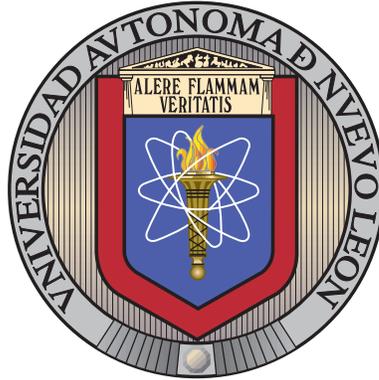


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



EFEECTO DE LA TEMPERATURA DE UNA MEZCLA
DIÉSEL-BIODIÉSEL DERIVADO DEL ACEITE DE
HIGUERILLA SOBRE LOS PARÁMETROS
MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

POR

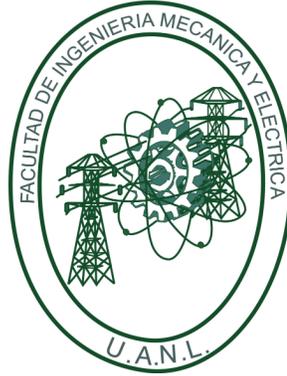
ANGEL LEONIDES RODRIGUEZ RAMOS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

24 DE JUNIO DE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA



EFEECTO DE LA TEMPERATURA DE UNA MEZCLA
DIÉSEL-BIODIÉSEL DERIVADO DEL ACEITE DE
HIGUERILLA SOBRE LOS PARÁMETROS
MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

POR

ANGEL LEONIDES RODRIGUEZ RAMOS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

24 DE JUNIO DE 2024

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

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Efecto de la temperatura de una mezcla diésel-biodiésel derivado de aceite de higuera sobre los parámetros macroscópicos del chorro”, realizada por la estudiante Ángel Leondies Rodríguez Ramos, con número de matrícula 2130446, 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

Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León
Director

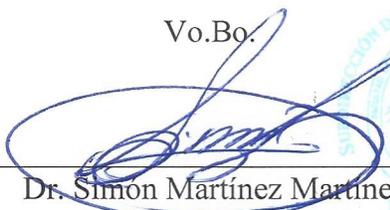
Dr. Raúl Hernández Altamirano
Co-Director

Dr. Simón Martínez Martínez
Revisor

M.C. Miguel García Yera
Revisor

Dr. Violeta Yasmín Mena Cervantes
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4321

Ciudad Universitaria, a 27 de febrero de 2024.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	xvii
Resumen	xix
1. Introducción	1
2. Estado actual del conocimiento	5
2.1. Biodiésel	6
2.1.1. Propiedades fisicoquímicas	8
2.2. Sistema de inyección diésel	10
2.2.1. Sistema de inyección common-rail	11
2.2.2. Inyector diésel	12
2.3. Proceso de atomización	14
2.3.1. Régimen de atomización	15
2.4. Parámetros macroscópicos del chorro	17
2.4.1. Penetración del chorro diésel	18
2.4.2. Ángulo del chorro	19

2.4.3. Área del chorro	19
2.5. Biodiésel derivado de aceite de ricino	20
2.6. La temperatura y los combustibles	29
2.6.1. Efecto de la temperatura en los parámetros macroscópicos del chorro	35
3. Planteamiento de la tesis	42
3.1. Síntesis de la revisión bibliográfica	43
3.2. Hipótesis	45
3.3. Objetivos	45
3.4. Metodología general	46
4. Metodología de la tesis	50
4.1. Herramientas experimentales	51
4.1.1. Sistema de inyección diésel common-rail	52
4.1.2. Sistema de visualización de los parámetros macroscópicos del chorro	57
4.1.3. Sistemas electrónicos de control	59
4.2. Plan de trabajo	61
4.2.1. Combustibles	61
4.2.2. Modificación y revisión de la instalación experimental	65
4.2.3. Condiciones de operación	66

4.2.4. Obtención y procesado de las imágenes del chorro de combustible	67
5. Efecto de la temperatura del combustible en el proceso de mezcla	71
5.1. Caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro de diferentes combustibles	72
5.2. Efecto de la temperatura sobre los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20	79
5.2.1. Nivel de presión de inyección: 80 MPa	79
5.2.2. Nivel de presión de inyección: 100 MPa	85
5.2.3. Nivel de presión de inyección: 120 MPa	89
5.3. Comparación de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 con el diésel	94
5.3.1. Nivel de presión de inyección 80 MPa	94
5.3.2. Nivel de presión de 100 MPa	99
5.3.3. Nivel de presión de 120 MPa	103
6. Conclusiones y trabajos futuros	108
6.1. Conclusiones	109
6.2. Trabajos futuros	112
A. Instalación de los intercambiadores de calor	113
B. Pruebas de la instalación experimental	116
B.1. Revisión de la cámara de visualización a volumen constante	116

B.2. Pruebas del sistema de inyección tipo <i>common-rail</i>	120
C. Comparación de los parámetros macroscópicos del chorro	123
C.1. Variación del tiempo de energización	123
C.2. Variación del nivel de presión de inyección	134

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Diagrama del proceso de transesterificación.	7
2.2. Esquema del sistema de inyección <i>common-rail</i>	12
2.3. Esquema de un inyector con válvula tipo solenoide.	13
2.4. Válvula de accionamiento electromagnética de un inyector solenoide. .	13
2.5. Parámetros macroscópicos del chorro del combustible.	17
2.6. Evolución temporal de la penetración.	24
2.7. Evolución temporal del ángulo de chorro.	24
2.8. Penetración del chorro a) 250 bar, b) 500 bar y c) 750 bar.	25
2.9. Evolución temporal del ángulo de cono de tres diferentes combustibles.	26
2.10. Consumo específico de combustible en función del régimen de giro. . .	27
2.11. Potencia del motor en función del grado de carga del motor.	28
2.12. Eficiencia mecánica en función del grado de carga del motor.	28
2.13. Variación de la viscosidad, y densidad del biodiésel de <i>jatropha</i> con la temperatura.	32

2.14. Variación de la tensión superficial del biodiésel de <i>jatropha</i> con la temperatura.	32
2.15. Eficiencia térmica de un motor Diesel empleando diferentes combustibles.	33
2.16. Emisiones de NOx de un motor Diesel, empleando diferentes combustibles.	34
2.17. Ángulo del chorro de diferentes mezclas de WCO.	36
2.18. Área del chorro de diferentes mezclas con WCO.	37
2.19. Penetración del chorro del combustible empleando diferentes mezclas, y diferentes temperaturas.	38
2.20. Velocidad del chorro de diferentes mezclas empleando diferentes temperaturas.	38
2.21. Ángulo del chorro de diferentes mezclas empleando diferentes temperaturas.	39
2.22. Comparación de la penetración, y ángulo del diésel y biodiésel de <i>neem</i> , empleando una estrategia de inyección simple, y dividida. a) Penetración, b) ángulo del chorro.	40
2.23. Comparación de la penetración, y ángulo del diésel y biodiésel de <i>neem</i> , empleando una temperatura de 60 °C, y estrategias de inyección simple, y dividida. a) Penetración, b) ángulo del chorro.	40
3.1. Diagrama de la metodología general.	47
4.1. Esquema de la instalación experimental para la visualización del chorro diésel.	51

4.2. Depósito de combustible del sistema de inyección.	52
4.3. Bomba de combustible de baja presión.	53
4.4. Equipo empleado para el funcionamiento de la bomba de alta presión.	53
4.5. Filtro de combustible.	54
4.6. Sistema de refrigeración de combustible.	55
4.7. Baños térmicos empleados en el sistema de inyección.	55
4.8. <i>Common-rail</i> de combustible de la marca Bosch.	56
4.9. Inyector diésel tipo solenoide CRI 2.22.	57
4.10. Cámara de visualización a volumen constante.	58
4.11. Esquema de la aplicación de la técnica de iluminación por dispersión Mie.	58
4.12. Equipos electrónicos empleados en el control de la inyección.	60
4.13. Equipo electrónico de regulación de la presión de inyección Regler. . .	60
4.14. Pinza amperimétrica.	61
4.15. Propiedades fisicoquímicas de la mezcla BH20 a diferentes tempera- turas. a) Viscosidad dinámica, b) viscosidad cinemática, c) densidad.	64
4.16. Imagen empleada para obtener la relación píxel-mm.	69
4.17. Imagen del chorro de la mezcla BH20 empleando un P_{rail} de 120 MPa, una P_{back} de 5 MPa, una temperatura de 40 °C, y un TE de 1.0 ms. .	70
5.1. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel a 100 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	73

5.2. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 120 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 50 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	74
5.3. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel empleando una temperatura del combustible de 40 °C, y tres niveles de P_{rail} , 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro	76
5.4. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos de la mezcla BH20 empleando una temperatura del combustible de 60 °C, y tres niveles de P_{rail} , 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro	78
5.5. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando tres diferentes temperaturas. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	80
5.6. Isotiempos de la penetración del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 80 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.	81
5.7. Isotiempos del ángulo del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 80 MPa, TE de 1.0 ms, y las tres temperaturas estudiadas.	83
5.8. Isotiempos del área del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 80 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.	84
5.9. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando diferentes temperaturas. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro	86
5.10. Isotiempos de la penetración del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 100 MPa, TE de 1.0 ms, y dos temperaturas.	87

5.11. Isotiempos del ángulo del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 100 MPa, TE de 1.0 ms, y dos temperaturas.	88
5.12. Isotiempos del área del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 100 MPa, TE de 1.0 ms, y dos temperaturas.	89
5.13. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando tres diferentes temperaturas. a) Penetración, b) Ángulo, c) Área del chorro.	90
5.14. Isotiempos de la penetración del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 120 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.	91
5.15. Isotiempos del ángulo del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 120 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.	92
5.16. Isotiempos del área del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 120 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.	93
5.17. Comparación de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para el diésel, y la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C. a) Penetración, b) Ángulo, c) Área del chorro.	95
5.18. Penetración normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	96
5.19. Ángulo del chorro normalizado de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	97
5.20. Área del chorro normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	99
5.21. Comparación de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para el diésel, y la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C. a) Penetración, b) Ángulo, c) Área del chorro.	100
5.22. Penetración normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	101

5.23. Ángulo del chorro normalizado de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	102
5.24. Área del chorro normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	103
5.25. Comparación de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para el diésel, y la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C. a) Penetración, b) Ángulo, c) Área del chorro.	104
5.26. Penetración normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	105
5.27. Ángulo del chorro normalizado de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	106
5.28. Área del chorro normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.	107
A.1. Placa para instalación de los enfriadores.	114
A.2. Enfriador de combustible empleado. a) Enfriador, b) Montaje en la instalación experimental.	114
A.3. Instalación de fibra de vidrio en el sistema de inyección.	115
A.4. Programa de Visualización modificado.	115
B.1. Tapa frontal de cámara a volumen constante encontrada después de la revisión.	117
B.2. Tapa frontal de la cámara a volumen constante lijada y preparada para el proceso de pintado.	118
B.3. Tapa frontal en diferentes etapas del proceso de pintado. a) Pintada con la base gris, b) Pintada de verde, c) Lista para su instalación . . .	119

B.4. Imágenes obtenidas de la tapa de la cámara de visualización a volumen constante.	120
B.5. Distribución de la temperatura en cuatro puntos del sistema de inyección diésel <i>common-rail</i> empleando una P_{rail} de 80 MPa.	121
C.1. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel a 80 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	124
C.2. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel a 120 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	125
C.3. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 80 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 40 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	126
C.4. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 100 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 40 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	127
C.5. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 120 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 40 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	128
C.6. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 80 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 50 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.	129

C.7. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 100 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 50 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro. 130

C.8. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 80 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 60 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro. 131

C.9. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 100 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 60 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro. 132

C.10. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 120 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 60 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro. 133

C.11. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos de la mezcla BH20 empleando una temperatura de 40 °C, una P_{back} de 5 MPa, un TE de 1.0 ms, y tres niveles de P_{rail} , 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro. 135

C.12. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos de la mezcla BH20 empleando una temperatura de 50 °C, una P_{back} de 5 MPa, un TE de 1.0 ms, y tres niveles de P_{rail} , 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro. 136

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel derivado del aceite de ricino.	22
2.2. Propiedades fisicoquímicas de diferentes mezclas diésel-biodiésel derivado de aceite de ricino.	23
2.3. Propiedades fisicoquímicas de biodiéselos de diferentes materias primas.	29
4.1. Propiedades fisicoquímicas de los combustibles.	63
4.2. Matriz experimental para la realización de las inyecciones simples.	66
B.1. Datos experimentales de la temperatura del sistema de inyección empleando una P_{rail} de 80 MPa.	122
B.2. Datos experimentales de la temperatura del sistema de inyección a diferentes P_{rail} , y con 20 °C en los baños térmicos.	122

AGRADECIMIENTOS

Le agradezco a mis padres Concepción Ramos Sol, y Santos del Carmen Rodríguez Mazariegos, quienes me apoyaron durante los malos y buenos momentos que viví durante los dos años de duración de esta maestría, así mismo, a mi hermana Nelly Esmeralda, quien también me ofreció apoyo y consejos. También quiero agradecer a mis abuelos quienes están orgullosos de este logro.

Gracias a mis amigos, y compañeros de generación Brandon Reyes Ramírez, Erick Valentín Maqueda Aguilar, y Omar Salomón Barbosa Machain, con quienes compartí momentos no solo dentro del aula, sino también fuera de ella, por su compañía, apoyo, consejos, y las risas en los distintos momentos que vivimos.

Gracias a mis amigos, y compañeros de laboratorio María Fernanda Uscanga Tenorio, Marissa Hernández Aguilar, Ramón, José, y Alberto, por hacer mas ameno el ambiente, y la estadía durante el periodo que estuve con ustedes, asimismo, por compartir sus consejos, y experiencias vividas.

Gracias a mi director de tesis, y coordinador de la maestría el Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León, a mi codirector el Dr. Raúl Hernández Altamirano, y al M.C. Miguel García Yera, por sus consejos, y apoyo durante la ejecución de esta investigación, así como por sus enseñanzas. Así mismo, agradezco a los doctores que conforman el grupo de investigación de los Laboratorios de Investigación e Innovación de Tecnología Energética (LIITE), del grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR).

Gracias a la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por permitirme desarrollarme ingresar al excelente programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

Gracias al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCYT) del Gobierno de México por la financiación de mis estudios de maestría (beca: 1163461), y por el apoyo al proyecto Consolidación del LaNDACBio como un laboratorio insignia de desarrollo tecnológico e innovación de los bioenergéticos en México (89).

Al Programa de Apoyo a la Ciencia, Tecnología e Innovación ProACTI (150-IDT-2023) por apoyar la presente investigación.

A la Fundación DENSO Norteamérica (proyecto: Influence of multiple-injection strategies on the injection process using direct-acting piezoelectric and solenoid diesel injectors) por contribuir en la realización del presente trabajo. Este trabajo se realizó en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) del Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) de la FIME-UANL.

RESUMEN

El biodiésel se emplea como un combustible alternativo para reducir las emisiones contaminantes, éste se puede derivar de diferentes materias primas, tales como el aceite de girasol, residuos, aceite de ricino, entre otros. Donde la principal ventaja del aceite de ricino, como materia prima, es que puede ser destinado completamente a la producción de biodiésel, sin embargo, su principal desventaja es su elevado valor de viscosidad, y densidad, comparados con el valor del diésel mineral. Existen diferentes formas para compensar los efectos de estas propiedades durante el proceso de inyección, tal como elevar la temperatura del combustible antes del proceso de inyección al interior de la cámara de combustión. Estudios demuestran que el uso de biodiésel derivado de aceite de ricino disminuye las emisiones contaminantes, sin embargo, para no afectar el rendimiento del motor se debe emplear mezclado con diésel. Por otra parte, existe poca información sobre los parámetros macroscópicos del chorro empleando biodiésel derivado de aceite de ricino, por lo tanto, el objetivo principal del presente trabajo se centra en estudiar el efecto de elevar la temperatura sobre los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, empleando una mezcla de 80 % diésel, y 20 % biodiésel derivado de aceite de ricino. Se determinaron las propiedades fisicoquímicas de la mezcla a diferentes temperaturas, y posteriormente se evaluaron la penetración, el ángulo, y el área del chorro, de la mezcla y del diésel mineral. Se encontró que el aumento de la temperatura, reduce los valores de la viscosidad, densidad, y tensión superficial, las cuales son las principales propiedades fisicoquímicas que afectan el chorro de combustible, y por lo tanto, con una temperatura de 60 °C, la mezcla se comporta de manera similar al diésel convencional.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Este capítulo trata sobre la motivación para llevar a cabo este estudio, además un resumen de los antecedentes que existen en el área de estudio, así como de la justificación del estudio, y su relevancia.

