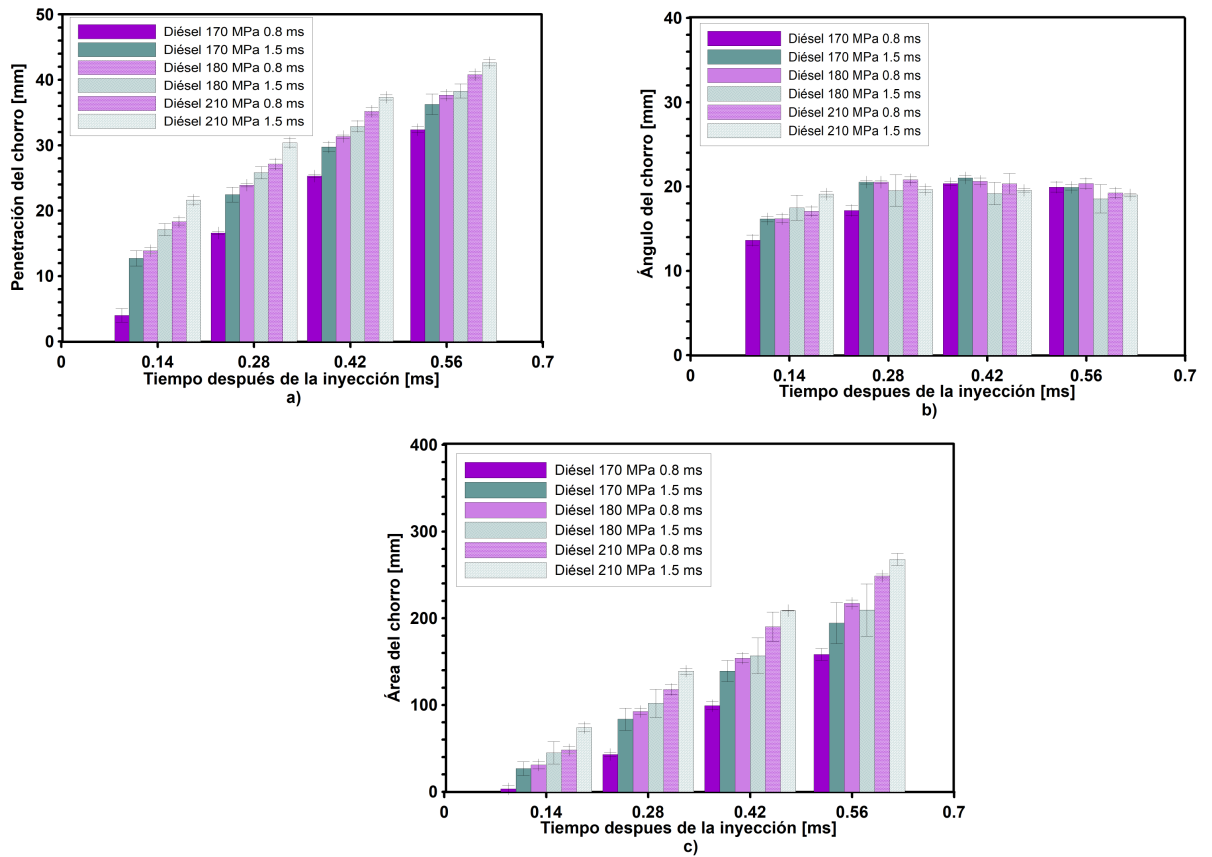


FIGURA 5.6: Evoluciones temporales de la penetración, ángulo, y área para el diésel, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42 ms, y 0.56 ms ASOI, y empleando los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, 210 MPa, un tiempo de energización de 0.8 y 1.5 ms y una contrapresión de 5 MPa.

entre 7 mm y 4 mm. Mientras que las diferencias de los valores de la penetración del chorro entre los dos tiempos de energización estudiados fue de 7% a un 1%, y de 10% a 2%, para los niveles de presión de 180 MPa, y 210 MPa, respectivamente. Este comportamiento puede ser atribuido al efecto del levantamiento de la aguja para un tiempo de energización de 0.8 ms, debido a que al aumentar la presión genera un levantamiento rápido de la aguja, con lo cual incrementa la cantidad de masa inyectada, y por lo tanto los valores se van asemejando a los de un tiempo de energización de 1.5 ms. Este efecto del aumento de la velocidad del levantamiento de

la aguja influenciado por el aumento del nivel de presión de inyección es observado por Pratama et al [7], cuando ellos analizaron la influencia del levantamiento de la aguja en las características del chorro de combustible cerca de la tobera.

### Ángulo

A partir de la Figura 5.6b, se observa que los valores de los ángulos de los chorros con un nivel de presión de 170 MPa, para ambos tiempos de energización, tienden a estabilizarse a partir de los 0.42 ms; mientras que para el caso de los niveles de presión de 180 y 210 MPa, se puede observar que a los 0.14 ms ASOI los chorros de combustible con tiempos de energización de 1.5 ms tienden a tener un mayor ángulo que los chorros de combustible de un tiempo de energización de 0.8 ms, conforme pasa el tiempo los chorros con un tiempo de energización de 1.5 ms presentan un menor ángulo que su contraparte de 0.8 ms, esto se debe a que este tiempo de energización pertenece a un estado de aguja completamente elevada, por lo tanto el chorro se encuentra en un estado estable, en este estado los ángulos son menores en comparación de un estado transitorio, en el cual los ángulos son mayores, debido a que el combustible está disperso creando gotas finas a la salida de la tobera.

Los chorros de un tiempo de energización de 0.8 ms ASOI de acuerdo con los resultados, tienen un ángulo más grande debido a que se encuentran en un estado transitorio, que es causado por la aguja del inyector, la cual no se encuentra en pleno levantamiento. Para el caso del nivel de presión de 170 MPa y un tiempo de energización de 1.5 ms el ángulo se comporta de manera diferente en comparación a los ángulos del chorro con el mismo tiempo de energización, esto se debe a que aún se encuentra en estado cuasi estable, este comportamiento proviene de un efecto de la aguja, la cual dificulta el paso del combustible al saco y orificio de la tobera a bajas presiones, ya que su levantamiento es lento, y por lo tanto tarda más tiempo en pasar de un estado cuasi estable a uno estable.

Estos resultados son consistentes con Li et al. [54], quienes estudiaron los parámetros macroscópicos del diésel, y mezclas binarias de biodiésel-pentanol; y con los de Mo et al. [55], donde investigaron las características macroscópicas del biodiésel de soya puro, y sus mezclas binarias biodiésel-n-butanol. Dando como resultado una disminución en el ángulo del chorro con el aumento del nivel de presión de inyección.

### **Área**

En la Figura 5.7c, se observa el área del chorro del chorro diésel para los tres niveles de presión de inyección, y los dos tiempos de energización estudiados. A los 0.14 ms ASOI se observa una menor diferencia de los valores del área del chorro, el cual es del orden de 20 %, 10 %, y 12 % para los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, respectivamente. Conforme el tiempo ASOI transcurre estas diferencias aumentan hasta un 12 % a los 0.56 ms ASOI, para el nivel de presión de 170 MPa, y para el nivel de presión de 210 MPa al mismo tiempo ASOI corresponde una diferencia de un 6 % . Mientras que para el caso de 180 MPa y a los 0.56 ms ASOI se observa un área mayor para un tiempo de energización de 0.8 ms, esto se debe a que a este tiempo ASOI el ángulo del chorro disminuye provocando así una menor área de chorro.