Los motores de combustión interna son utilizados en el sector energético, debido a sus prestaciones y eficiencia, empleando combustibles fósiles para su funcionamiento, sin embargo, la emisión de gases contaminantes, y partículas que contribuyen al efecto invernadero es una preocupación debido a los efectos negativos sobre la salud, y el medio ambiente [1, 2].

El CO_2 emitido por el sector energético, representa más del 80 % del total, siendo los subsectores de generación de energía, y el transporte quienes más aportan a dichas emisiones, por ello se propuso internacionalmente, en los Acuerdos de Paris, disminuir la cantidad de emisiones de gases de efecto invernadero [3].

Con este objetivo, se promulgaron normativas para la industria del transporte, las cuales con el paso de los años reducen los límites permisibles de emisiones contaminantes. Actualmente, se encuentran vigentes las normas EPA 10 en Estados Unidos, la EURO VI-d en la Unión Europea, y en México, la NOM-044-SEMARNAT-2017 [4, 5]. Para cumplir con las normativas vigentes se han propuesto diferentes estrategias que han ayudado a la reducción de emisiones, tales como, la instalación de catalizadores, y filtros de partículas, asimismo, la recirculación de gases de escape, el uso de estrategias de inyección, y de combustibles alternativos, entre otros [6–8].

Una de las estrategias mencionadas es el uso de combustibles alternativos, los cuales tienen un rendimiento energético similar al de los combustibles fósiles con una menor emisión de contaminantes [9, 10].

En los motores de combustión interna de encendido por compresión, se opta por utilizar mezclas de diésel-biodiésel, las cuales han mostrado una reducción de emisiones contaminantes, tales como el CO, el CO_2 , el material particulado, entre otros [11, 12]. Sin embargo, en la producción de biodiésel se emplean diferentes materias primas, tales como, aceites vegetales, grasas animales y residuos de aceite o plásticos, lo cual provoca que, el proceso de inyección, de las mezclas, sea diferente para cada biodiésel empleado, debido a las diferencias entre las propiedades fisicoquímicas [13, 14].

Las propiedades fisicoquímicas de los biodiésels son uno de los inconvenientes de su uso, debido a que su viscosidad, tensión superficial, y densidad son más altas en comparación al diésel mineral, lo cual provoca una mayor penetración, mientras se reduce el ángulo y el área de chorro [15, 16], en consecuencia, la mezcla aire-combustible es peor para dichos combustibles, los cuales tendrán una mala combustión, produciendo una reducción de la eficiencia térmica del motor, y aumentando el consumo específico de combustible [17, 18].

Un método para mejorar las propiedades fisicoquímicas, es a través del calentamiento de las mezclas, con intercambiadores de calor, resistencias eléctricas o con una camisa de refrigeración para el inyector [19, 20]. El calentamiento del combustible además de permitir una mejora del proceso de mezcla, reduce la emisiones contaminantes, y el consumo de combustible, mientras que mejora el rendimiento, y aumenta la eficiencia térmica, y la potencia del motor, así como de los componentes del sistema de inyección [21].

Una materia prima utilizada, es la planta de higuera, la cual puede ser cultivada en diferentes ambientes debido a su adaptabilidad, además de ser tóxica para el consumo humano, por lo cual, su fruto sólo se utiliza para la elaboración de diversos productos, entre los cuales se encuentra el aceite de ricino, con el cual se produce biodiésel, a través de un proceso de transesterificación [22].

El biodiésel derivado de aceite de ricino BH (por sus siglas, Biodiésel de Higuera), tiene una alta viscosidad y tensión superficial a temperatura ambiente, por lo cual su uso ha sido limitado, sin embargo, con las nuevas tecnologías de inyección se ha empezado a investigar su uso como sustituto del diésel mineral [23]. Diversos autores, recomiendan su uso en una proporción del 20 % máximo, en mezcla con diésel mineral, para obtener los mejores resultados de rendimiento del motor, y emisiones contaminantes [24].

A pesar de su estudio actual, existen escasos trabajos sobre los parámetros macroscópicos de las mezclas de diésel y BH. Por este motivo, el presente trabajo se

centra en estudiar el efecto de la temperatura de las mezclas diésel-BH en el proceso de mezcla. Para ello, se caracterizarán las propiedades fisicoquímicas de las mezcla a diferentes temperaturas, y después se evaluará su relación con los parámetros macroscópicos del chorro.

CAPÍTULO 2

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO

El objetivo de este capítulo es presentar los conceptos utilizados en este estudio, para lo cual primero se realiza una descripción del biodiésel, composición y propiedades fisicoquímicas. Seguidamente, se presenta una descripción del sistema de inyección diésel, además se explican los procesos que ocurren una vez iniciado el proceso de inyección, y los parámetros que se usan para la caracterización del chorro diésel. Por último, se realiza una revisión en la literatura del efecto de las propiedades fisicoquímicas en los parámetros macroscópicos del chorro, además de como se puede modificar la temperatura del combustible antes de la inyección, y por último de los estudios sobre cómo afecta la temperatura del combustible a los parámetros macroscópicos.

2.1 BIODIÉSEL

El biodiésel es un sustituto del diésel mineral, debido a sus propiedades físico-químicas similares. Es definido como, ésteres monoalquílicos de largas cadenas de ácidos grasos, de acuerdo con la Sociedad Estadounidense para Pruebas y Materiales (ASTM, por sus siglas en inglés, *American Society for Testing and Materials*). El cual es elaborado a través de una técnica de refinación de diferentes materias primas. Dependiendo de la materia prima empleada, el biodiésel se clasifica en [25–27]:

- **Primera generación.** Son producidos a partir de materias primas comestibles, tales como la palma, la soya, el coco, el maíz, el arroz, entre otros [28]. Son muy utilizados por la disponibilidad de la materia prima, y su simple proceso de conversión a biodiésel, sin embargo, hubo una reducción de la disponibilidad del alimento para el consumo, y un aumento del precio de la materia prima.
- **Segunda generación.** Se producen a partir de materia prima no comestible, tales como el aceite de cártamo, de *jatropha*, de ricino, de hule, *neem*, entre otros [29]. Sus ventajas son el menor costo de producción, y de tierra para su cultivo, son amigables con el medio ambiente, y no presenta un desequilibrio en la producción de alimentos. Sin embargo, el rendimiento del cultivo es bajo, y se necesita adicionar más alcohol en la reacción.
- **Tercera generación.** Se producen a través de las algas, y de aceites usados, tales como, el aceite de pescado, las grasas animales, y el aceite usado de cocina [28, 30]. Entre sus ventajas se encuentra la alta productividad, no necesita de tierras para su producción, y alto contenido de aceite obtenido. Sin embargo, tiene un costo de inversión alto, y su uso es limitado en la industria.
- **Cuarta generación.** Se producen a través de la conversión de biomasa en combustible. Dicha biomasa es generada empleando el uso de energía solar y CO_2 , sin embargo, es una tecnología en desarrollo [27].

El proceso de producción del biodiésel empieza con la extracción del aceite de la materia prima. Lo cual puede realizarse de manera física, química o enzimática, de las cuales la extracción física, es la más usada en pequeña y gran escala [27]. Después se debe emplear una técnica de refinación, tal como, la pirólisis, la micro-emulsión, la dilución, la destilación catalítica, o la transesterificación [25].

El proceso de transesterificación es el más utilizado para la producción de biodiésel, debido a que, las propiedades del biodiésel obtenido son similares a las del diésel mineral, lo cual favorece su distribución [31]. La reacción de transesterificación se presenta en la Figura 2.1, donde se observa que, los triglicéridos reaccionan con un alcohol, y se produce glicerina, y ésteres.

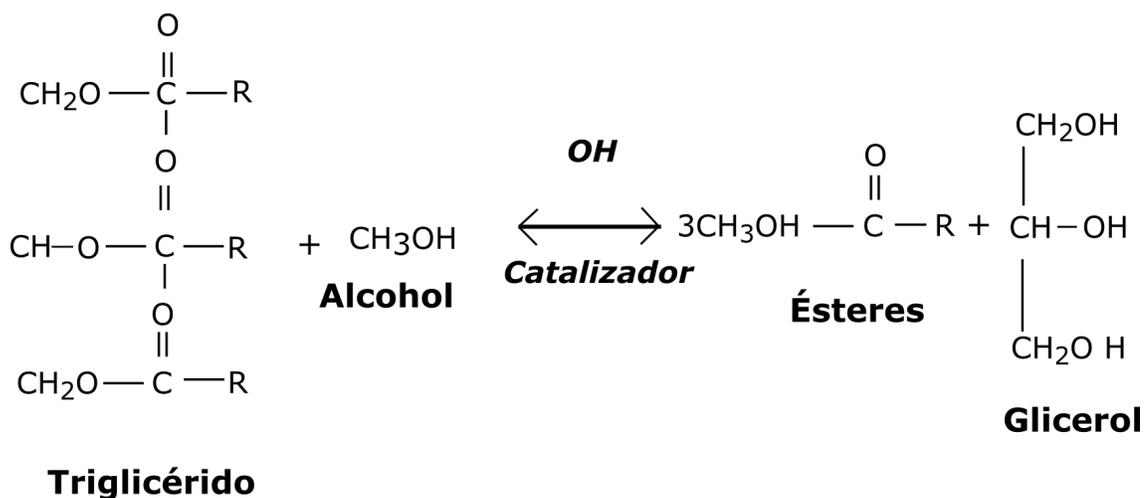


Figura 2.1: Diagrama del proceso de transesterificación.

Este proceso de transesterificación, dependiendo del alcohol empleado para la reacción, se conoce como etanólisis, y se obtienen ésteres etílicos de ácidos grasos (FAEE, por sus siglas en inglés *Fatty Acids Ethyl Esters*), o bien metanólisis, y se obtiene ésteres metílicos de ácidos grasos (FAME, por sus siglas en inglés *Fatty Acids Methyl Esters*) [10].

2.1.1 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS

Una forma para comparar un biodiésel con el diésel mineral es caracterizando sus propiedades fisicoquímicas, y con ello poder determinar el uso en los motores convencionales. Algunas de estas propiedades son la densidad, la viscosidad, tensión superficial, el punto de inflamabilidad, el índice de cetano, y el poder calorífico [10].

Densidad

La densidad se define como la cantidad de masa por unidad de volumen de un elemento o sustancia. Para el caso de líquidos ésta depende principalmente de la temperatura, mientras que existen poco cambio con el aumento de la presión de inyección. Generalmente, los biodiésel presentan valores de densidad más altos que los del diésel mineral, esto es consecuencia del contenido de ácidos grasos, las largas cadenas de carbón presentes en el combustible, la masa molar, el contenido de agua, y su temperatura de destilación [10].

Viscosidad

La viscosidad se define como la medida de la resistencia de un fluido a la deformación por un esfuerzo cortante. Es una propiedad importante en el análisis del comportamiento del fluido en la operación del sistema de inyección, y la atomización del combustible. El biodiésel generalmente presenta valores de viscosidad de 10 a 15 veces más altos a los del diésel mineral.

- **Viscosidad dinámica.** Es la resistencia del medio al movimiento del fluido, causando un esfuerzo cortante en el fluido por la frontera sólida.
- **Viscosidad cinemática.** Es una relación entre la viscosidad dinámica, y la densidad del combustible.

Tensión superficial

La tensión superficial es la energía requerida para incrementar el área de un líquida, y depende principalmente de las fuerzas intermoleculares. Esta propiedad es importante en el estudio del chorro de combustible, del proceso de atomización, y de las características de evaporación, debido a que tiene una influencia en el proceso de desintegración del chorro de combustible. En los biodiésels la tensión superficial está influenciada por su estructura molecular, la cual varía con las largas cadenas de ácidos grasos, y el número de enlaces no saturados.

Punto de inflamabilidad.

El punto de inflamabilidad es la temperatura mínima requerida para que un combustible se encienda al contacto con una llama o chispa. Los biodiésels son más seguros en el transporte, manipulación, y almacenamiento, debido a su mayor punto de inflamabilidad, el cual generalmente, es mayor a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que el diésel mineral, tiene un valor entre $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $65\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Índice de cetano.

El índice de cetano CN, (por sus siglas en inglés, *Cetane Number*), es un indicador de las características de ignición de un combustible, o bien la capacidad de autoencenderse rápidamente después de la inyección. Se relaciona con el retraso del encendido en los MEC, donde, un valor alto, produce un avance en el tiempo, debido a la reducción del retraso de encendido, además produce una mayor temperatura. Los biodiésels presentan un CN entre 50 y 76, mientras que, el CN del diésel mineral se encuentra entre 40 y 55.

Poder calorífico.

Existen dos tipos; el poder calorífico superior HHV, (por sus siglas en inglés, *Higher heating value*), y el poder calorífico inferior LHV, (por sus siglas en inglés, *Lower heating value*). El primero, se determina como la cantidad de calor liberado al quemar un gramo de combustible en condiciones estequiométricas a presión constante, además el vapor de agua producido de la reacción se condensa.

El LHV se determina de la misma manera, sin embargo, el agua producida en la reacción, se mantiene en estado vapor, por lo cual no se considera el calor latente de vaporización [32].

2.2 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

En los motores de encendido por compresión (MEC) resulta difícil separar el proceso de formación de la mezcla y el de combustión, debido a que se producen simultáneamente durante los ciclos de trabajo. El proceso de mezcla en los MEC se produce en el cilindro, después de la etapa de compresión, cuando el pistón se encuentra cercano al punto muerto superior.

Los sistemas de inyección diésel actuales de inyección directa (DI), basados en la inyección de combustible a elevados niveles de presión de inyección, atomizado y repartido para garantizar una buena mezcla. Así mismo, se genera un movimiento rotativo alrededor del eje del cilindro, debido al diseño del colector de admisión. Este tipo de sistema de inyección, cuentan con mayor rendimiento, dado que sus pérdidas de calor son menores [32].

El sistema de inyección es el encargado de dotar al motor con el combustible necesario para su funcionamiento. Para lo cual debe cumplir:

- Introducir a la cámara de combustión el combustible, de acuerdo con la ley de tasa de inyección, en sincronización con el movimiento del pistón.
- Atomizar el combustible incrementando así la superficie de contacto con el aire caliente en el pistón, y acelerando la evaporación.
- Realizar el mezclado de combustible con el aire en la cámara de combustión.

2.2.1 SISTEMA DE INYECCIÓN COMMON-RAIL

Los sistemas DI son utilizados en el mercado automotriz, debido a sus mejores rendimientos, por otra parte los principales tipos de sistemas DI son: sistema *common-rail*, y sistema *inyector-bomba*. Sin embargo, el sistema *common-rail* es el más utilizado, debido a su flexibilidad, y versatilidad.

En la Figura 2.2, se muestra un esquema del sistema de inyección *common-rail*. Se observa que el combustible es llevado desde el depósito de combustible hacia la bomba de alta presión, a través de una bomba de alimentación de baja presión. La bomba de alta presión, que se encuentra acoplada al cigüeñal del motor, envía el combustible hacia el *common-rail* donde se almacena a elevadas presiones, y se distribuye hacia los inyectores de los diferentes cilindros; de la cual una parte se inyecta en la cámara de combustión, y otra, de menor volumen, se utiliza para el accionamiento de los inyectores y regresa al depósito de combustible, este volumen es llamado caudal de control o retorno de los inyectores. El *common-rail*, suaviza las oscilaciones de presión generadas por el trabajo de los pistones, de la bomba de alta presión, y de las perturbaciones originadas por la inyección de combustible.

La Unidad de Control Electrónico (ECU) es la encargada de regular la presión del *common-rail*, abriendo o cerrando el regulador de presión, ubicado en uno de sus extremos, hasta igualar un valor objetivo registrado en la ECU con la señal medida por un sensor de presión, situado en el extremo opuesto.

Así mismo, la ECU se encarga de energizar el inyector, a través de un pulso eléctrico, para su apertura y cierre en un tiempo definido, siendo este tiempo de energización, junto con la presión de inyección, y la capacidad de descarga de los orificios de la tobera quienes determinan la cantidad de masa inyectada [32].

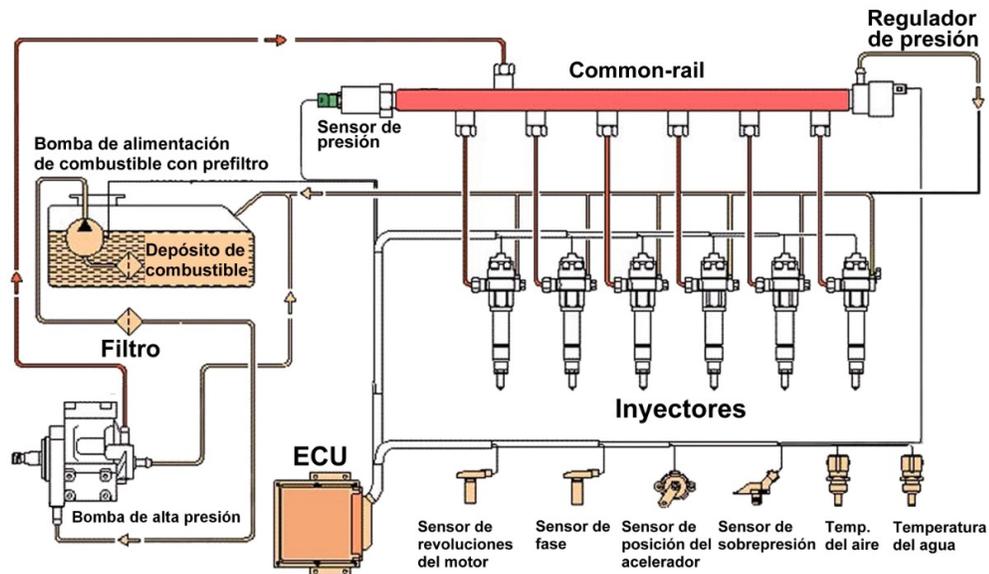


Figura 2.2: Esquema del sistema de inyección *common-rail*. (Adaptado de González and Fernández [32]).

2.2.2 INYECTOR DIÉSEL

El inyector diésel es el dispositivo más complejo e importante del sistema *common-rail*. Se pueden clasificar en dos tipos, dependiendo del sistema de accionamiento; inyectores de tipo solenoide e inyectores de tipo piezoeléctrico. En la Figura 2.3, se muestran los principales elementos que componen un inyector genérico de un sistema *common-rail*. El inyector está compuesto de una válvula, el portainyector, y la tobera. Mientras que, en la Figura 2.4, se muestra una vista interna de los componentes de la válvula electromagnética, como la servoválvula, la entrada al volumen de control (Z), y la salida del volumen de control (A). Una vez que el combustible llega al inyector, éste se deriva en 2 conductos, uno dirigido a la tobera, y otro que suministra al volumen de control a través del orificio calibrado de entrada Z .

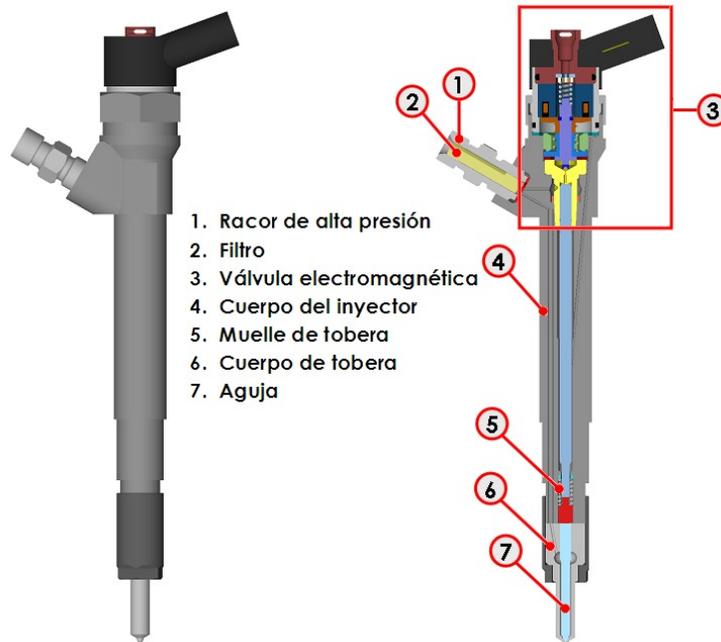


Figura 2.3: Esquema de un inyector con válvula tipo solenoide. (Adaptado de González and Fernández [32]).

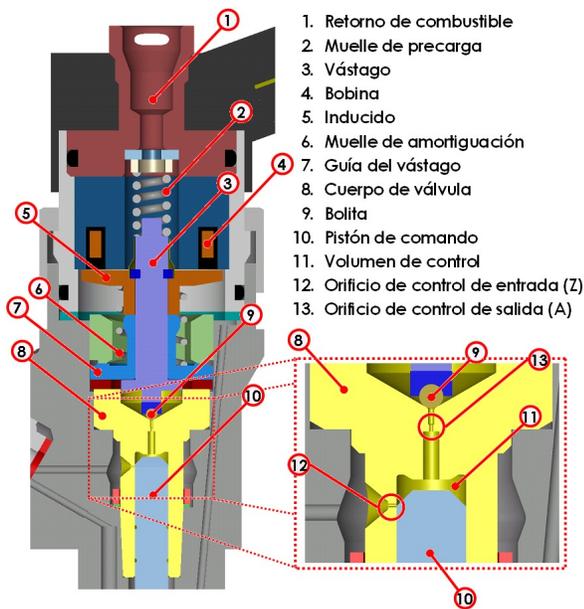


Figura 2.4: Válvula de accionamiento electromagnética de un inyector solenoide. (Adaptado de González and Fernández [32]).

Al no estar energizada la válvula electromagnética, el vástago mantiene una pequeña esfera bloqueando el orificio de salida (A) del volumen de control. Por lo tanto, el combustible en la parte alta del pistón de comando, y la aguja de la tobera se encuentra a la misma presión que el *common-rail*, y la aguja bloquea la inyección de combustible.

Al momento en el que la ECU manda el pulso eléctrico, para comenzar la inyección, se energiza la bobina electromagnética induciendo que el vástago se levante liberando la esfera, por lo que se genera una diferencia de presiones en el conjunto pistón-aguja, y se desplaza liberando los orificios de la tobera causando la inyección de combustible.

Una vez que termina el pulso de inyección, el vástago de la electroválvula regresa a la posición de reposo, por lo que el orificio de salida (A) se vuelve a obstruir, y la presión en el conjunto pistón-aguja vuelve a ser igual, sin embargo, por la diferencia de secciones la aguja desciende, y bloquea los orificios de la tobera [32].

2.3 PROCESO DE ATOMIZACIÓN

La atomización es un proceso físico importante en la combustión, debido a que ayuda a mezclar el combustible con el gas ambiente, este proceso se logra al pasar de una vena líquida de combustible a un chorro formado por pequeñas gotas dando lugar a la atomización primaria.

El proceso de atomización empieza cuando se expulsa el combustible por los orificios de la tobera y se dispersa con un ángulo, dependiendo de su velocidad de inyección. Posteriormente, el arrastre producido por el aire ambiente divide el combustible en chorros cónicos concéntricos con diferentes velocidades, siendo el chorro central quien tiene la mayor velocidad [33].

En la atomización primaria se generan ondas pequeñas en la superficie del líquido por la turbulencia interna, lo que genera una ruptura de la vena líquida en pequeñas gotas, debido a la interacción entre las fuerzas de arrastre, tensión superficial, y las fuerzas viscosas.

Por otra parte, la atomización secundaria ocurre debido a que las gotas de combustible continúan disgregándose hasta obtener gotas más pequeñas de diámetros similares [32, 33].

Estudiar el chorro diésel en condiciones no evaporativas permite conocer aspectos básicos de su estructura y comportamiento, y los resultados no difieren de los que se verían en condiciones de trabajo normales, siempre que las condiciones de densidad sean iguales.

En el proceso de atomización primaria interviene la densidad del ambiente de la cámara de combustión, la velocidad de inyección, la geometría interna de la tobera, la densidad, viscosidad, y tensión superficial del combustible.

2.3.1 RÉGIMEN DE ATOMIZACIÓN

Al realizar la inyección de combustible, a través del orificio de la tobera, en el gas ambiente se presentan 4 regímenes de atomización que dependen de la velocidad del chorro [33]. Dichos regímenes son los siguientes:

- *Régimen de Rayleigh.* Se presenta cuando existen velocidades de inyección bajas del orden de 10 m/s . Se provoca la ruptura de la vena líquida en gotas de diámetro uniforme, debido a las deformaciones radiales por la interacción entre perturbaciones iniciales del chorro, y las fuerzas de tensión superficial.
- *Primer régimen inducido por la interacción aerodinámica.* Se presenta por las fuerzas aerodinámicas que aumentan debido a la velocidad relativa entre la inyección del combustible y el gas ambiente, se presenta de dos modos distintos:

- Con velocidades bajas se produce un chorro con bulbos importantes, y por lo tanto el combustible se atomiza de manera más rápida presentando gotas de diámetro similar a la magnitud de la vena líquida. Este fenómeno se produce debido a la amplificación de las inestabilidades axisimétricas de las fuerzas de tensión superficial.
 - Con velocidades altas se produce un chorro con sección relativamente uniforme, y que oscila alrededor de su eje de simetría inicial. Esta oscilación provoca que el chorro adquiera una forma helicoidal. Este fenómeno ocurre debido a que las fuerzas aerodinámicas dominan frente a las de tensión superficial.
- *Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica.* Se presenta con velocidades más altas que el caso anterior, en consecuencia las fuerzas aerodinámicas son más dominantes y por tanto, la vena líquida tiene más oscilaciones a pequeña escala, debido a la turbulencia generada en la sección de salida del orificio de la tobera, y por la interacción aerodinámica.
 - *Régimen de atomización.* Se presenta cuando se tienen velocidades de inyección muy altas, y en consecuencia la atomización del combustible empieza justo en la sección de salida del orificio de la tobera. No existe una clara diferencia con el régimen anterior sin embargo, debido a las elevadas velocidades aparecen otros mecanismo, tales como la turbulencia, la cavitación, etc.

La inyección del combustible diésel se puede considerar que se encuentra entre el segundo régimen, y el régimen de atomización debido a las elevadas velocidades que pueden alcanzar gracias a los sistemas de inyección actuales, aunque entre más aumenta la presión, y disminuye el diámetro de la tobera se presenta con más frecuencia el régimen de atomización.

2.4 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

Entender el comportamiento del chorro diésel, y sus parámetros macroscópicos es importante debido a la influencia que tienen sobre el proceso de mezcla. Así mismo mejorar estos parámetros permite optimizar el proceso de combustión, logrando una mejora de la eficiencia del motor, así como una reducción de los gases contaminantes, y del consumo de combustible [34].

En el análisis de los parámetros del chorro se utilizan técnicas ópticas utilizando iluminación directa o indirecta. Estas técnicas aprovechan las cámaras digitales colocándolas en accesos ópticos, en el motor o bien en un recipiente a volumen constante con condiciones similares a las que existen en la cámara de combustión [34, 35].

El estudio del chorro del combustible desde el punto de vista macroscópico se basa en el análisis de la penetración total y el ángulo de chorro, así mismo a partir de estos dos parámetros macroscópicos se puede obtener el análisis de un tercer parámetro denominado área del chorro, los cuales se muestran en la Figura 2.5 [32].

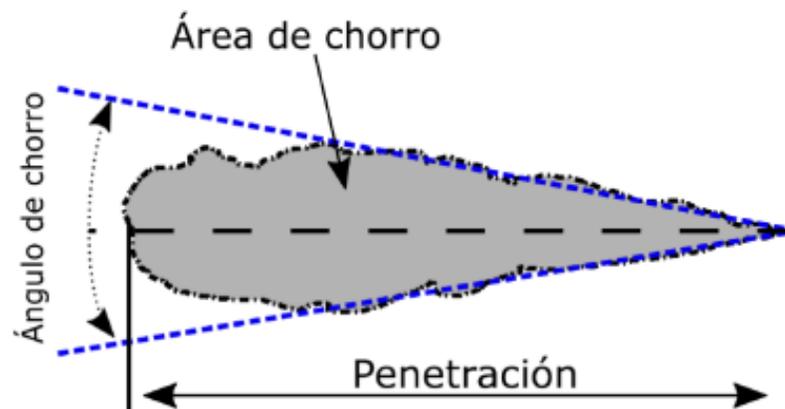


Figura 2.5: Parámetros macroscópicos del chorro del combustible.

2.4.1 PENETRACIÓN DEL CHORRO DIÉSEL

Se define como la longitud recorrida por el chorro, desde la punta de la tobera hasta el frente del chorro como se observa en la Figura 2.5. Además, la penetración se puede dividir en la región principal del chorro, y el frente del chorro [32, 36].

La región principal del chorro es afectada principalmente por la inercia del chorro inyectado y el momento generado por la incorporación con el aire ambiente. Mientras el frente del chorro es gobernado por la inercia de las gotas entregadas desde la región principal, así como de las fuerzas de arrastre aerodinámicas [37].

Conocer la penetración del chorro de los diferentes combustibles es importante, debido a que además de servir como indicador de la mezcla de aire-combustible, también permite predecir el momento en que el chorro golpeará las paredes de la cámara de combustión [32].

Desantes et al. [38], proponen la Ecuación (2.1), donde se relacionan la penetración, el ángulo de cono, y el momento de flujo.

$$S = 1.26M_o^{1/4}\rho_a^{-(1/4)}t^{1/2}\tan^{-(1/2)}\left(\frac{\theta_u}{2}\right) \quad (2.1)$$

donde M_o es el momento de flujo en la sección de salida del orificio de la tobera, ρ_a es la densidad del aire, y θ_u es el ángulo de cono del chorro.

Dent [39], obtuvo la Ecuación (2.2), considerando la condición ambiente de la cámara de combustión.

$$S = 3.36C_d^{0.5}\left(\frac{\Delta P}{\rho_a}\right)^{0.25}(d_o t)^{0.5}\left(\frac{294}{T_a}\right)^{0.25} \quad (2.2)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga, ΔP es la caída de presión efectiva, ρ_a es la densidad del aire, d_o es el diámetro del orificio de la tobera, y T_a es la temperatura del gas en el cilindro.

Wakuri et al. [40], desarrollaron una ecuación del modelo de penetración, mos-

trada en la Ecuación (2.3).

$$S = 1.189C_d^{0.25} \left(\frac{\Delta P}{\rho_a} \right)^{0.25} \left(\frac{d_o t}{\tan \theta} \right)^{0.5} \quad (2.3)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga, ΔP es la caída de presión efectiva, ρ_a es la densidad del aire, d_o es el del orificio del inyector, y θ es el ángulo de cono del chorro.

En las diferentes correlaciones descritas en la literatura, se observa que la presión de inyección, las características de la tobera, la relación entre las densidades del combustible y del gas ambiente, el ángulo del chorro, y el tiempo impactan sobre la penetración del chorro durante el evento de inyección.

2.4.2 ÁNGULO DEL CHORRO

Esta definido como el ángulo comprendido entre 2 líneas rectas con un origen común, desde la punta de la tobera al punto medio del contorno del chorro [34, 41]. Este parámetro es importante en la mezcla del aire con el combustible, y depende de la geometría interna de la tobera, las condiciones de inyección, y de las propiedades fisicoquímicas del combustible [32].

Siebers [42], propone la Ecuación (2.4) para el ángulo del chorro donde se relaciona con la densidad del aire, y del combustible.

$$\tan \theta/2 = 0.26 \left[\left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \right)^{0.19} - 0.0043 \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \right] \quad (2.4)$$

donde ρ_a es la densidad del aire, ρ_f es la densidad del combustible, y θ es el ángulo del chorro.