### **Mezcla Binaria B20**

En la Figura 5.7 se presentan las evoluciones temporales de la penetración, ángulo, y área para la mezcla binaria B20, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42 ms, y 0.56 ms ASOI; obtenidas al emplear los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 ms y 1.5 ms. Las líneas de color rosa corresponden al tiempo de energización de 0.8, mientras que las líneas de color naranja corresponden al tiempo de energización de 1.5 ms.

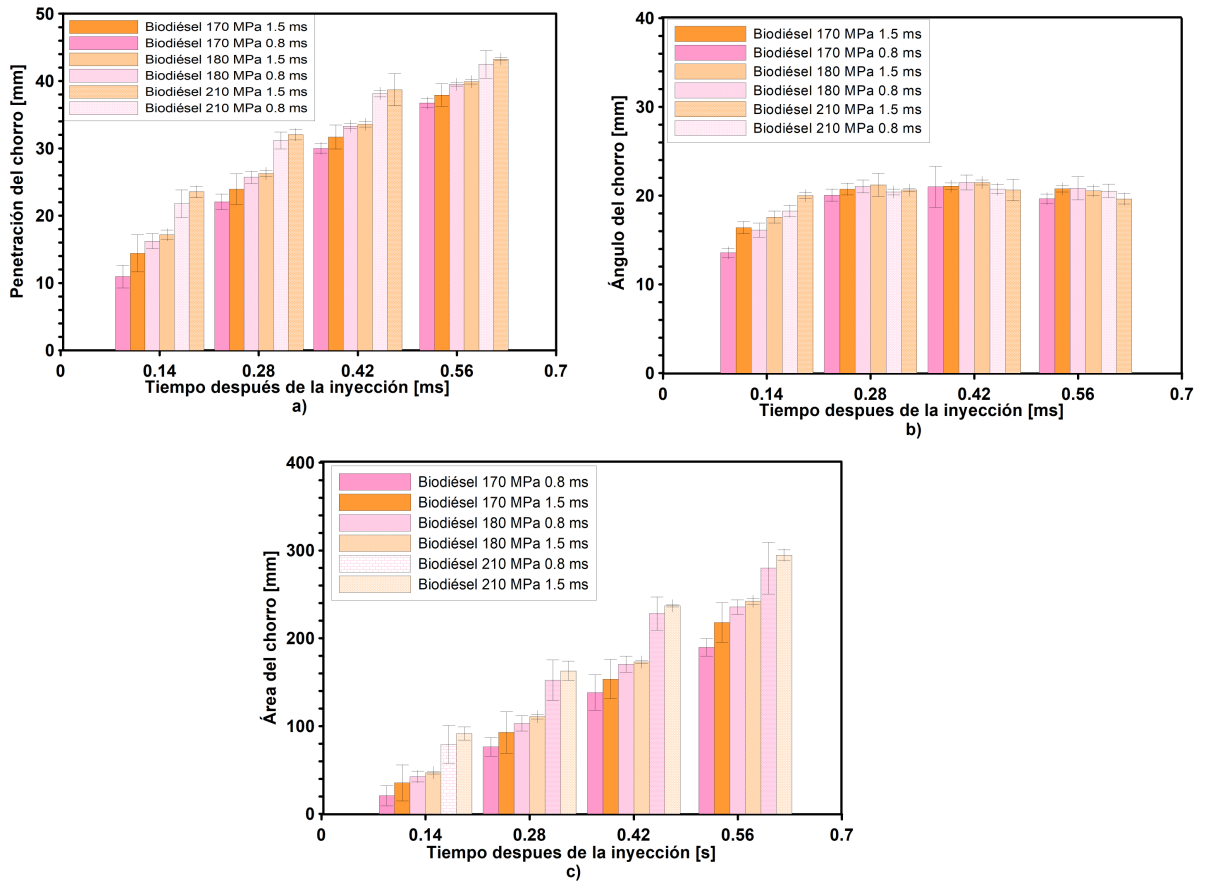


FIGURA 5.7: Evoluciones temporales de la penetración, ángulo, y área para la mezcla binaria B20, teniendo en cuenta los iso-tiempos de 0.14 ms, 0.28 ms, 0.42 ms, y 0.56 ms ASOI, y empleando los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, 210 MPa, una contrapresión de 5 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 ms y 1.5 ms.

### Penetración

En la Figura 5.7a, se muestra la penetración de los chorros de la mezcla binaria B20 para los niveles de presión de inyección, y tiempos de energización estudiados. En esta figura se observa un comportamiento estable entre los chorros al mismo nivel de presión de inyección, y diferente tiempo de energización, presentando una diferencia máxima del 7%, en comparación con el diésel donde la diferencia máxima entre chorros es del 20%.

Esto se debe a que el levantamiento de la aguja para un tiempo de energización de 1.5 ms es afectado por las propiedades físicas de la mezcla binaria, es decir la densidad y viscosidad, retrasando su levantamiento, dando como resultado una penetración consistente entre ambos tiempos de energización. Este retraso del levantamiento de la aguja al emplear biodiésel en el proceso de inyección fue también observado por Desantes et al. [40] y Hwang et al. [5].

### **Ángulo**

En la Figura 5.7b, se observan los ángulos de los chorros de la mezcla binaria B20 para los niveles de presión de inyección, y tiempos de energización estudiados. En esta figura se muestra que el comportamiento de los ángulos es constante, a diferencia del diésel. En este caso esta diferencia entre los ángulos de ambos tiempos de energización no se observa debido al retraso del levantamiento de la aguja, ocasionado por las propiedades físicas como lo es la densidad y viscosidad, retrasando así la transición del chorro de un estado cuasi estable a uno estable, como lo es en el caso del diésel a 1.5 ms, generando así que los ángulos de la mezcla binaria sean amplios. Estos resultados son consistentes con el trabajo de Stegemman et al. [8], donde al estudiar la influencia de los efectos de la aguja en las características macroscópicas de un usando un inyector diésel multiorificio, concluyeron que a una velocidad media, y bajo levantamiento de la aguja se producen elevados valores del ángulo del chorro.



## Área

En la Figura 5.7c, se muestra el área del chorro correspondiente a la mezcla binaria B20 para los diferentes niveles de presión de inyección y tiempos de energización estudiados. A partir de ésta figura, se puede apreciar que con un tiempo de energización de 1.5 ms, el área del chorro es mayor que el área del chorro cuando se emplea un tiempo de energización de 0.8 ms. Esto se debe a que los valores de la penetración y el ángulo del chorro tienden a mantenerse constantes en el caso del tiempo de energización más largo.