2.4.3 ÁREA DEL CHORRO

El área de chorro se define como el área cubierta por la capa límite del chorro, y está relacionada con la calidad de la mezcla aire combustible, por lo tanto es un

parámetro relevante en el estudio del proceso de inyección [43].

Delacourt et al. [44], propusieron la Ecuación (2.5) para el área del chorro, así mismo encontró que para una penetración y densidad del ambiente establecidos, el área del chorro es independiente de la presión de inyección.

$$A = 4.351d^2 \left[\sqrt{\frac{\Delta P_{inj}}{\rho_g} \frac{(t - t_0)}{d}} \right] \theta \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \frac{(4 + \pi\theta)}{(2 + \theta)^2} \quad (2.5)$$

donde d es el diámetro de la tobera, ΔP_{inj} es la diferencia de presión en la tobera, ρ_g es la densidad del gas, θ es el ángulo del chorro, y α es el ángulo de cono del chorro diésel

2.5 BIODIÉSEL DERIVADO DE ACEITE DE RICINO

El biodiésel de primera generación han sido muy utilizado, sin embargo debido a sus inconvenientes con el abastecimiento de alimentos, empezaron a usarse alternativas como son los biodiésels de segunda generación, los cuales como se mencionó en la Sección 2.1 son derivados de materias no comestibles [25].

Una de estas materias primas es la higuera cuyo nombre científico es *Ricinus communis*, y también es llamada como Palma cristi, Castor bean, higuera infernal, higuera, varenda, ricino, entre otros. Es un arbusto del noreste de África y Euroasia de rápido crecimiento en regiones tropicales, áridas, y semiáridas del mundo [45, 46].

Esta planta se puede encontrar en bordes de caminos, ríos, solares, huertas, y también es sembrado como cultivo comercial. Puede medir hasta 6 metros de alto, con tallos huecos de color verde o rojizo. Las hojas tienen forma de estrella, y es dentada en su borde [46]. De su fruto se pueden obtener diversos productos derivados, de los cuales la producción de aceite de ricino es el más empleado, debido a que tiene diversas aplicaciones en la industria, tales como, elaborar lubricantes, tintas, esmaltes, fertilizantes, pesticidas, biodiésel, entre otros [45].

Barrios-Gómez et al. [45], realizaron un estudio sobre la evaluación de la higuera en Morelos, México durante el 2009, y 2011. Concluyen que es viable obtener rebrotes de la siembra de la higuera, para varios genotipos estudiados, y observaron que la reducción del rendimiento era de 20 % en promedio entre cada nueva cosecha realizada.

El aceite de ricino, como materia prima para la producción de biodiésel, tiene muchas ventajas tales como, un bajo índice de acidez, un alto punto de inflamación, un proceso de transesterificación realizado a temperatura ambiente, entre otros. Mientras tanto, sus desventajas son la generación de residuos tóxicos, una alta viscosidad, y una reducción de la atomización del combustible [31].

Keera et al. [47], elaboraron biodiésel derivado del aceite de ricino a través del proceso de transesterificación con metanol, y un catalizador KOH con concentración del 1 %. Al determinar las propiedades del biodiésel encontraron que, la viscosidad es más alta comparada con la del diésel mineral, así mismo el punto de nube, y de escurrimiento es más bajo debido a esto, recomiendan su uso en condiciones ambientales frías. Mientras que, su índice de cetano es 14.3 % más bajo que el del diésel.

Berman et al. [48], realizaron un estudio del potencial del biodiésel de aceite de ricino, y sus mezclas como un combustible alternativo al diésel, para lo cual obtuvieron aceite de ricino, a través de un proceso de prensado de las semillas secas de higuera. Después, realizaron un filtrado del aceite, y un proceso de transesterificación con metanol y KOH, para producir el biodiésel. Una vez obtenido el biodiésel puro, una parte fue mezclado con diésel bajo en azufre para producir una mezcla B10, y determinar sus propiedades fisicoquímicas. Concluyeron que, la mezcla B10, debido a sus propiedades fisicoquímicas similares a las del diésel mineral, es una buena alternativa para reemplazar este último.

Valente et al. [49], determinaron la viscosidad, densidad, índice de cetano, temperaturas de destilación, y el contenido de azufre para el diésel (B0), el biodiésel

derivado de aceite de ricino (B100), y sus mezclas B25, B50 y B75. Encontraron que la densidad del B100 es mayor a la del diésel, lo cual provoca una mayor potencia, y emisiones de hollín. Así mismo, la viscosidad aumenta con la proporción de biodiésel en la mezcla. Otra propiedad estudiada fue el índice de cetano, encontrando que disminuye conforme se aumenta la proporción de biodiésel. Mientras tanto, encontraron que al mezclar el biodiésel con diésel ayuda a disminuir la cantidad de azufre que contiene.

Distintos autores han realizado estudios sobre las propiedades fisicoquímicas del biodiésel derivado de aceite de ricino. En la Tabla 2.1 se muestran algunas propiedades fisicoquímicas del biodiésel puro, mientras que, en la Tabla 2.2 se muestran los valores de las propiedades para distintas mezclas diésel-biodiésel derivado de aceite de ricino, estudiadas por diversos autores.

Tabla 2.1: Propiedades fisicoquímicas del biodiésel derivado del aceite de ricino.

Propiedad	Keera et al. [47]	Osorio-González et al. [31]	Das et al. [50]	Kumar et al. [51]
Densidad (kg/m^3)	[@15.56°C] 962.1	946	896	960
Viscosidad cinemática (mm^2/s)	[@40°C] 231.22	15	12.59	23
Punto de nube ($^{\circ}C$)	-	N/A	-	3
Punto de escurrimiento ($^{\circ}C$)	-	-30	-	-13
Punto de inflamación ($^{\circ}C$)	228	194	124	262
Poder calorífico (MJ/kg)	37.2	38.34	37.931	30.18

Tabla 2.2: Propiedades fisicoquímicas de diferentes mezclas diésel-biodiésel derivado de aceite de ricino.

Propiedad	B10[47]	B20 [46]	B20[52]	B30[52]
Densidad Densidad a 40 °C (kg/m^3)	849.1	859.5	839.62	851.71
Viscosidad cinemática (mm^2/s)	3.14	3.73	3.772	4.528
Punto de nube (°C)	-6	-18	-	-
Punto de escurrimiento (°C)	-12	-9	-	-
Punto de inflamación (°C)	85.9	89.1	62	64
Poder calorífico (MJ/kg)	43.59	43.44	45.177	44.366

De acuerdo con las Tablas 2.1, y la Tabla 2.2, la viscosidad del biodiésel de aceite de ricino se encuentra fuera de los límites de la norma ASTM D7467, y ASTM D6751, debido a esto durante mucho tiempo este biodiésel, derivado del aceite de ricino no fue muy utilizado en los MEC. Sin embargo, debido a las ventajas antes mencionadas se ha empezado a estudiar su uso como combustible alternativo a diferentes proporciones de mezcla binaria.

Lin and Lin [53], evaluaron las características macroscópicas del chorro del diésel comercial, del biodiésel derivado de aceite de ricino (CBD, por sus siglas en inglés *Castor Biodiesel*), y de una emulsión de aceite de ricino con 15% de agua (EBD15, por sus siglas en inglés *Emulsified Biodiesel*), específicamente evaluaron la penetración y el ángulo del chorro. Encontraron que, la penetración entre el diésel y el CBD es similar durante aproximadamente 1.5 ms, sin embargo el EBD es quien presenta la mayor penetración con el transcurso del tiempo, lo cual se observa en la Figura 2.6.

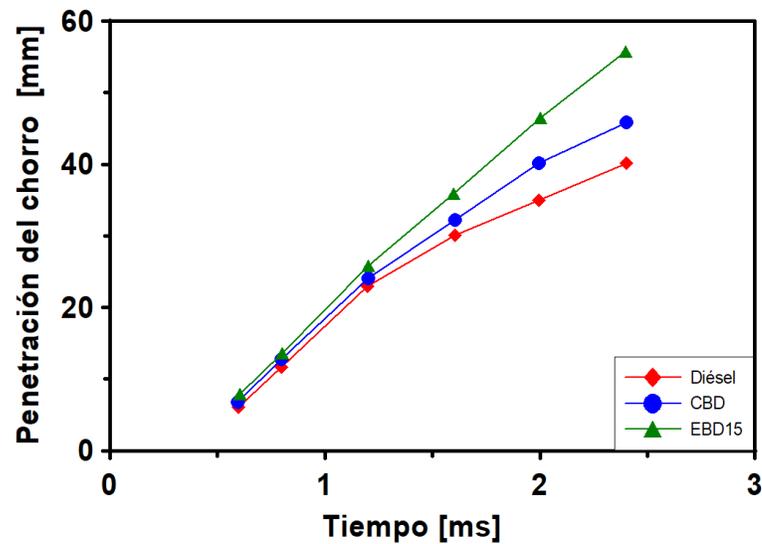


Figura 2.6: Evolución temporal de la penetración del chorro. (Adaptado de Lin and Lin [53]).

Mientras que, en la Figura 2.7, se observa que el CBD tiene un ángulo del chorro menor al del diésel, mientras que, concluyen que el EBD15, debido a su viscosidad en un inicio mantiene el ángulo de chorro más pequeño sin embargo, después de los 2 ms tienden a incrementarse, lo cual se explica por la microexplosión a alta temperatura del combustible.

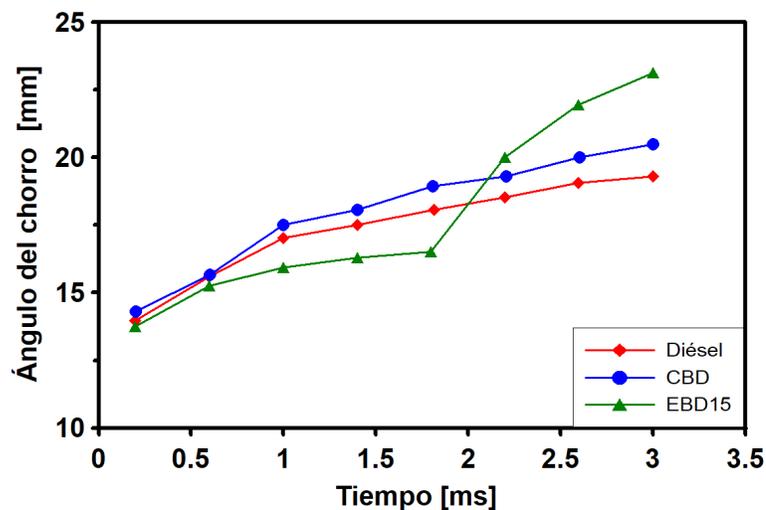
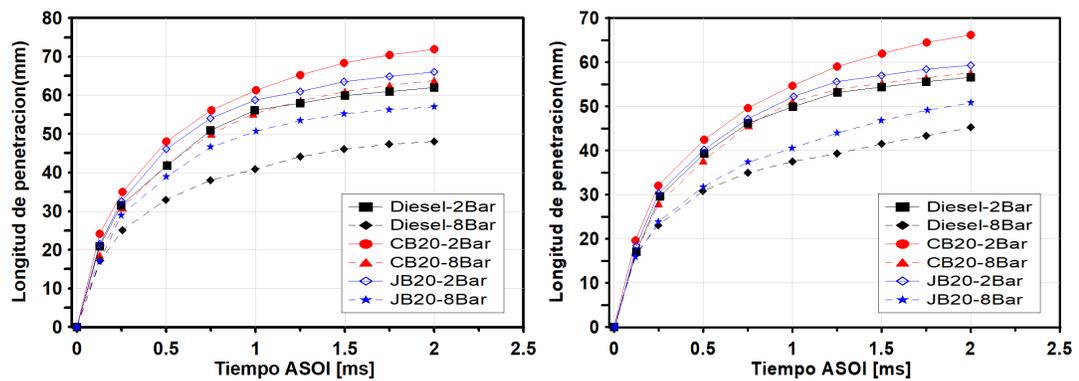


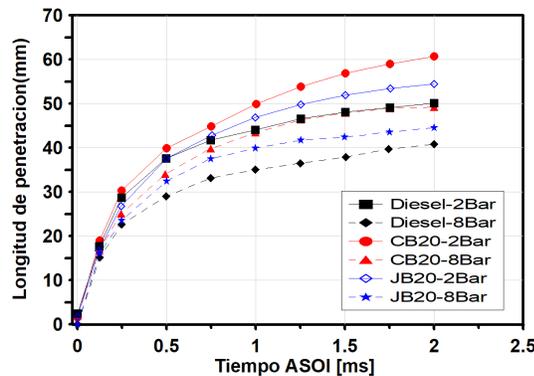
Figura 2.7: Evolución temporal del ángulo de chorro. (Adaptado de Lin and Lin [53]).

Haq et al. [54], analizaron y compararon la penetración, ángulo y área del chorro de diésel, con los de las mezclas diésel-biodiésel derivado aceite de ricino, y jatropha. Empleando tres diferentes niveles de presión de inyección 25, 50 y 75 MPa, y dos contrapresiones de 0.2 y 0.8 MPa. Encontraron que el efecto de la presión ambiente es despreciable al inicio de la inyección, debido a la diferencia entre la presión de inyección, y la presión ambiente. Sin embargo, en las siguientes etapas después del inicio de la inyección, se observa un mayor efecto con el aumento de la presión ambiente, debido a las mayores fuerzas de arrastre que experimenta el chorro, y la alta probabilidad de colisión de las gotas, esto se muestra en la Figura 2.8.



(a) Penetración a 250 bar

(b) Penetración a 500 bar



(c) Penetración a 750 bar

Figura 2.8: Penetración del chorro a) 250 bar, b) 500 bar y c) 750 bar. (Adaptado de Haq et al. [54]).

Además, en la Figura 2.8 para una misma presión ambiente, la mezcla CB20 es la que presenta la mayor penetración en todos los niveles de presión de inyección, debido a su que esta mezcla tiene una mayor viscosidad y densidad en comparación a la del diésel.

Así mismo, encontraron que el menor ángulo de cono era de la mezcla CB20, sin embargo este parámetro es más afectado por la geometría de la tobera, y la presión ambiente como se observa en la Figura 2.9. Por último, el área del chorro más pequeña es obtenida de la mezcla CB20, debido a que presenta una menor desintegración de las gotas de combustible por su alta viscosidad, y tensión superficial.

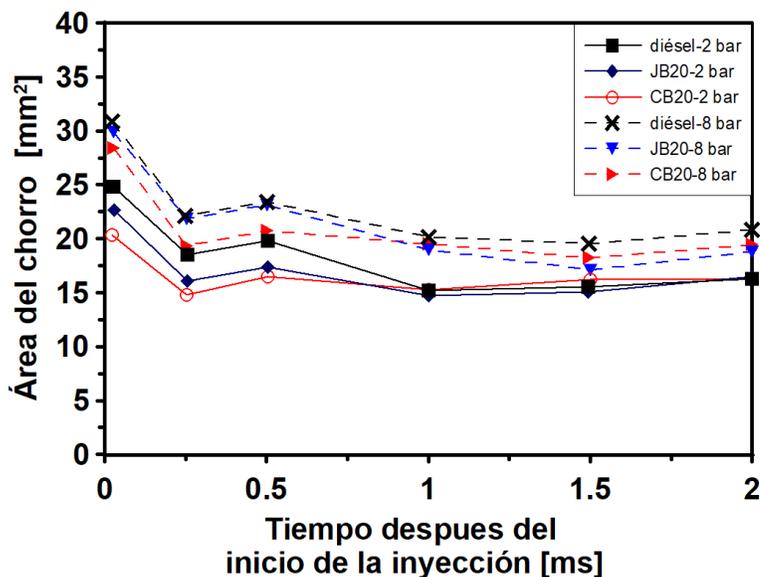


Figura 2.9: Evolución temporal del ángulo de cono de tres diferentes combustibles. (Adaptado de Haq et al. [54]).

Mientras que, Özcanli et al. [55], emplearon diésel, biodiésel derivado de aceite de ricino (COME), y sus mezclas B5, B10, B25, B50, para evaluar, las propiedades fisicoquímicas, el rendimiento del motor y las emisiones encontrando que, la potencia del motor se reduce un 4.12% al usar una mezcla B25, así mismo, el consumo específico del combustible aumenta, al incrementar la proporción del biodiésel en la mezcla, lo cual se puede observar en la Figura 2.10.