A los 0.14 ms ASOI se observa una menor diferencia en los valores del área del chorro del orden del 17 %, 8 %, y 7 % para los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa, respectivamente. A los 0.57 ms ASOI una diferencia del 6 %, 2 %, y 4 % para los niveles de presión de 170 MPa, 180 MPa, y 210 MPa. Este comportamiento en el cual al transcurrir el tiempo los valores del área del chorro se asemejan, se debe al retraso del levantamiento de la aguja, causado por las propiedades físicas de la mezcla binaria.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

---

*En el presente capítulo se sintetizan las principales conclusiones alcanzadas en el presente estudio; las cuales están relacionadas con el efecto de la presión de inyección, y el levantamiento de la aguja del inyector sobre los parámetros macroscópicos del chorro.*

## 6.1 CONCLUSIONES

- El incremento en la presión de inyección contribuye a disminuir el impacto negativo de las propiedades físicas de la mezcla binaria diésel-biodiesel en el proceso de atomización. Esto resulta en una reducción progresiva de las diferencias en los parámetros macroscópicos entre ambos combustibles a medida que se aumenta gradualmente la presión de inyección, utilizando un tiempo de energización de 0.8 ms.
- En un tiempo de energización de 1.5 ms la diferencia de la penetración entre ambos combustibles se reduce considerablemente en comparación a un tiempo de energización de 0.8 ms.
- El nivel de presión de no tiene influencia sobre el ángulo del chorro de ambos combustibles, en un tiempo de en energización de 0.8 ms.
- Con el incremento de los niveles de presión de inyección de la mezcla binaria diésel-biodiésel B20 obtuvo un comportamiento similar al del diésel, teniendo menos de un 8% de diferencia entre los chorros de ambos combustibles estudiados, por lo tanto, este método en donde se aumentan los niveles de presión de inyección ayuda a incrementar la proporción de biodiésel en una mezcla binaria.
- Cuando la aguja se encuentra a pleno levantamiento y al emplear diésel provoca una reducción del ángulo del chorro, mientras que al utilizar la mezcla binaria diésel-biodiesel no se tiene un efecto sobre el ángulo del chorro.
- Los resultados del estudio del levantamiento de la aguja sobre los parámetros macroscópicos de la mezcla binaria, muestran que la diferencia entre un tiempo de energización de 0.8 ms y 1.5 ms es menor a los datos obtenidos empleando diésel, este comportamiento se atribuye al retraso del levantamiento de la aguja derivado de las propiedades físicas de la mezcla binaria.

- Los ángulos del chorro entre ambos combustibles son estables en un tiempo de energización de 0.8 ms cuando la aguja no se encuentra en su pleno levantamiento, mientras que con un tiempo de energización de 1.5 ms, los ángulos varían entre los dos combustibles, esto se debe a que el chorro diésel con este tiempo de energización pasa del estado cuasi-estable a uno estable en menor tiempo que la mezcla binaria B20.

## 6.2 TRABAJOS FUTUROS

- Realizar experimentos enfocados en evaluar diferentes proporciones de mezclas binarias diésel-biodiésel empleando elevados niveles de presión.
- Este trabajo fue realizado con un inyector diésel tipo Solenoide de 6 orificios, por lo tanto se propone la realización de un estudio bajo las mismas condiciones pero ahora empleando un inyector diésel tipo piezoeléctrico.
- Evaluar el efecto de la temperatura de sobre los páramentos macroscópicos del chorro empleando una mezcla binaria diésel-biodiesel.
- Evaluar el efecto del aumento del nivel de presión empleando estrategias de inyección múltiple, sobre los páramentos macroscópicos del chorro de mezclas binarias diésel-biodiésel.
- Caracterizar el inyector solenoide a presiones de 180 MPa hasta 210 MPa, para estudiar el levantamiento de la aguja desde el punto de vista hidráulico.

## APÉNDICE A

# MODIFICACIÓN DEL COLOR DE LA TAPA DE LA CÁMARA A VOLUMEN CONSTANTE

---

### A.1 INTRODUCCIÓN

Para el estudio de las características macroscópicas del chorro de combustible, se utiliza un sistema de inyección diésel common-rail, una cámara de visualización a volumen constante, un sistema de iluminación y una cámara de alta velocidad para capturar imágenes del proceso de inyección. El procesamiento de las imágenes se realiza mediante un código especial desarrollado en MATLAB. Este código procesa las imágenes una por una, identifica el chorro y realiza una binarización de la imagen. A partir de esta binarización, se determinan los parámetros macroscópicos del chorro, que incluyen el área, el ángulo y la penetración del chorro. Para ello, es importante la calidad de imagen e iluminación, ya que al generarse sombras en las imágenes cerca del chorro, el código lo identifica como parte de éste, con el fin de evitar este inconveniente se ha seguido la siguiente metodología.

## A.2 METODOLOGÍA

Debido a las no uniformidades de la tapa de la cámara a volumen constante tal como se muestra en la Figura A.1, y los inconvenientes de éstas al momento de procesar las imágenes, se estableció un plan para eliminar las sombras generadas por estas no uniformidades.



FIGURA A.1: Tapa de la cámara de visualización a volumen constante antes de ser pintada.

De acuerdo con lo observado en la edición de películas e imágenes, se emplean pantallas verdes o azules en los efectos especiales, ya que esos colores no generan zonas de conflicto, como sombras, y esto facilita la edición. De estos dos colores se utilizó el color verde, ya que causa mas contraste con el color blanco del chorro.

## A.3 RESULTADOS

A continuación, se presentan los resultados obtenidos posterior a la implementación de la metodología. Como puede observar en la Figura A.4, que ya no aparecen las sombras generadas por las imperfecciones presentes en la tapa de la cámara de visualización a volumen constante, como se observan en la Figura

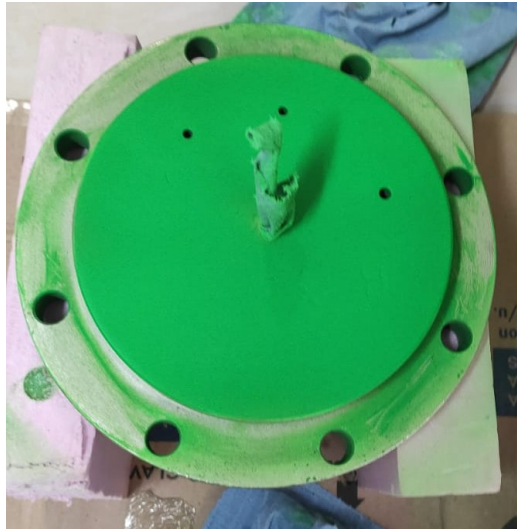


FIGURA A.2: Tapa de la cámara de visualización a volumen constante después de ser pintada.

A.3, si no que el código lo detecta como un fondo negro, lo cual hace más fácil el contraste para diferenciar el chorro de la tapa.

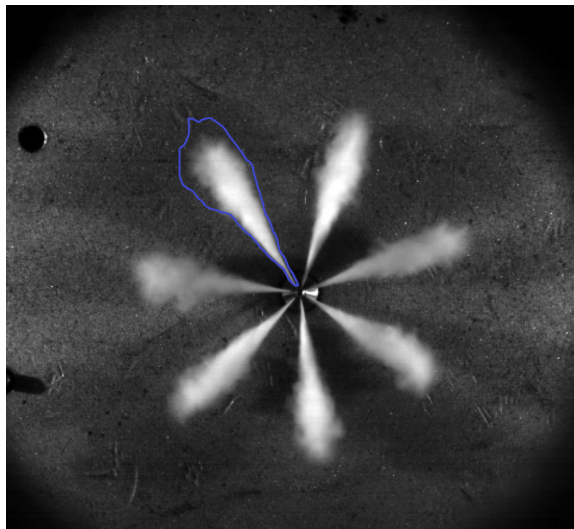


FIGURA A.3: Procesamiento de de imagen del chorro líquido sin la tapa pintada.

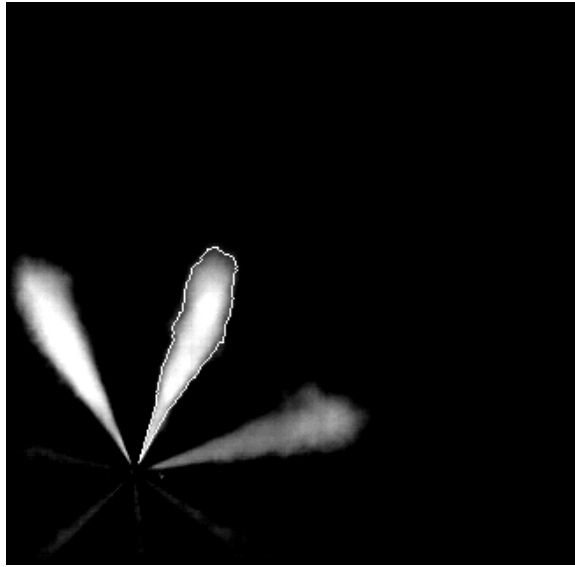


FIGURA A.4: Procesamiento de imagen de chorro líquido con la tapa pintada.

## A.4 CONCLUSIONES

Las irregularidades de la tapa de la cámara a volumen constante pueden crear sombras que dificultan el procesamiento de las imágenes, estas sombras pueden ser mitigadas con un recubrimiento de pintura del color adecuado, y así optimizar el tiempo de procesamiento de imágenes.



## APÉNDICE B

# OBTENCIÓN DE LA CURVA CARACTERÍSTICA DEL SENSOR DE PRESIÓN

---

### B.1 INTRODUCCIÓN

Para la puesta a punto del nuevo sistema de inyección diésel common rail, se utilizó una bomba BOSCH CP4.2, la cual permite alcanzar niveles de presión en el rango de 180 MPa - 200 MPa. Para medir los niveles de presión de inyección en el sistema, se utiliza un sensor piezorresistivo, el cual se aloja en el common-rail.

### B.2 METODOLOGÍA

La presión del sistema de inyección es regulada mediante una válvula reguladora de presión que se aloja en el rail, ésta es controlada por un sistema regulador de presión de la firma GENOTEC, como se muestra en la Figura B.1, este equipo cuenta con una interfaz para un mejor control de la presión, como se muestra en la Figura B.2. El sensor empleado es un sensor BOSCH

0281002948, el cual se muestra en la Figura B.3, este sensor se encuentra alojado en el rail, y mide la presión en el interior de éste.

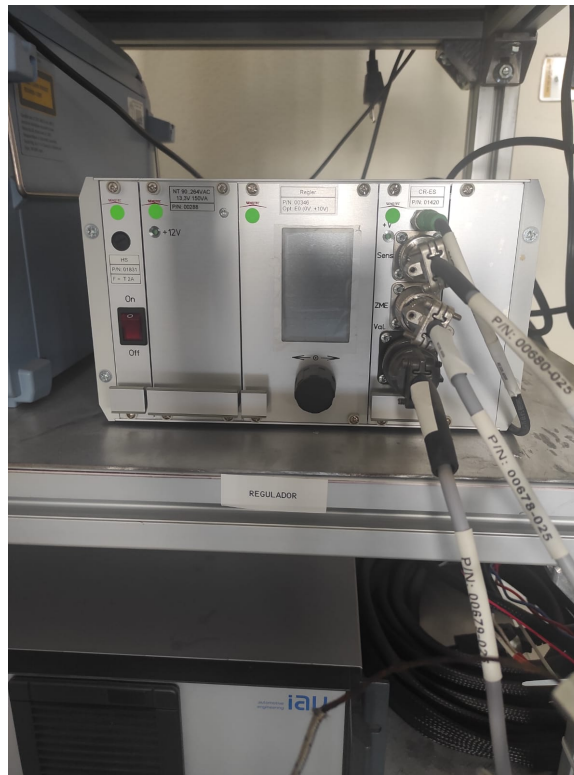


FIGURA B.1: Regulador de presión de la firma GENOTEC

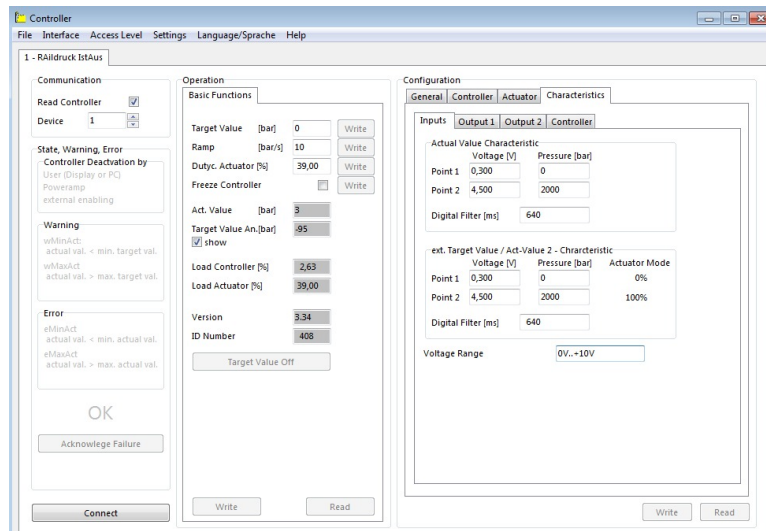


FIGURA B.2: Interfaz del regulador de presión de la firma GENOTEC



FIGURA B.3: Válvula reguladora de presión.

Anteriormente, en esta interfaz se encontraban datos de la curva de calibración del sensor del sistema de inyección de baja presión, por lo tanto, al momento de probar presiones de inyección en el nuevo sistema de inyección, se presentaban fallas como el no subir la presión de inyección a la establecida, y una mala lectura de la presión de inyección en general. Posterior a esto se solicitó el apoyo al Ing. Juan Carlos de la empresa Bosch, quién facilitó información sobre el sensor, dicha información fue corroborada al medir el voltaje del sensor con un multímetro a determinados niveles de presión de inyección, como se muestra en la Figura B.4, a partir de la cual se elaboró la curva característica que se muestra en la Figura B.5.

### B.3 RESULTADOS

Se obtuvieron buenos resultados al modificar los datos de la curva de calibración, donde antes al valor de 0 bar de presión le correspondía 0.5 V, se modificó a un valor de 0.3 V. Debido a que la nueva información mostraba que el valor mínimo de la curva de calibración se puede encontrar en un rango de valores de 0.3 a 0.5 V. Esta modificación tuvo excelentes resultados, permitiendo así empezar con la etapa de presurización e identificación de fugas en el nuevo sistema de inyección common-rail.



FIGURA B.4: Medición del voltaje del sensor de presión de inyección.