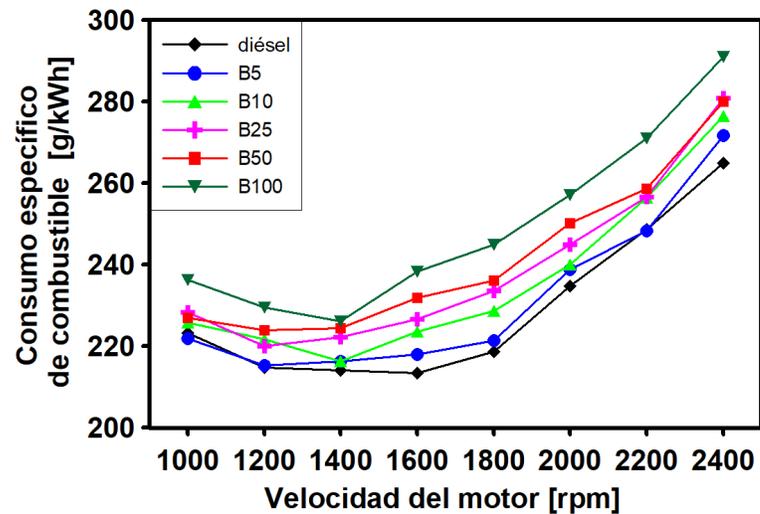


Figura 2.10: Consumo específico de combustible en función del régimen de giro. (Adaptado de Özcanli et al. [55]).

Además, observaron que las emisiones de CO y CO_2 se reducen aproximadamente un 16.92% y 17.20%, respectivamente, al aumentar la relación de biodiésel al 50%, mientras que, los NO_x se incrementan un 43.16% con la misma relación de biodiésel. Asimismo, concluyen que, el biodiésel derivado de aceite de ricino, se puede utilizar para mejorar el número de cetano, y como combustible para ambientes fríos. Además, la mezcla B25 se pueden utilizar en los motores Diesel convencionales, debido al rendimiento del motor, y las emisiones de gases contaminantes.

Agrawal et al. [56], estudiaron las características de rendimiento de un motor de 4 tiempos, empleando diésel puro, y 4 relaciones de mezcla con biodiésel derivado de aceite de ricino. Encontraron que:

- Empleando una mezcla con un 20% de biodiésel (C20B80) se obtenía la mayor potencia del motor, además conforme incrementaba la carga del motor todas las mezclas tenían una potencia similar, esto se muestra en la Figura 2.11.

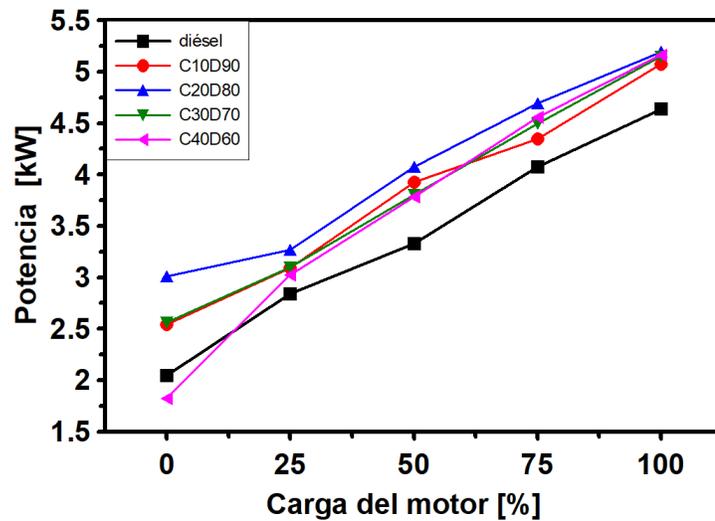


Figura 2.11: Potencia del motor en función del grado de carga del motor. (Adaptado de Agrawal et al. [56]).

- La eficiencia mecánica del motor fue mayor, empleando solo diésel para una carga de motor entre 25 % y 100 %, sin embargo, sin carga la mezcla C40D60 es la que presenta la mejor eficiencia, tal como se observa en la Figura 2.12. Concluyen que esto se debe al menor número de cetano, y la mayor densidad de las mezclas comparadas al diésel.

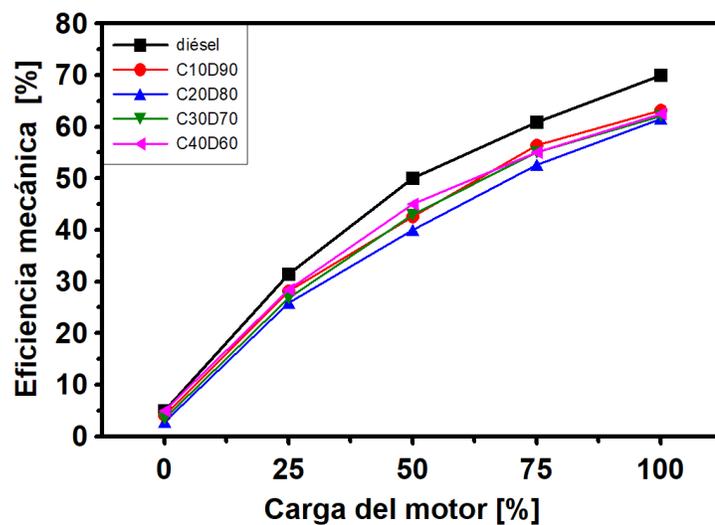


Figura 2.12: Eficiencia mecánica en función del grado de carga del motor. (Adaptado de Agrawal et al. [56]).

- La eficiencia térmica del motor es más alta empleando solo diésel, para un motor con una carga de 0 %, 25 % ,y 75 %, sin embargo, al 50 % y 100 % de carga, la mezcla C40B60 mostró un 0.15 % y 017 %, respectivamente, más de eficiencia en comparación al diésel puro.
- El consumo específico de combustible es mayor para las mezclas, cuando el motor se encuentra sin carga y a un 25 %, sin embargo, a partir del 50 % de carga, el consumo específico, es similar para todos los combustibles empleados.

2.6 LA TEMPERATURA Y LOS COMBUSTIBLES

La viscosidad, la tensión superficial, y la densidad dependen de la composición del combustible utilizado, a su vez dicha composición está definida por la materia prima empleada en su producción. Debido a esto, los diversos biodiésel presentan propiedades diferentes entre cada una de las materias primas utilizadas, lo cual se muestra en la Tabla 2.3, asimismo, se puede notar que las propiedades fisicoquímicas de los biodiésel son más altas que las del diésel mineral [57].

Tabla 2.3: Propiedades fisicoquímicas de biodiésel de diferentes materias primas.

Propiedad	BH [24]	WCO [16]	NOME [58]	SOME [24]	diésel [16]
Densidad [kg/m^3]	923.7	867	860	882.9	846.7
Viscosidad [mm^2/s]	14.50	3.63	6.10	4.16	2.36
Tensión superficial [N/m] ($\times 10^3$)	-	28	28.92	-	28.91

Dichas propiedades fisicoquímicas del combustible influyen en la penetración, el ángulo y el área del chorro, por lo cual, los diferentes biodiésel tienen un proceso de mezcla diferente a las del diésel [58]. Debido a que estas propiedades varían con

la temperatura; esta es una forma de mejorar los valores de la viscosidad, densidad, y tensión superficial [58, 59].

El calentamiento del combustible se puede realizar de diversas maneras, tales como, calentar el combustible en el depósito [19], utilizar intercambiadores de calor [60], y en estudios de inyección y combustión, desarrollar un dispositivo que cubra al inyector, de tal manera que a través de la transferencia de calor, se enfríe o caliente el combustible en el interior del inyector [20].

Anis and Budiandono [19], para el calentamiento del combustible emplearon una resistencia eléctrica, y un agitador mecánico, los cuales estaban en el interior del tanque de combustible, asimismo, utilizaron un termopar para monitorizar la temperatura del combustible, así como, un control del encendido y apagado de la resistencia eléctrica.

Payri et al. [20], diseñaron y fabricaron un soporte, y una camisa de refrigeración para montar un inyector en un tasímetro. En la cubierta, se introduce un flujo de una solución de etilenglicol, la cual sirve para intercambiar calor con la superficie del inyector, y a su vez con el combustible localizado en su interior. Además, cuenta con un orificio para introducir un termopar al interior de la cubierta, el cual mide la temperatura de la superficie del inyector.

Hoang [61], empleó un intercambiador de calor para el calentamiento del combustible, para ello, emplearon los gases de escape del motor Diesel. Sin embargo, durante el primer arranque del motor, emplearon un calentador eléctrico en el interior del tanque de combustible. Asimismo, contaba con un sistema electrónico con el cual se registró la temperatura mostrada por termopares, así como, para realizar el ajuste para el control de la temperatura.

De la misma manera, Kodate et al. [62], emplearon un sistema de calentamiento del combustible, para lo cual utilizaron un intercambiador de calor para mantener la temperatura requerida antes de inyectarlo en la cámara de combustión, empleando los gases de escape de la combustión para controlar la temperatura del combustible.

El intercambiador de calor fue colocado después de la bomba de combustible, en la línea de conexión al inyector.

Diversos autores han estudiado el efecto de la temperatura en el combustible tal como; Aitbelale et al. [63], quienes determinaron la densidad, del biodiésel derivado de aceite de cocina, desde $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ hasta $120\text{ }^{\circ}\text{C}$, así como a diferentes niveles de presión de inyección. Observaron que la densidad aumentaba con el incremento de la presión de inyección, sin embargo, para un mismo nivel de presión de inyección, la densidad se reduce al incrementar la temperatura.

Por otra parte, Das et al. [58], estudiaron el efecto de de la temperatura sobre la viscosidad, y la tensión superficial empleando diésel, biodiésel derivados de aceite de ricino (*COME*), de aceite de *neem* (*NOME*), y de aceite de girasol (*SOME*), así como de sus mezclas en proporción volumétrica de 10 %, 20 %, 30 % y 50 % para cada biodiésel. Sus resultados muestran que:

- La variación de la viscosidad con la temperatura, para el diésel es mínima comparada con la variación que presenta el COME, la cual es la más alta. Así mismo, se observa que a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ la viscosidad del COME, NOME, y SOME es aproximadamente $13\text{ mPa}\cdot\text{s}$, $7\text{ mPa}\cdot\text{s}$, y $4.5\text{ mPa}\cdot\text{s}$, respectivamente.
- Al aumentar la proporción de biodiésel, el valor de la densidad se incrementa. Mientras que, al aumentar la temperatura del combustible, provoca que el valor de la densidad de las mezclas, empleando un mismo biodiésel, sea similar a todas las proporciones estudiadas.
- La tensión superficial se reduce al incrementar la temperatura para todos los combustibles. Sin embargo, para el COME la diferencia de la tensión superficial es de aproximadamente 20 % con respecto al diésel, mientras que, para el NOME es de 7.5 % mayor, y el valor para el SOME es aproximadamente 10 % menor al del diésel.

Yadav et al. [64], investigaron el efecto de la temperatura en la viscosidad,

densidad, y tensión superficial de los esteres metílico y etílico de aceite de jatropha. Observaron que, las tres propiedades muestran una tendencia de reducción con la temperatura. A $90\text{ }^{\circ}\text{C}$ las propiedades fisicoquímicas de ambos esteres, metílico y etílico de jatropha, son similares a las del diésel. La reducción de las tres propiedades con la temperatura se pueden observar en las Figuras 2.13, y 2.14

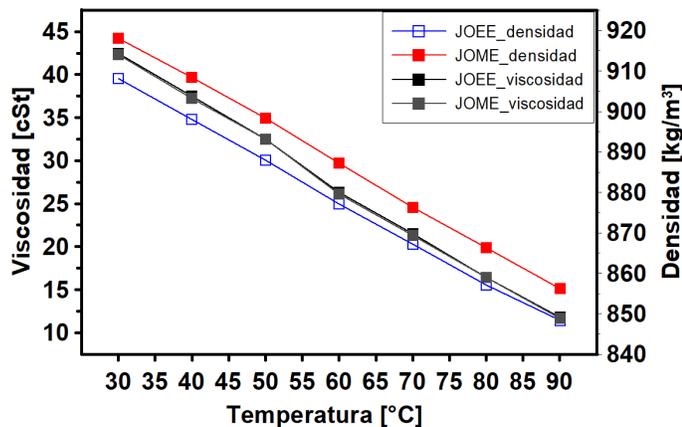


Figura 2.13: Variación de la viscosidad, y densidad del biodiésel de jatropha con la temperatura.

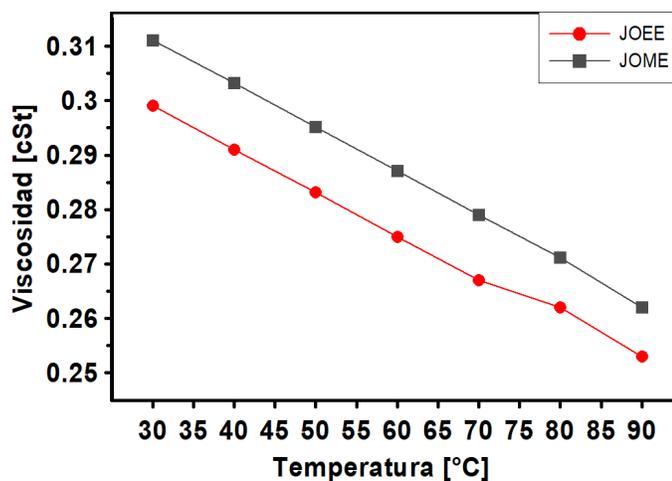


Figura 2.14: Variación de la tensión superficial del biodiésel de jatropha con la temperatura.

Mejorar las propiedades fisicoquímicas de los biodiésel con la temperatura, permite a su vez, un mejor desempeño del proceso de combustión, lo cual favorece

la reducción de emisiones contaminantes [59]. Del mismo modo, tiene una influencia positiva en los componentes del sistema de inyección [19].

Martin et al. [21], estudiaron el efecto de calentar el combustible, sobre las emisiones y rendimiento de un motor Diesel. Emplearon diésel, biodiésel derivado de aceite de algodón (CSO, por sus siglas en inglés *Cottonseed oil*), y sus mezclas en volumen de 20 % y 40 % de diésel, asimismo, las cargas del motor estudiadas fueron 20 %, 40 %, 60 %, 80 %, y 100 % encontraron que:

- El calentamiento del CSO, y de las mezclas produce una reducción en la viscosidad cinemática lo cual provoca:
 - Un aumento en la eficiencia térmica del motor, específicamente, se observa en la Figura 2.15 que la mezcla precalentada con 40 % de diésel, es la más cercana al valor del diésel. Así como también, se observa un aumento de 0.8 % entre el CSO sin calentar, y el precalentado.

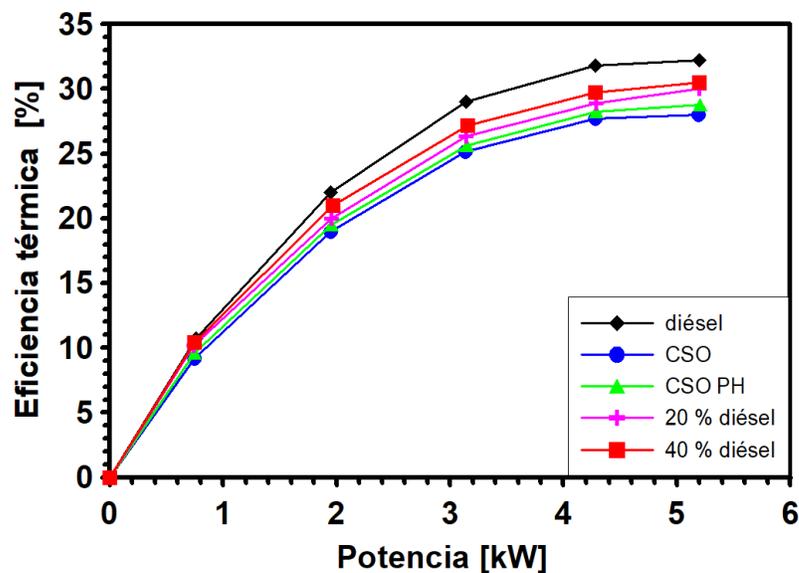


Figura 2.15: Eficiencia térmica de un motor Diesel empleando diferentes combustibles.