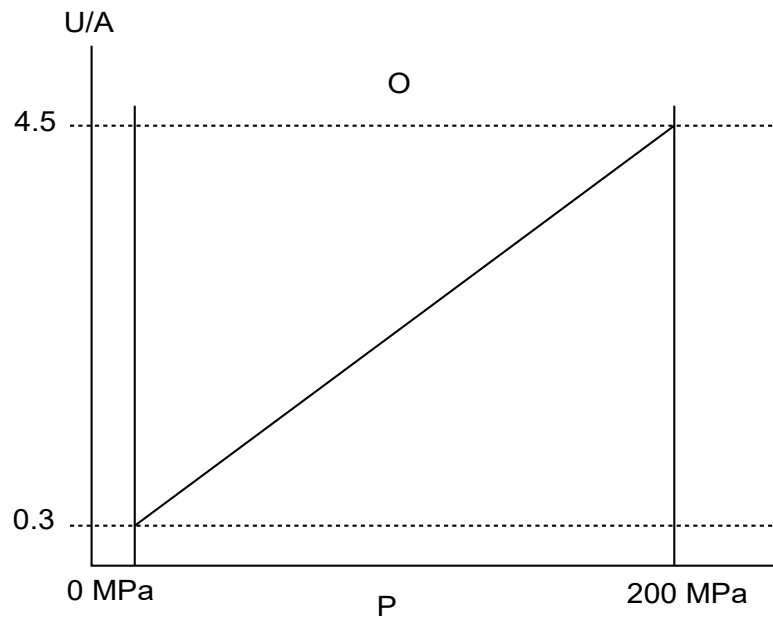


FIGURA B.5: Curva de calibración del sensor de presión de inyección.

## B.4 CONCLUSIONES

Con esto se puede concluir que, al momento de adquirir un nuevo sensor de inyección se debe corroborar su curva de calibración, para su correcto funcionamiento.

## APÉNDICE C

# VÁLVULA DOSIFICADORA DE COMBUSTIBLE

---

### C.1 INTRODUCCIÓN

Durante la puesta a punto del nuevo sistema de inyección diésel common-rail, se utilizó una bomba modelo CP4.2, la cual permite alcanzar un nivel máximo de presión del orden de 210 MPa. Al elevar el valor del nivel de presión se incrementa la temperatura del combustible. De acuerdo con los hallazgos documentados en la literatura especializada, un aumento en la temperatura se ha identificado como un factor que incide en las propiedades físicas del combustible, tales como tensión superficial, densidad y viscosidad. Estas alteraciones ejercen un impacto significativo en los parámetros macroscópicos del chorro del combustible.

### C.2 METODOLOGÍA

Con el fin de controlar el nivel de temperatura del combustible, se debe controlar el caudal másico de combustible que entra a la bomba de alta presión, a través de la energización de la válvula dosificadora de combustible misma que

se muestra señalada en la Figura C.1. Esta energización se hace a través de la interface del GENOTEC, la cual se observa en la Figura C.2.

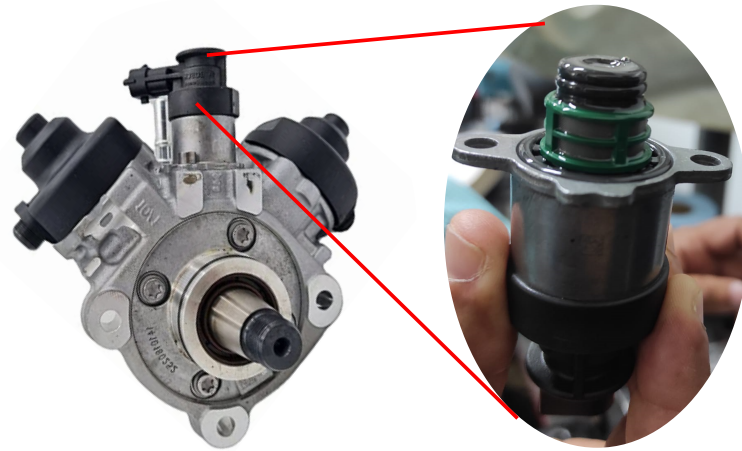


FIGURA C.1: Bomba Bosch CP4.2, y válvula reguladora de caudal.

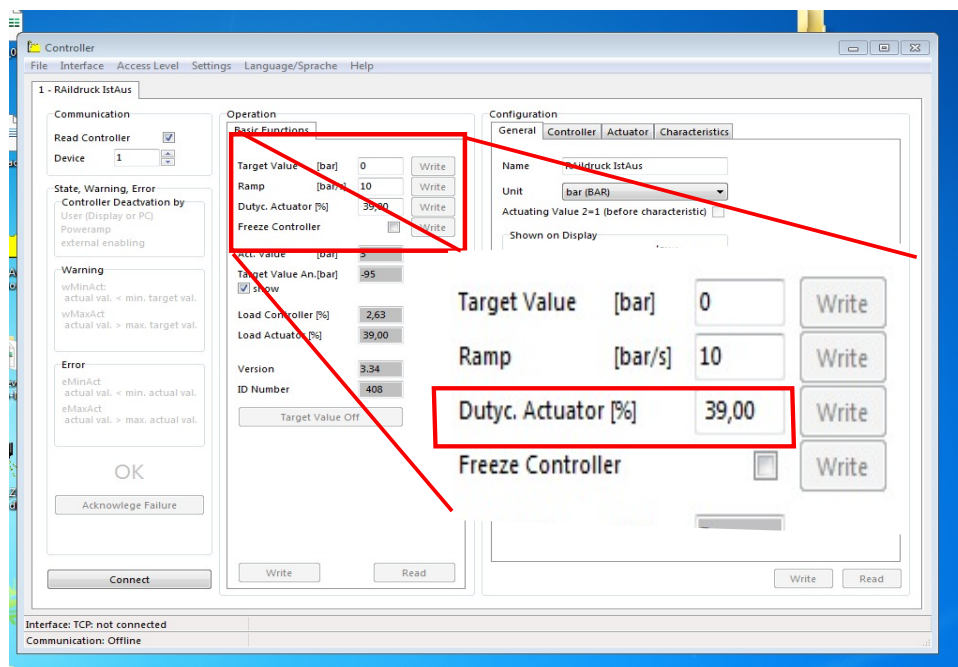


FIGURA C.2: Interface del GENOTEC para regular la válvula reguladora de caudal.

Se procedió a buscar información sobre el caudal óptimo para la bomba en diversos manuales, así como en fichas técnicas, dicha información es nula a pesar de que la bomba tiene algunos años en el mercado, por lo tanto, se

procedió a contactar al Ingeniero Juan Carlos de la empresa Bosch, quien proporcionó información al respecto. La información proporcionada consta de un valor de 0.4 amperes para el regulador de caudal, por lo tanto se realizó un barrido de toma de lectura de amperaje en la válvula dosificadora, dando como resultado un 15 % de cierre en la válvula. Posterior a esto, el ingeniero notificó al equipo de trabajo que la información se obtuvo con el empleo de un rail con 6 inyectores conectados a el, por lo tanto era mucho caudal para el sistema. Para ello se decidió aumentar el cierre de la válvula dosificadora hasta un 60 %. Posterior a esta selección se inyectó al ambiente a un nivel de presión de inyección de 50 MPa, para corroborar que la presión de inyección se mantuviese. Al momento de inyectar al aire se notó un decaimiento de presión por lo tanto, se fue ajustando el porcentaje de cierre de la válvula dosificadora ajustándola a 38 %.

### C.3 RESULTADOS

Posterior al ajuste del porcentaje del cierre de la válvula en la interface del software, se notó una disminución gradual de la temperatura de retorno y del tanque, donde en la temperatura de retorno del combustible hubo un aumento del 22 %, tal como se muestra en la Tabla C.1.

$P_{rail}$ [MPa]	Temperatura de retorno [°C]	Temperatura del tanque [°C]
10	28.92	18.16
30	35.28	32.26
60	42.69	35.16

TABLA C.1: Temperaturas del combustibe en el retorno, y en el tanque.



## C.4 CONCLUSIONES

Por lo tanto, se puede concluir que el control del caudal de la válvula dosificadora es parte fundamental de los sistemas de alta presión, para el funcionamiento correcto del sistema, y para evitar los candados hidráulicos que pueden ocurrir en las bombas derivados del exceso de caudal en el sistema. A pesar del control del caudal se presentan temperatura altas a bajas presiones de inyección, por lo tanto se requiere un sistema de enfriamiento a la salida de retorno del common-rail.

## APÉNDICE D

# MEJORA DEL ENFRIAMIENTO DEL COMBUSTIBLE MEDIANTE LA IMPLEMENTACIÓN DE UN INTERCAMBIADOR DE CALOR

---

### D.1 INTRODUCCIÓN

La temperatura del combustible incide en las características fisicoquímicas de este, como su densidad, viscosidad y tensión superficial. Estas propiedades, a su vez, ejercen un impacto significativo en el comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, como su área, penetración y ángulo. Al trabajar bajo a elevados niveles de presión de inyección, como es el caso del presente estudio se provoca un incremento en la temperatura del combustible, es por ello que se implementó un intercambiador de calor, en la línea de retorno del rail, para tener un control de la temperatura a la que se inyectará el combustible en la cámara de visualización a volumen constante. A continuación, se describe La metodología que se ha empleado para realizar esta implementación del intercambiador de calor.

## D.2 METODOLOGÍA

En la tabla D.1, se muestran los valores de las temperaturas de retorno, y del tanque para los niveles de  $P_{rail}$  de 10 MPa, 30 MPa, y 60 MPa, específicamente se puede observar que al incrementar el nivel de presión de inyección de 30 MPa a 60 MPa, temperatura del combustible en el retorno, y de la temperatura del combustible en el tanque del 21 % y 8.98 %, respectivamente. Es por ello, la necesidad de la implementación de un intercambiador de calor en la línea de retorno del combustible en el rail.

$P_{rail}$ [MPa]	Temperatura del combustible en el retorno [°C]	Temperatura del combustible en el tanque [°C]
10	28.92	18.16
30	35.28	32.26
60	42.69	35.16

TABLA D.1: Temperaturas del combustible en el retorno, y en el tanque.

En uno de los primeros sistemas de inyección se implementó un intercambiador de calor, el cual se se muestra en la Figura D.1. Este intercambiador se reutilizó de ese sistema, y previo a su instalación se realizó un análisis para ver si cumplía los requerimientos para el nuevo sistema de inyección. En este análisis se evaluaron las características necesarias que debe de cumplir el intercambiador de calor y el baño térmico, para disminuir la temperatura del combustible 40 °C. De acuerdo a este análisis, el caudal que fluye del combustible en el interior del intercambiador es de 1.2 l/m, y se requieren máximo 4.08 l/m de refrigerante para lograr este descenso de temperatura. El baño térmico seleccionado para este intercambiador de calor tiene un caudal de 11 l/m, por lo tanto el intercambiador de calor, y el baño térmico se consideran aptos para su implementación en el nuevo sistema de inyección.

Este intercambiador tenía alrededor de 10 años sin ser utilizado por lo tanto se tuvo que realizar limpieza profunda, y se tuvo que mandar a hacer empaques especiales.



FIGURA D.1: Intercambiador de calor

Para empezar con la limpieza se tuvo que abrir el intercambiador con llaves Allen de 3/8, posterior a su apertura, debido a que los empaques se adherieron a las tapas, como se muestra en la Figura D.2, éstas se tuvieron que limpiar con acetona, mientras que los tubos internos del intercambiador tuvieron que ser llenados con gasolina, y se dejaron reposar por dos días, para eliminar cualquier presencia de suciedad, y restos del liquido que antes circulaba entre ellos, tal como se muestra en la Figura D.3.



FIGURA D.2: Tapa del intercambiador de calor.

Posterior a la limpieza, se colocaron los empaques de teflón, los cuales fueron seleccionados debido a las condiciones de trabajo del sistema de inyección.



FIGURA D.3: Tubos internos del intercambiador de calor

Seguidamente de la selección de empaques, se rectificaron las cuerdas del intercambiador, mediante el empleo de un machuelo de 3/8. Los empaques fueron sellados con silicón resistente a altas temperaturas, como se representa en la Figura D.4.

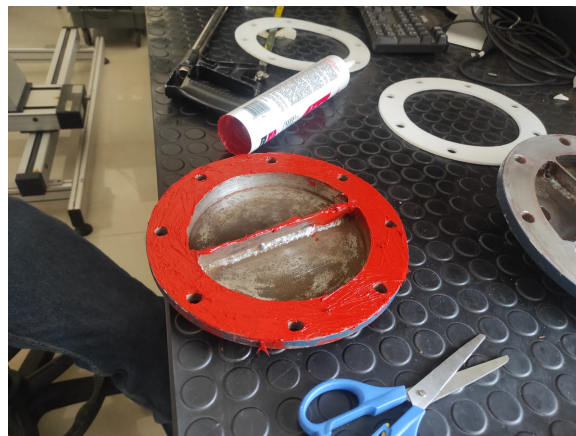


FIGURA D.4: Tapa del intercambiador de calor con silicón.

Seguidamente del sellado de los empaques y el tiempo de fragua, se pasó diésel entre las tuberías del intercambiador para rectificar la limpieza, y detección de fugas. No se presentaron fugas en el sistema, por lo tanto estaba listo para su implementación en el nuevo sistema de inyección. Esto se muestra en la Figura D.5.



FIGURA D.5: Intercambiador de calor limpio.

La adición de otro intercambiador de calor al sistema requiere de un baño térmico, por lo tanto se adicionó el baño térmico del antiguo sistema, el cual fue conectado al intercambiador, con el cual originalmente contaba el sistema, que se encuentra colocado antes del common-rail. Debido a que este nuevo intercambiador necesita bajar temperatura altas, se seleccionó el baño térmico con mayor capacidad para esta tarea, baño térmico el cual se muestra en la Figura D.6. A continuación, se presentan los resultados experimentales posteriores a la implementación del intercambiador de calor.



FIGURA D.6: Baño térmico.

### D.3 RESULTADOS

Se realizaron experimentos para verificar el funcionamiento del intercambiador de calor, empleando elevados niveles de presión de inyección como se muestran en la Tabla D.2. Donde se observa una temperatura de 41.15 °C a los 150 MPa de presión de inyección, esta temperatura anteriormente a la implementación del intercambiador era registrada a los 60 MPa como se muestra en la Tabla D.1. Se puede observar en esta tabla que al incrementar la presión de inyección de 110 a 180 MPa, hay un incremento del 36 % la temperatura del combustible en el retorno, y un aumento del 47 % en la temperatura del combustible en el tanque.

$P_{rail}$ [MPa]	Temperatura del combustible en el retorno [°C]	Temperatura del combustible en el tanque [°C]
110	38.02	20.51
150	41.15	20.78
160	41.03	20.73
180	51.69	30.21

TABLA D.2: Temperaturas del combustible en el retorno, y en el tanque.