- Una reducción de la temperatura de los gases de escape al calentar los combustibles. Sin embargo, el valor más cercano, al valor del diésel, de la

temperatura de gases de escape, es obtenido por la mezcla calentada con 40 % de diésel.

- Las emisiones de humo, CO, y HC se reduce al calentar tanto el CSO, como sus mezclas con diésel. Dichas reducciones muestran, una mejor combustión de los diferentes combustibles empleados.
- Encontraron un aumento de las emisiones de NO, al usar más diésel en la mezcla, así como al aumentar la temperatura del combustible, lo cual se puede observar en la Figura 2.16.

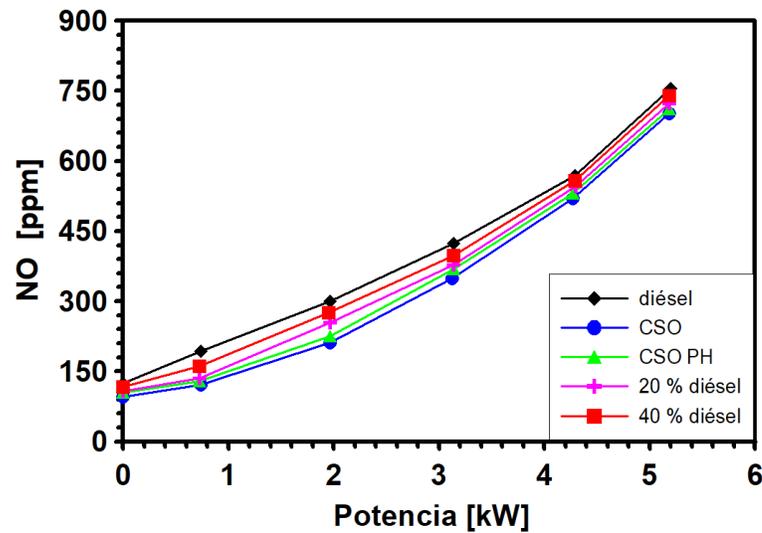


Figura 2.16: Emisiones de NOx de un motor Diesel, empleando diferentes combustibles.

- El tiempo de retraso de la ignición se ve afectado por la viscosidad y la volatilidad del combustible, por lo cual observaron que el CSO tiene un retraso de 3° mayor al del diésel. Mientras que, al calentar las mezclas CSO-diésel se obtiene un retraso de la ignición igual a la del diésel.

Anis and Budiandono [19], investigaron el efecto del calentamiento de combustible en el rendimiento de la bomba de inyección. Emplearon diésel y biodiésel derivado de aceite de cocina (WCO, por sus siglas en inglés *Waste Cooking Oil*).

Concluyen que existe un aumento de la capacidad, y eficiencia volumétrica de la bomba de combustible, conforme se incrementa la temperatura del combustible, sin embargo, si la viscosidad disminuye demasiado, causa un efecto de deterioro por la lubricación y por lo tanto, mayor fricción reduciendo la capacidad de la bomba.

2.6.1 EFECTO DE LA TEMPERATURA EN LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

Del mismo modo, las propiedades fisicoquímicas del combustible tienen un efecto en el proceso de mezcla del combustible, la formación de gotas, y como se mencionó en la combustión [57]. Para estudiar el proceso de mezcla, principalmente se analizan los parámetros macroscópicos, los cuales se definieron en la Sección 2.4 siendo principalmente; la penetración, el ángulo, y el área del chorro.

Como se mencionó estudiar dichos parámetros macroscópicos del combustible es fundamental para comprender el proceso de combustión de los biodiésel, y también, para buscar reducir el retraso de ignición, el consumo de combustible, y las emisiones de gases contaminantes, mientras, se busca una mejora de la eficiencia del motor, y la potencia entregada.

Diversos autores han estudiado el efecto que tiene la temperatura en las propiedades, y éstas sobre los parámetros macroscópicos del chorro, tales como Park et al. [60], quienes estudiaron el efecto de la temperatura, de un aceite combustible, en las propiedades fisicoquímicas, y la penetración del chorro. Concluyeron que, la densidad se reduce de manera lineal, mientras que, la viscosidad tiene un comportamiento exponencial, al aumentar la temperatura del combustible. Con una alta densidad y tensión superficial, se incrementa la penetración del chorro debido al mayor momento de las gotas. Así mismo, la penetración se puede reducir al aumentar la condición de densidad ambiente.

Anis and Budiandono [19], investigaron el efecto de la temperatura en la forma, el ángulo, y el área del chorro, en mezclas diésel-biodiésel derivado de aceite de cocina, dichas mezclas son B10, B20, B30, B50 y B100, y las compararon con el diésel a 30 °C. Concluyeron que:

- A 30 °C, el diésel presenta la forma del chorro más grande. Sin embargo con el aumento de la temperatura de las mezclas, se va obteniendo un forma más ancha, del mismo modo, tanto el ángulo, como el área aumentan, lo cual se observa en las Figuras 2.17, y 2.18.

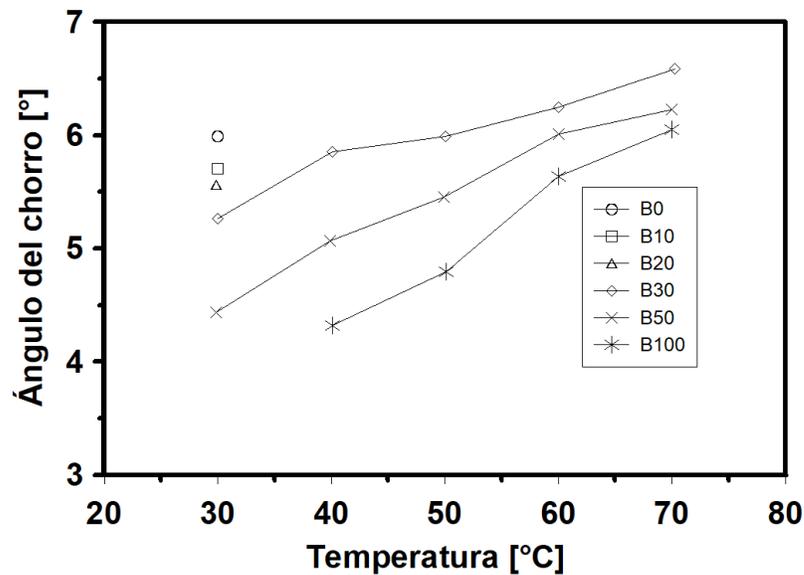


Figura 2.17: Ángulo del chorro de diferentes mezclas de WCO.

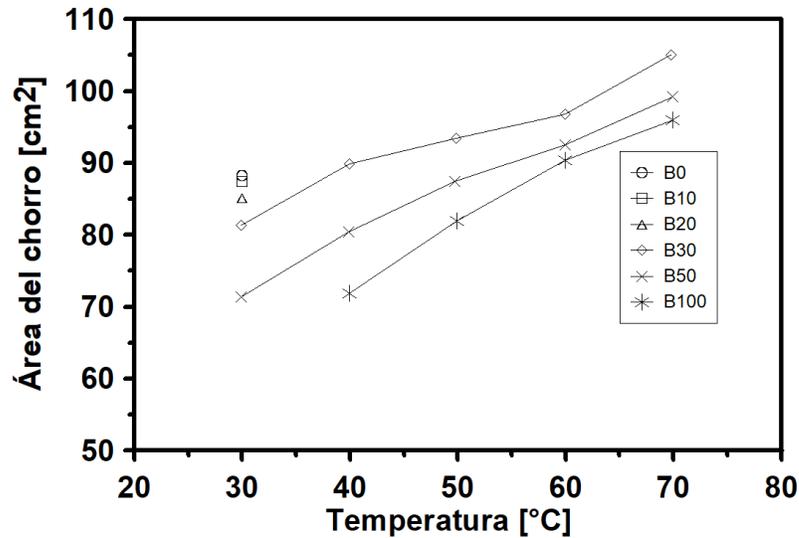


Figura 2.18: Área del chorro de diferentes mezclas con WCO.

- Con el aumento del biodiésel en la mezcla se debe tener una mayor temperatura, para obtener un mejor proceso de atomización.
- El ángulo del chorro, se incrementa con el aumento de la temperatura debido a la reducción de la viscosidad, y densidad de las mezclas. Lo cual produce una mayor energía cinética en el chorro y se reduce el tamaño de las gotas, logrando una mejor dispersión en la cámara de combustión.

Arifin et al. [65], evaluaron el efecto de agregar gasolina, y calentar el combustible, en las propiedades fisicoquímicas, y como éstas afectan a la penetración, ángulo y velocidad del chorro. Emplearon diésel, biodiésel derivado del aceite de *Calophyllum inophyllum*, así como de la mezcla con 30 % de biodiésel (B30), y con 5 % y 10 % de gasolina (B30G5 y B30G10). Emplearon un nivel de presión de inyección de 17 MPa, y una presión ambiente de 0.3 MPa. El calentamiento de combustible se realizó a través de un intercambiador de calor entre la línea de conexión de la bomba al inyector. Concluyen que:

- El uso de gasolina en 10 %, y calentar la mezcla reduce la penetración, y la velocidad del chorro, mientras que, aumenta el ángulo del chorro.

- Debido a la alta viscosidad y densidad, usar solo biodiésel causa que el chorro pueda penetrar fácilmente en el aire localizado en la cámara de combustión, por lo cual se tiene una mayor penetración. En consecuencia, al calentar la mezcla se reduce la viscosidad y densidad, por lo cual, las gotas son de menor diámetro, y se obtiene una menor penetración, y velocidad el chorro, esto se puede observar en las Figuras 2.19, y 2.20.

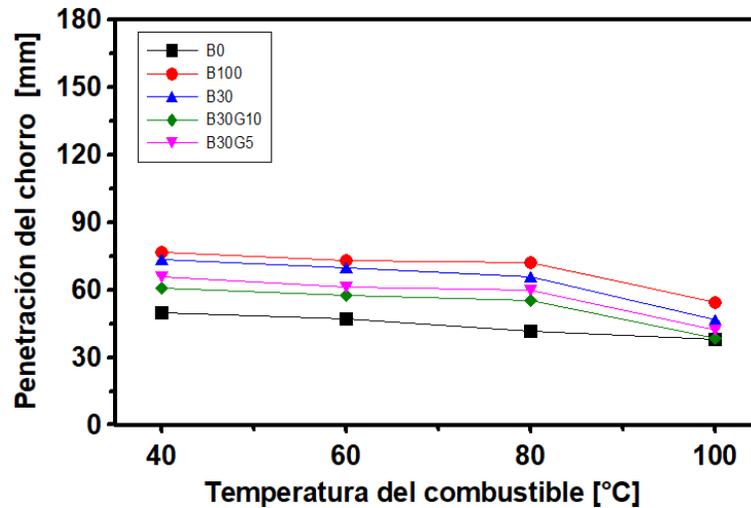


Figura 2.19: Penetración del chorro del combustible empleando diferentes mezclas, y diferentes temperaturas.

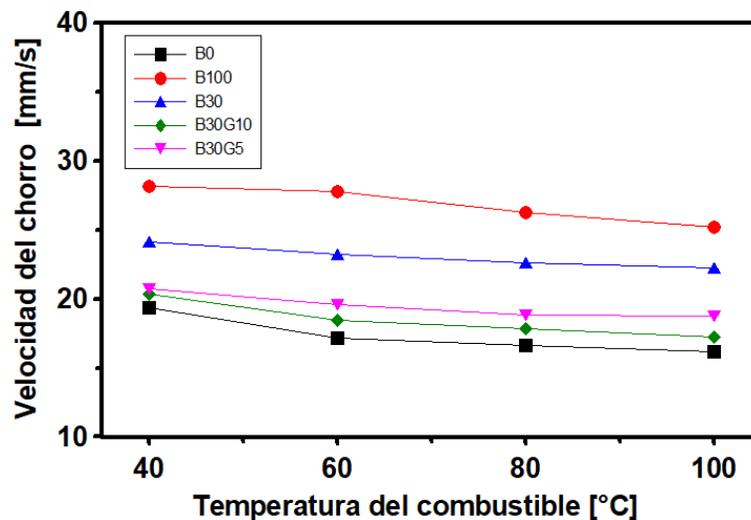


Figura 2.20: Velocidad del chorro de diferentes mezclas empleando diferentes temperaturas.

- La viscosidad es la principal propiedad que afecta al ángulo del chorro, donde usar la B100 produce el ángulo más pequeño en todos los casos, debido a su alta viscosidad. Sin embargo, con el aumento de la temperatura del combustible, se reduce dicha propiedad, y por tanto el ángulo aumenta significativamente, esto se puede observar en la Figura 2.21.

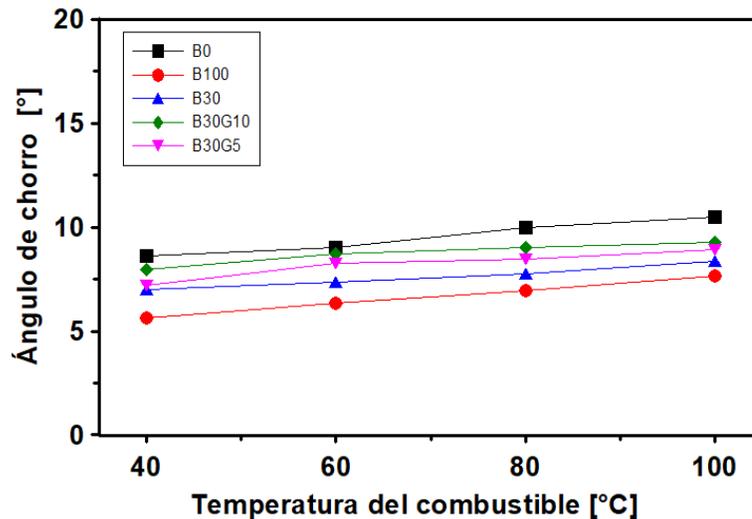
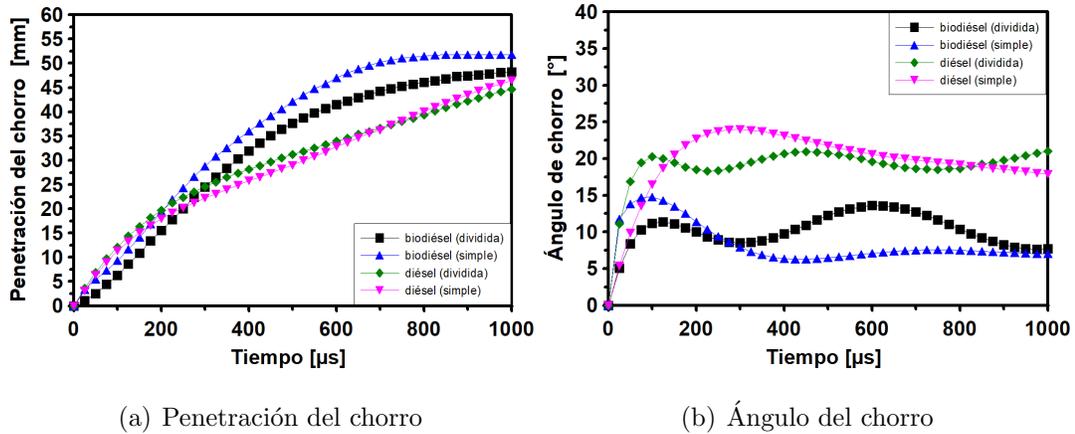


Figura 2.21: Ángulo del chorro de diferentes mezclas empleando diferentes temperaturas.