## D.4 CONCLUSIONES

Se puede concluir que la implementación del nuevo intercambiador fue exitosa, la temperatura del tanque se mantiene bajo control, lo cual es muy favorable al momento de realizar experimentación. Anteriormente, en el antiguo sistema de inyección al momento de llegar a los 51°C de temperatura, en el tanque se procedía a suspender los experimentación hasta que bajara la temperatura. Con este nuevo sistema el tiempo de experimentación se ha reducido a 12 experimentos en 2 días a 12 experimentos en 1 hora.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] L. Corral-Gómez, G. Rubio-Gómez, S. Martínez-Martínez, and F.A. Sánchez-Cruz. Effect of diesel-biodiesel-ethanol blends on the spray macroscopic parameters in a common-rail diesel injection system. *Fuel*, 241:876–883, 4 2019.
- [2] Xiangang Wang, Zuohua Huang, Olawole Abiola Kuti, Wu Zhang, and Keiya Nishida. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure. *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 31:659–666, 8 2010.
- [3] Thomas Bohl, Guohong Tian, Andrew Smallbone, and Anthony P. Roskilly. Macroscopic spray characteristics of next-generation bio-derived diesel fuels in comparison to mineral diesel. *Applied Energy*, 186:562–573, 1 2017.
- [4] Moch Miftahul Arifin, Nasrul Ilminnafik, Muh. Nurkoyim Kustanto, and Agus Triono. Spray characteristics at preheating temperatur of diesel-biodiesel-gasoline fuel blend. *Journal of Mechanical Engineering Science and Technology*, 5:134, 11 2021.
- [5] Joonsik Hwang, Choongsik Bae, and Tarun Gupta. Application of waste cooking oil (wco) biodiesel in a compression ignition engine. *Fuel*, 176:20–31, 7 2016.
- [6] Meshack Hawi, Hidenori Kosaka, Susumu Sato, Tsuyoshi Nagasawa, Ahmed Elwardany, and Mahmoud Ahmed. Effect of injection pressure and

- ambient density on spray characteristics of diesel and biodiesel surrogate fuels. *Fuel*, 254:115674, 10 2019.
- [7] Raditya Hendra Pratama, Weidi Huang, and Seoksu Moon. Unveiling needle lift dependence on near-nozzle spray dynamics of diesel injector. *Fuel*, 285:119088, 2 2021.
- [8] J Stegemann, J Seebode, J Baltes, C Baumgarten, and G P Merker. Influence of throttle effects at the needle seat on the spray characteristics of a multihole injection nozzle, 2002.
- [9] Ricardo Martínez Carrillo. Estudio sobre el comportamiento del proceso de inyección empleando un inyector diesel solenoide y piezoeléctrico bajo diferentes estrategias de inyección múltiple, tesis de maestría, 2021.
- [10] Fausto A. SanchezCruz Simon Martínez-Mrtínez. Erick V. Maqueda-Aguilar Miguel García-Yera, Oscacr A. de la Garzaa. Caracterización hidráulica de un inyector diésel tipo solenoide empleando elevados niveles de presión de inyección. *Memorias de la Sociedad Mexicana de Ingeniería Mecánica*, pages 1–8, 2023.
- [11] Detlev Schöppe, Christian Stahl, Grit Krüger, and Vincent Dian. Servo-driven piezo common rail diesel injection system. *ATZautotechnology*, 12:42–47, 4 2012.
- [12] Robert Bosch GmbH. and Society of Automotive Engineers. *Diesel-engine Management*. Automotive technologie. Society of Automotive Engineers, 2004.
- [13] d’Ambrosio S. and Ferrari A. Diesel engines equipped with piezoelectric and solenoid injectors: hydraulic performance of the injectors and comparison of the emissions, noise and fuel consumption. *Applied Energy*, 211:1324–1342, 2 2018.

- 
- [14] Francisco J Salvador, Alejandro H Plazas, Jaime Gimeno, and Marcos Carreres. Complete modelling of a piezo actuator last-generation injector for diesel injection systems. *International Journal of Engine Research*, 15:3–19, 1 2014.
- [15] Nasser Ashgriz. *Handbook of atomization and sprays: theory and applications*. Springer, 2011.
- [16] RD Reitz and FV Bracco. Mechanism of atomization of a liquid jet., 1982.
- [17] José M. Desantes, Jean Arrègle, J. Javier López, and Sjoerd Hermens. Experimental characterization of outlet flow for different diesel nozzle geometries. 5 2005.
- [18] R. Payri, F.J. Salvador, J. Gimeno, and L.D. Zapata. Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions. *Fuel*, 87:1165–1176, 6 2008.
- [19] Jiro Senda, Nobunori Okui, Teppei Suzuki, and Hajime Fujimoto. Flame structure and combustion characteristics in diesel combustion fueled with bio-diesel. 3 2004.
- [20] S. d’Ambrosio and A. Ferrari. Potential of double pilot injection strategies optimized with the design of experiments procedure to improve diesel engine emissions and performance. *Applied Energy*, 155:918–932, 10 2015.
- [21] Sylvain Mendez and Benoist Thirouard. Using multiple injection strategies in diesel combustion: Potential to improve emissions, noise and fuel economy trade-off in low cr engines. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 1:2008–01–1329, 4 2008.
- [22] P Carlucci, A Ficarella, and D Laforgia. Effects on combustion and emissions of early and pilot fuel injections in diesel engines. *International Journal of Engine Research*, 6:43–60, 2 2005.

- [23] Ahmed Abdul Moiz, Muhsin M Ameen, Seong-Young Lee, and Sibendu Som. Study of soot production for double injections of n-dodecane in ci engine-like conditions. *Combustion and Flame*, 173:123–131, 11 2016.
- [24] Gang Wu, Xinyi Zhou, and Tie Li. Temporal evolution of split-injected fuel spray at elevated chamber pressures. *Energies*, 12:4284, 11 2019.
- [25] H.G. How, H.H. Masjuki, M.A. Kalam, Y.H. Teoh, and H.G. Chuah. Effect of calophyllum inophyllum biodiesel-diesel blends on combustion, performance, exhaust particulate matter and gaseous emissions in a multi-cylinder diesel engine. *Fuel*, 227:154–164, 9 2018.
- [26] S. Kent Hoekman, Amber Broch, Curtis Robbins, Eric Cenicerros, and Mani Natarajan. Review of biodiesel composition, properties, and specifications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16:143–169, 1 2012.
- [27] Paramasivam. Sivaramakrishnan K. Ravikumar. Determination of cetane number of biodiesel and it's influence on physical properties. *asian journal of applied sciences*. 2012.
- [28] Gerpen JV. Biodiesel processing and production. *fuel process technol.* 2005.
- [29] S. Kent Hoekman and Curtis Robbins. Review of the effects of biodiesel on nox emissions. *Fuel Processing Technology*, 96:237–249, 4 2012.
- [30] S. Thiyagarajan, V. Edwin Geo, Leenus Jesu Martin, and B. Nagalingam. Comparative analysis of various methods to reduce co2 emission in a biodiesel fueled ci engine. *Fuel*, 253:146–158, 10 2019.
- [31] M. U. Kaisan, F. O. Anafi, J. Nuszowski, D. M. Kulla, and S. Umaru. Calorific value, flash point and cetane number of biodiesel from cotton, jatropha and neem binary and multi-blends with diesel. *Biofuels*, 11:321–327, 4 2020.