Chaudhari et al. [66], estudiaron el efecto de las condiciones de temperatura fría y caliente del combustible, y de la estrategia de inyección simple y dividida, empleando biodiésel de *neem*, y comparando los resultados con los obtenidos empleando solamente diésel. Además emplearon un nivel de presión de inyección de 50 MPa, y el calentamiento del combustible se realizó a través de una camisa de refrigeración montada en el inyector. Concluyeron que a baja temperatura, el biodiésel muestra una gran penetración y poca dispersión, debido a su alta viscosidad y densidad. Sin embargo, en condiciones de temperatura alta, se mejora la dispersión del chorro y el mezclado, reduciendo la penetración y aumentando el ángulo del chorro. Además, los autores encontraron que la inyección dividida:

- Reduce la penetración de ambos combustibles, comparados con los obtenidos con la inyección simple, asimismo, debido a una mejor dispersión del chorro,

el ángulo del mismo, muestra un pico más significativo, como se observa en la Figura 2.22.

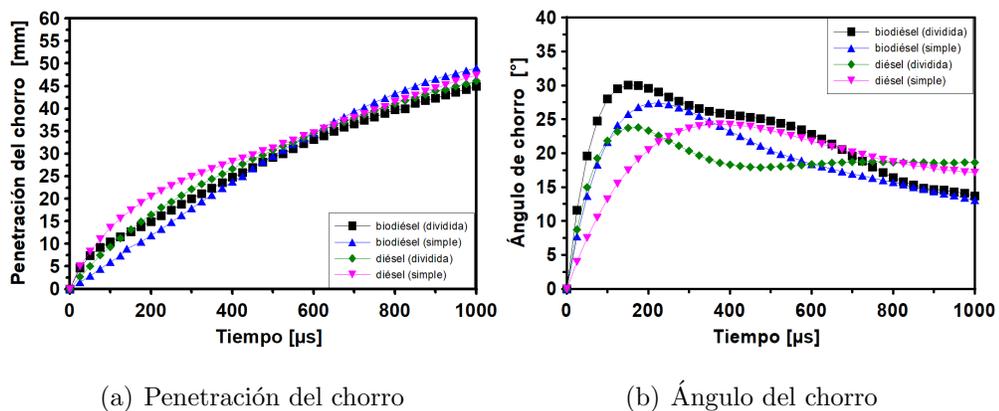


(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro

Figura 2.22: Comparación de la penetración, y ángulo del diésel y biodiésel de *neem*, empleando una estrategia de inyección simple, y dividida. a) Penetración, b) ángulo del chorro.

- En condiciones de temperatura alta, el biodiésel presenta diferencias en la penetración, y el ángulo comparada con el diésel. Donde, se observa en la Figura 2.23, que el biodiésel presenta un ángulo del chorro mayor durante un tiempo, además de obtener una penetración similar.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro

Figura 2.23: Comparación de la penetración, y ángulo del diésel y biodiésel de *neem*, empleando una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y estrategias de inyección simple, y dividida. a) Penetración, b) ángulo del chorro.

Hoang [61], estudió la penetración, y el ángulo del chorro, empleando aceite de coco (SCO, por sus siglas en inglés, *Straight coconut oil*) a diferentes temperaturas, y comparando sus resultados con el diésel a 40 °C. Empleó un nivel de presión de inyección de 20 MPa, y una presión ambiente de 0.1 MPa, además para el calentamiento del combustible empleó un calentador eléctrico de 220 V. Encontró que debido a la alta viscosidad, densidad, y tensión superficial del SCO, a la misma temperatura, la penetración es 23.5% más grande, y el ángulo es 47.6% más pequeño que los del diésel. Mientras que, si se calienta a 110 °C el SCO, sus propiedades fisicoquímicas son similares a las del diésel a 40 °C, por lo que sus parámetros macroscópicos, atomización, y evaporación son más cercanos al los del diésel.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

En este capítulo se presenta primero, la revisión bibliográfica de los estudios previamente realizados, además se describen las principales diferencias con este trabajo, y los temas que no se han abordado. Después se presenta la hipótesis realizada a partir de la revisión bibliográfica. También se presenta el objetivo general, y los particulares del trabajo de tesis. Por último, se describe la metodología general para cumplir con los objetivos planteados.

3.1 SÍNTESIS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Usar el biodiésel como un combustible alternativo ha aumentado, debido a sus propiedades fisicoquímicas cercanas a las del diésel. Sin embargo, existen muchas materias primas para su producción tales como, la palma, la jatropha, la uva, el aceite de pescado, el aceite usado de cocina, las microalgas, la higuerrilla, entre otros. De acuerdo con la materia prima utilizada, las propiedades fisicoquímicas del biodiésel variaran, asimismo, para una misma materia prima, se tiene diferentes propiedades fisicoquímicas dependiendo de la procedencia, y el proceso de producción [57].

Una de las materias primas previamente descritas, es la higuerrilla, de la cual, se obtiene el biodiésel derivado del aceite de ricino (BH, por sus siglas, *Biodiésel de higuerrilla*). El BH tiene la ventaja de que, su materia prima es de fácil cultivo, resiste las crisis hídricas, al ser de segunda generación, es tóxico para el consumo humano, además presenta un punto de nube, y escurrimiento más bajo que el diésel mineral [45]. Sin embargo, algunos de sus inconvenientes son su alta viscosidad, densidad, y tensión superficial, así como la generación de residuos tóxicos [31, 47].

Existen escasos estudios para determinar el comportamiento como un combustible alternativo del BH. Dichos estudios principalmente evalúan las propiedades fisicoquímicas del biodiésel, y sus mezclas con diésel [47], así como del rendimiento, y emisiones de los motores Diesel empleando dichas mezclas [10, 55]. Los estudios de parámetros macroscópicos del chorro se basan en presiones de inyección de entre 20 MPa a 75 MPa, y contrapresiones bajas [53, 54].

Dichos estudios muestran que al emplear BH puro, el proceso de mezcla es pobre, teniendo alta penetración, y un ángulo del chorro menor en comparación al diésel. Sin embargo, presenta una reducción de las principales emisiones contaminantes, excepto en los NO_x los cuales aumentan. Los autores recomiendan emplear máximo, un 20% de este biodiésel mezclado con diésel mineral para obtener los mejores valores de rendimiento, y emisiones contaminantes.

Sin embargo, los parámetros macroscópicos del chorro pueden ser mejorados a través de la mezcla con diésel como se mencionó anteriormente, empleando elevados niveles de presión de inyección, y/o calentando el combustible. Este último favorece la reducción de la viscosidad, densidad, y tensión superficial, lo cual mejora el proceso de inyección y combustión [64].

Para realizar el calentamiento existen tres maneras principalmente, empleando resistencias eléctricas, intercambiadores de calor en las líneas de combustible, o fabricando una cubierta de refrigeración para el inyector [19, 20, 62]. Siendo los dos primeros los más utilizados, debido a su facilidad de instalación, ya que no requiere grandes modificaciones en los motores.

La literatura consultada se enfocan especialmente en el efecto de la temperatura del combustible sobre las propiedades fisicoquímicas [58, 61], y como afectan dichas propiedades al rendimiento, y emisiones de los motores Diesel [21, 59]. Los escasos trabajos que se enfocan en estudiar el efecto de las propiedades fisicoquímicas en los parámetros macroscópicos del chorro emplean niveles de presión entre 10 MPa a 50 MPa, y con contrapresiones menores a los 2 MPa [60, 65, 66].

En estos trabajos se concluye que debido al calentamiento del combustible, las principales propiedades fisicoquímicas se ven reducidas, lo cual provocaría un aumento del ángulo del chorro, y una reducción de la penetración, debido a que se tiene una mejor dispersión del chorro, y gotas de combustible de menor tamaño. Así mismo, debido a la mejor mezcla de aire-combustible en el interior de la cámara de combustión, se reducen las emisiones de CO, CO_2 , y HC, sin embargo, la emisión de NO_x aumentan debido también al contenido de oxígeno en los biodiésel.

Con la literatura recabada se destaca la importancia de este estudio, debido a que los trabajos anteriores sobre el efecto de la temperatura, en un combustible con alta viscosidad, como el BH, se limitan a bajos niveles de presión de inyección, y contrapresiones; lo cual no representa de manera correcta, el proceso de mezcla en el interior de la cámara de combustión de un motor Diesel.

3.2 HIPÓTESIS

Un inconveniente del uso del BH como combustible alternativo, es su viscosidad y tensión superficial, las cuales son más altas comparadas a las del diésel mineral, y biodiésel derivados de otras materias primas, siendo dichas propiedades las que principalmente afectan el proceso de mezcla. En consecuencia, se espera que al aumentar la temperatura de una mezcla, de diésel con 20 % de BH, (**BH20**), provocará que su proceso de mezcla sea similar al del diésel puro a 40 °C, específicamente la penetración, el ángulo y el área del chorro.

3.3 OBJETIVOS

Objetivo general

Estudiar el efecto de la variación de la temperatura de una mezcla BH20 sobre sus propiedades fisicoquímicas, y además, analizar el impacto de ésta variación sobre los parámetros macroscópicos del chorro, particularmente, sobre la penetración, el ángulo, y el área del chorro.

Objetivos específicos/particulares

1. Determinar las propiedades fisicoquímicas de los combustibles. *De acuerdo con la literatura, se deberá estudiar la densidad, viscosidad, y tensión superficial del diésel a 40 °C, y de la mezcla BH20 empleando diferentes temperaturas.*
2. Controlar la temperatura del combustible en el sistema de inyección. *Específicamente modificando la instalación experimental, colocando nuevos sensores de temperatura, y sincronizarlos con la interfaz de monitorización del sistema de inyección, asimismo, la instalación de un intercambiador de calor para el control de la temperatura del combustible, y la insolación de las líneas de combustible.*

3. Determinar las condiciones de trabajo. *Concretamente definir las temperaturas de la mezcla BH20, presiones de inyección, y tiempos de energización a los que se realizaran los ensayos de visualizaron del chorro de combustible, basado en la determinación de las propiedades fisicoquímicas, las condiciones de trabajo de la herramienta experimental, y los trabajos previos.*
4. Evaluar y comparar los parámetros macroscópicos del chorro. *Por tal motivo, se obtendrá el valor de la penetración, ángulo, y área del chorro, para el diésel a 40 °C, mientras que, para las mezcla BH20, se evaluaran a diferentes temperaturas.*

3.4 METODOLOGÍA GENERAL

La metodología para cumplir el objetivo de evaluar el efecto de la temperatura del combustible sobre sus propiedades fisicoquímicas, y la relación de éstas con los parámetros macroscópicos del chorro, se muestra en la Figura 3.1, y consta de 8 etapas, las cuales se describen a continuación.

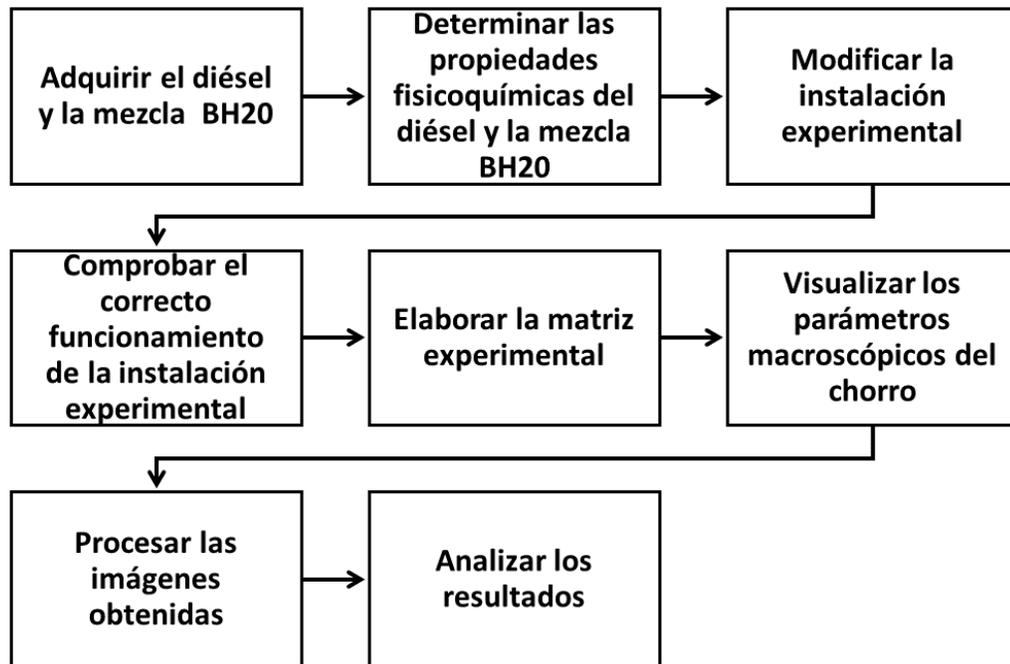


Figura 3.1: Diagrama de la metodología general.

Adquirir el diésel y la mezcla BH20

El biodiésel a emplear es derivado del aceite de ricino, dicho combustible fue elaborado por Instituto Politécnico Nacional (IPN). Además, con la revisión de la literatura, y las normativas existentes sobre biodiésel y emisiones contaminantes, se realiza la selección y producción de la mezcla diésel-BH. Por último, como parte de la colaboración con el Laboratorio Nacional de Desarrollo y Aseguramiento de la Calidad en Biocombustibles (LaNDACBio), se realizó la gestión para el envío de dichos combustibles a la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL), donde se determinarán los parámetros macroscópicos del chorro.

Determinar las propiedades fisicoquímicas del diésel, y la mezcla BH20

En esta fase, se caracterizarán las diferentes propiedades fisicoquímicas de los combustibles a estudiar, específicamente, se determinarán la viscosidad, densidad, y tensión superficial, las cuales influyen en el proceso de inyección. Dichas propie-

dades serán determinadas para un amplio rango de temperaturas, con el objetivo de conocer la variación de dichas propiedades fisicoquímicas con el incremento de la temperatura. Además, se evaluará también el poder calorífico del diésel de referencia, y de la mezcla BH20.

Modificar la instalación experimental

En esta etapa se realizará la instalación de nuevos termopares en la superficie del common rail, del inyector, y de la línea que une al rail con el inyector, asimismo, se debe realizar la programación de la interfaz de LabVIEW, para la correcta visualización de los valores de temperatura de dichos termopares. Además, se instalarán intercambiadores de calor a la salida del retorno del common rail, con el propósito de mantener la temperatura en el valor deseado. Por último, para un mejor control de la temperatura en el interior del inyector, se debe aislar el common rail, el inyector, y la línea que une al common rail con el inyector.

Comprobar el correcto funcionamiento de la instalación experimental

Antes de empezar las pruebas de visualización de los parámetros macroscópicos del chorro, primero se debe comprobar el funcionamiento de la instalación experimental. Verificando que, no existan fugas de combustible en el sistema de inyección *common-rail*, y de presión en la cámara de visualización a volumen constante, además, de tener un correcto control de la presión de inyección, del aumento de temperatura del combustible en el depósito, y una correcta sincronización de la cámara de alta velocidad con el inicio de la inyección.

Elaborar la matriz experimental

Para cumplir con el objetivo, en esta etapa se determinarán las condiciones de trabajo, con base en la literatura consultada, los trabajos previos, y la variación de las propiedades fisicoquímicas de los diferentes combustibles. Específicamente, se determinarán los niveles de presión de inyección empleados (P_{rail}), la contrapresión (P_{back}), las temperaturas del combustible, asimismo el tiempo de energización (TE).

Visualizar y adquirir imágenes de los parámetros macroscópicos del chorro

Con base en la matriz experimental, en esta etapa se realizan los diferentes eventos de inyección en la maqueta de visualización a volumen constante, localizada en el laboratorio de fenómenos de transporte de los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE), los cuales son adquiridos con una cámara de alta velocidad.

Procesar las imágenes obtenidas

Las imágenes obtenidas en la etapa anterior, son ingresadas a un código desarrollado en MATLAB, el cual se encarga de determinar los diferentes parámetros macroscópicos del chorro, y guardar los valores en un archivo Excel.

Analizar los resultados

Con los valores de los parámetros macroscópicos del chorro, obtenidos en la fase anterior, se procede a realizar diferentes gráficas, las cuales corresponden a la evolución temporal, y los isotiempos del chorro. A partir de las gráficas elaboradas, se realiza el análisis, y la discusión de los resultados obtenidos teniendo en cuenta la literatura existente sobre la temática estudiada.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA DE LA TESIS

Este capítulo describe las herramientas experimentales para el estudio del efecto de la temperatura del combustible en los parámetros macroscópicos del chorro. Además, de la explicación de la visualización y procesado de las imágenes obtenidas, para su posterior análisis. Por último, se presentan las condiciones de operación empleadas en los ensayos experimentales.