- [32] Kamalesh A. Sorate and Purnanand V. Bhale. Biodiesel properties and automotive system compatibility issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 41:777–798, 1 2015.
- [33] Digambar Singh, Dilip Sharma, S.L. Soni, Chandrapal Singh Inda, Sumit Sharma, Pushendra Kumar Sharma, and Amit Jhalani. A comprehensive review of biodiesel production from waste cooking oil and its use as fuel in compression ignition engines: 3rd generation cleaner feedstock. *Journal of Cleaner Production*, 307:127299, 7 2021.
- [34] L N Komariah, F Hadiah, F Aprianjaya, and F Nevriadi. Biodiesel effects on fuel filter; assessment of clogging characteristics. *Journal of Physics: Conference Series*, 1095:012017, 9 2018.
- [35] Rajendra Kukana and Om Prakash Jakhar. Effect of ternary blends diesel/n-propanol/composite biodiesel on diesel engine operating parameters. *Energy*, 260:124970, 12 2022.
- [36] Rasim Behçet, Recep Yumrutaş, and Hasan Oktay. Effects of fuels produced from fish and cooking oils on performance and emissions of a diesel engine. *Energy*, 71:645–655, 7 2014.
- [37] Marina Kousoulidou, Georgios Fontaras, Leonidas Ntziachristos, and Zisis Samaras. Biodiesel blend effects on common-rail diesel combustion and emissions. *Fuel*, 89:3442–3449, 11 2010.
- [38] Allen and K. C. Watts. Comparative analysis of the atomization characteristics of fifteen biodiesel fuel types. *Transactions of the ASAE*, 43:207–211, 2000.
- [39] Balaji Mohan, Wenming Yang, Kun Lin Tay, and Wenbin Yu. Experimental study of spray characteristics of biodiesel derived from waste cooking oil. *Energy Conversion and Management*, 88:622–632, 12 2014.

- 
- [40] José M. Desantes, Raúl Payri, Antonio García, and Julien Manin. Experimental study of biodiesel blends' effects on diesel injection processes. *Energy Fuels*, 23:3227–3235, 6 2009.
- [41] Avinash Kumar Agarwal and Vipul H. Chaudhury. Spray characteristics of biodiesel/blends in a high pressure constant volume spray chamber. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 42:212–218, 10 2012.
- [42] Li Guan, Chenglong Tang, Ke Yang, Jun Mo, and Zuohua Huang. Effect of di-n-butyl ether blending with soybean-biodiesel on spray and atomization characteristics in a common-rail fuel injection system. *Fuel*, 140:116–125, 1 2015.
- [43] Sattar Jabbar Murad Algayyim and Andrew P. Wandel. Macroscopic and microscopic characteristics of biofuel spray (biodiesel and alcohols) in ci engines: A review. *Fuel*, 292:120303, 5 2021.
- [44] Hyung Jun Kim, Su Han Park, Hyun Kyu Suh, and Chang Sik Lee. Atomization and evaporation characteristics of biodiesel and dimethyl ether compared to diesel fuel in a high-pressure injection system. *Energy Fuels*, 23:1734–1742, 3 2009.
- [45] Zhang W Nishida K. Wang X Huang Z, Kuti OA. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure. *Heat Fluid Flow*, 2010.
- [46] Omar Torrez Garza. Efectos de los parametros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor diesel, tesis de maestría, 2016.
- [47] José M. Diab Simón Martínez-Martínez María Fernanda Uscanga-Tenorio Ángel Leonides Rodríguez-Ramos, Oscar A. de la Garza. Determinación de la geometría interna de una tobera de inyección diésel empleando la técnica de tomografía computarizada, memorias del congreso de la sociedad mexicana de ingeniería mecánica. pages 1–6, 2022.

- [48] Guillermo Rubio-Gómez, S Martínez-Martínez, Luis F Rúa-Mojica, Pablo Gómez-Gordo, and Oscar A de la Garza. Automatic macroscopic characterization of diesel sprays by means of a new image processing algorithm. *Measurement Science and Technology*, 29:055406, 5 2018.
- [49] Violeta Y. Mena-Cervantes, Simón Martínez-Martínez, Oscar A. de la Garza, Raúl Hernández-Altamirano, Miguel García-Yera, and Miguel F. Altamirano-Muratalla. Biodiesel derived from waste cooking oil in blends with ultra-low sulphur diesel and its spray macroscopic properties under split injection strategy. *Biofuels*, 2022.
- [50] I Paryanto, E Rismana, AD Arbianto, T Prakoso, and M Gozan. The effect of fuel filter pore size on b20 fuel filter clogging at low-temperature condition. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 520:012002, 6 2020.
- [51] Annisa Bhikuning, Ryunosuke Sugawara, Eriko Matsumura, and Jiro Sendada. Investigation of spray characteristics from waste cooking oil, bio-hydro fined diesel oil (bhd)and n-tridecane in a constant volume chamber. *Case Studies in Thermal Engineering*, 21:100661, 10 2020.
- [52] Jai Gopal Gupta and Avinash Kumar Agarwal. Macroscopic and microscopic spray characteristics of diesel and karanja biodiesel blends. 4 2016.
- [53] Hongzhan Xie, Lanbo Song, Yizhi Xie, Dong Pi, Chunyu Shao, and Qizhao Lin. An experimental study on the macroscopic spray characteristics of biodiesel and diesel in a constant volume chamber. *Energies*, 8:5952–5972, 6 2015.
- [54] Xiang Li, Yi qiang Pei, Jing Qin, Dan Zhang, Kun Wang, and Bei Xu. Effect of ultra-high injection pressure up to 50 mpa on macroscopic spray characteristics of a multi-hole gasoline direct injection injector fueled with ethanol. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 232:1092–1104, 7 2018.

- 
- [55] Jun Mo, Chenglong Tang, Junge Li, Li Guan, and Zuohua Huang. Experimental investigation on the effect of n-butanol blending on spray characteristics of soybean biodiesel in a common-rail fuel injection system. *Fuel*, 182:391–401, 10 2016.



# RESUMEN AUTOBIOGRÁFICO

---

Marissa Hernández Aguilar

Candidato para obtener el grado de  
Maestría en Energías Termicas y Renovables  
con Orientación en Energías Térmica y Renovable

Universidad Autónoma de Nuevo León  
Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Tesis:

EVALUACIÓN DE MEZCLAS DIÉSEL-BIODIESEL A PARTIR DE LA  
CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS  
DEL CHORRO DE COMBUSTIBLE EMPLEANDO ELEVADOS  
NIVELES DE PRESIÓN DE INYECCIÓN.

Nací en Tlaxcala en 1996, hija de Paula Araceli Aguilar Alcalá y Jaime Hernández León, me recibí como Técnico laboratorista químico en el Centro de Bachillerato Tecnológico Industrial y de Servicios 103, ubicado en Ciudad Madero, Tamaulipas en 2014 y me titulé como Ingeniera Petrolera en el Tecnológico de Ciudad Madero en 2018. Actualmente busco recibirme como maestra en ciencias en la Universidad Autónoma de Nuevo León.