4.1 HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

Para estudiar el efecto de la temperatura del combustible en los parámetros macroscópicos del chorro, se cuenta con una maqueta de visualización a volumen constante, ubicada en el laboratorio de fenómenos de transporte de las instalaciones del LIITE. El esquema de la instalación se presenta en la Figura 4.1.

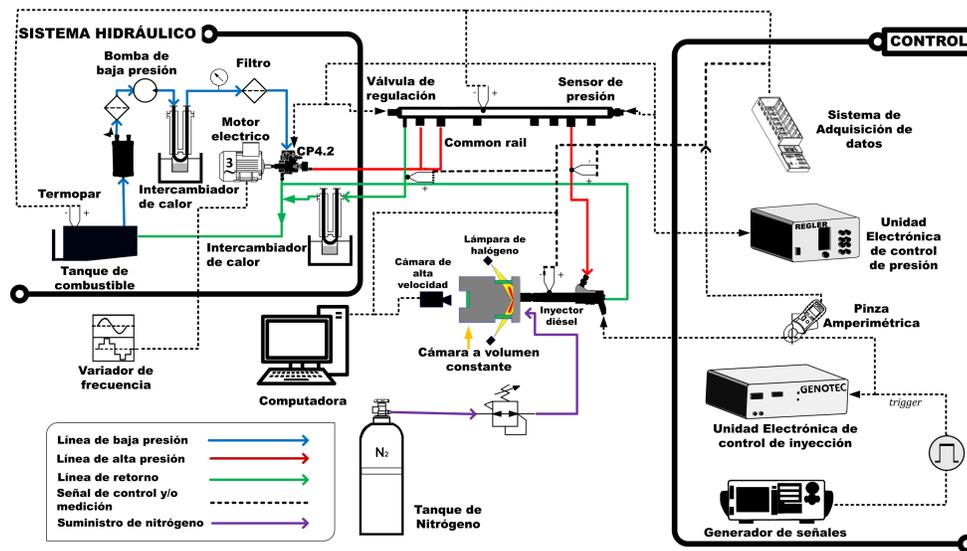


Figura 4.1: Esquema de la instalación experimental para la visualización del chorro diésel.

Se observa que la instalación se divide en un sistema de inyección common-rail, un sistema de visualización de los parámetros macroscópicos del chorro, y un sistema electrónico de control tanto para la inyección de combustible, la regulación de presión, y el control de la cámara de alta velocidad. Estos tres sistemas se describen con más detalle en las secciones siguientes.

4.1.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

El sistema esta compuesto por un depósito de combustible, un sistema de purgado, filtros, una bomba de baja presión, y una bomba de alta presión. Además, cuenta con un *common-rail* de 7 orificios, un inyector diésel tipo solenoide de 8 orificios, y un sistema de refrigeración. También, cuenta con sensores de temperatura, presión, y una válvula de regulación de presión.

Depósito de combustible

Consta de un tanque cuadrado de acero inoxidable, con capacidad de 20 litros, se ubica en el lateral del sistema de inyección. Cuenta con un tapón para el llenado de combustible, una válvula para el vaciado manual del tanque, y un termopar para supervisar la temperatura del combustible. Dicho depósito se muestra en la Figura 4.2.



Figura 4.2: Depósito de combustible del sistema de inyección.

Sistema de purgado

Este sistema se encarga de mantener el sistema de inyección diésel sólo con el combustible empleado, debido a que si el sistema tiene aire, esto causaría daños a los demás componentes. Esta formado por un cilindro de acero inoxidable, instalado debajo del depósito de combustible, y cuenta con una válvula de liberación de aire, en la parte superior del cilindro.

Bomba de baja presión

Para mover el combustible del depósito hacia la bomba de alta presión, se utiliza una bomba externa de baja presión, mostrada en la Figura 4.3. Esta bomba emplea 12 V, y una corriente de 3 A, para su óptimo funcionamiento, generando una presión de 0.4 MPa.



Figura 4.3: Bomba de combustible de baja presión.

Bomba de alta presión

La bomba de alta presión es un bomba de pistones radiales, marca Bosch, modelo CP4.2, la cual puede alcanzar hasta 270 MPa. Cuenta con dos válvulas, una para la regulación de caudal de combustible, y otra para evitar una sobrepresión en el cuerpo de la misma. Es accionada mediante un motor trifásico de 7.5 HP, de la marca Siemens modelo GP199, a través de un acoplamiento flexible de mordaza. El control del régimen de giro del motor se realiza con un variador de frecuencia marca Siemens, modelo micromaster 420. En la Figura 4.4(a), se muestra la bomba y el motor acoplados, mientras que en la Figura 4.4(b) se muestra el variador empleado en la instalación experimental.



(a) Motor y bomba de alta presión acoplados



(b) Variador de frecuencia

Figura 4.4: Equipo empleado para el funcionamiento de la bomba de alta presión.

Filtro de combustible

Se encuentran instalados dos filtros de combustible en el sistema de inyección. Son filtros tipo cartucho, y se ubican, uno en la succión de la bomba de baja presión, mientras el otro se instaló a la entrada de la bomba de alta presión. En la Figura 4.5, se muestra una imagen del filtro de combustible empleado en el sistema de inyección.



Figura 4.5: Filtro de combustible.

Sistema de refrigeración

Con el objetivo de controlar la temperatura del combustible, el cual se inyectará para evaluar los parámetros macroscópicos, se instalaron dos sistemas de intercambiadores de calor, junto con dos baños térmicos.

- *Intercambiadores de calor*

El sistema de refrigeración del combustible consta de un arreglo de dos radiadores, los cuales emplean refrigerante automotriz para controlar la temperatura del combustible. Se instaló uno después de la bomba de baja presión, y otro en la línea de retorno del common-rail. En la Figura 4.6, se muestra un sistema de refrigeración del combustible empleado.

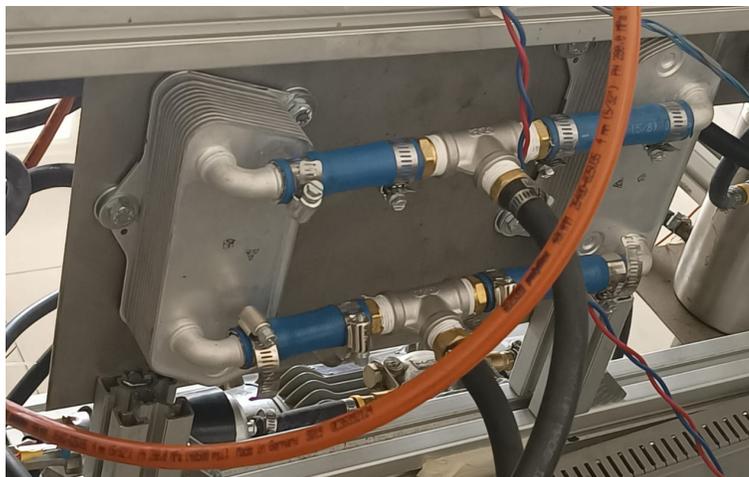


Figura 4.6: Sistema de refrigeración de combustible.

- *Baños térmicos*

El refrigerante automotriz es enfriado o calentado, a través de los baños térmicos mostrados en la Figura 4.7. Ambos baños térmicos son de la marca PolyScience, su diferencia es en la capacidad, el baño mostrado en la Figura 4.7(a), es de 6 litros, mientras que, el mostrado en la Figura 4.7(b), es de 15 litros. Ambos baños térmicos tienen un rango de temperatura de $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

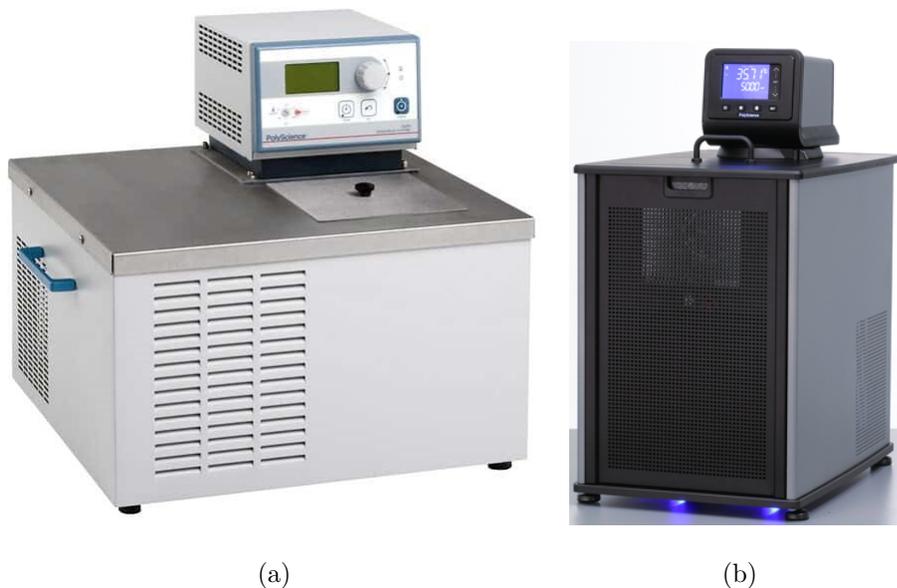


Figura 4.7: Baños térmicos empleados en el sistema de inyección.

Common-rail de combustible

Tiene una configuración de cilindro hueco, con la finalidad de almacenar el combustible a altas presiones, y distribuirlo a cada inyector conectado al mismo a través de las secciones de salida. El *common-rail* empleado consta de 7 secciones de salida, donde se instalan 2 mangueras de alta presión, y una línea que une al *common-rail* con el inyector, además cuenta con 2 cavidades en los laterales, donde se encuentra el sensor de presión, y la válvula reguladora de combustible. En la Figura 4.8, se muestra el *common-rail* empleado.



Figura 4.8: *Common-rail* de combustible de la marca Bosch.

- *Válvula reguladora de presión*

Su función principal es la de mantener la presión deseada del combustible en el interior del *common-rail*, para lo cual, cuenta con una válvula solenoide, la cual opone una resistencia a la presión ejercida del combustible, hasta que esta última es mayor, y libera una parte del combustible a través de la línea de retorno hasta igualar las presiones. Este válvula solenoide se activa con una señal cuadrada de 12 V, y 1000 Hz.

- *Sensor de presión*

Al igual que el *common-rail* de combustible, este sensor es de la marca Bosch, se encarga de evaluar la presión en el interior del *common-rail*, y a través de una membrana piezo-resistiva, varía el voltaje que entrega en uno de sus terminales [67]. Este elemento es esencial en el control de la presión del sistema de inyección.

Inyector diésel tipo solenoide

Se instaló un inyector diésel tipo solenoide, debido a que es uno de los más empleados en la motores Diesel actuales. Es de la marca Bosch, modelo CRI 2.22, y cuenta con 6 orificios de salida en la tobera, este inyector se muestra en la Figura 4.9.



Figura 4.9: Inyector diésel tipo solenoide CRI 2.22.

4.1.2 SISTEMA DE VISUALIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

El sistema de visualización consta de una cámara a volumen constante, lámparas de halógeno, y una cámara de alta velocidad, la cual se sincroniza con la inyección de combustible. Además, se emplea una técnica de iluminación para la correcta visualización del chorro de combustible.

Cámara a volumen constante

Consta principalmente de un cilindro de acero, el cual se presuriza hasta 18 MPa, para simular las condiciones de contrapresión en la cámara de combustión de un motor Diesel. Además, cuenta con un termopar, un sensor de presión, y una válvula de liberación de la presión, así mismo, se instala el inyector en la tapa frontal. En la Figura 4.10, se muestran las vistas frontal, lateral, y posterior, donde se observa que la cámara de visualización cuenta con 3 accesos ópticos; dos laterales, empleados para la iluminación del chorro de combustible, y otro en la parte posterior, empleado para la visualización del evento de inyección, una cámara de alta velocidad.



(a) Vista frontal.

(b) Vista posterior.

Figura 4.10: Cámara de visualización a volumen constante.

Cámara de alta velocidad

La adquisición de imágenes del chorro de combustible, se realizó a través de una cámara modelo Motion Pro X4 CMOs, la cual tiene una resolución de 512×512 pixeles, y un rate de 7000 imágenes por segundo. Además, cuenta con un objetivo Nikon de 60 mm.

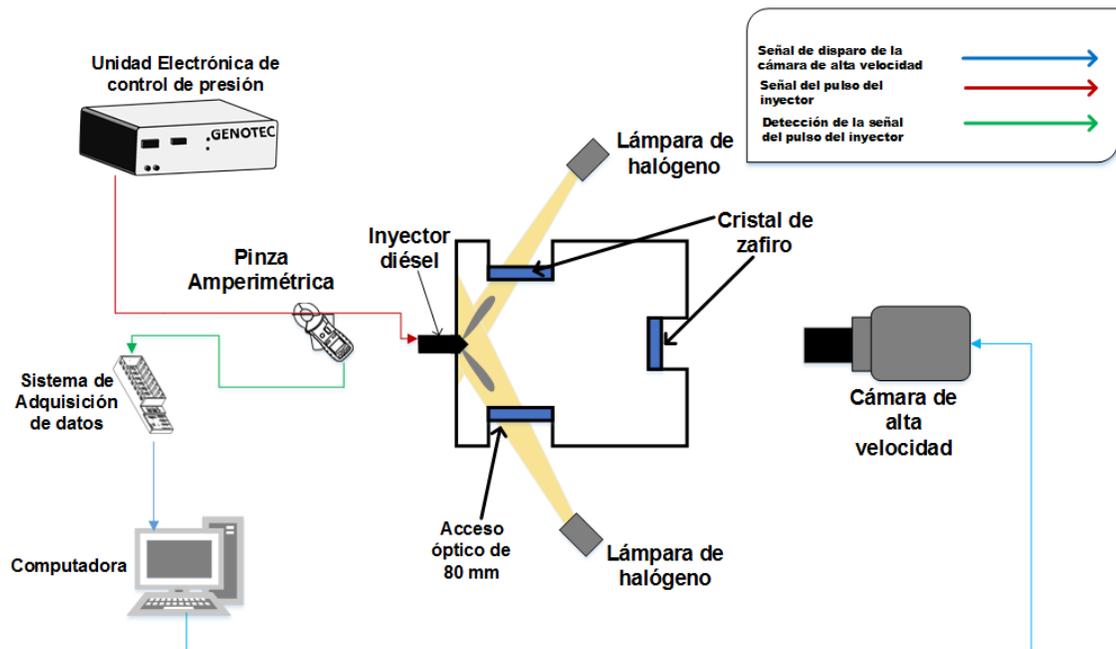


Figura 4.11: Esquema de la aplicación de la técnica de iluminación por dispersión Mie.

Técnica de iluminación por dispersión Mie

Para visualizar de manera correcta el chorro de combustible, se emplea la técnica de iluminación directa por dispersión Mie. La cual consiste en la iluminación directa de manera continua con dos lámparas de halógeno de 100 W, y 12 V, estas lámparas enfocan su haz de luz directamente al chorro de combustible. En la Figura 4.11, se muestra un esquema para la aplicación de esta técnica de iluminación.

4.1.3 SISTEMAS ELECTRÓNICOS DE CONTROL

Tanto el sistema de inyección, y la maqueta de visualización cuentan con tres sistemas de control: el control de la inyección, el control de la presión de combustible, y la sincronización de la cámara de alta velocidad con el inicio de la inyección. Los cuales serán descritos a continuación.

Control de la inyección

El control de la inyección se realiza a través de dos equipos electrónicos. Uno de ellos es de la marca Genotec, y se encarga de controlar la cantidad de pulsos, la duración de cada pulso, así como, el tiempo entre cada pulso, además del voltaje aplicado al inyector. Se opera mediante un programa de computadora llamado Magnetinjektor V.2.

Para el funcionamiento del equipo Genotec, se necesita una señal cuadrada de 2 Hz, y 5 V de amplitud, la cual es suministrada por un generador de pulsos. Ambos equipos se muestran en la Figura 4.12.



(a) Unidad electrónica de control Genotec.

(b) Generador de pulsos.

Figura 4.12: Equipos electrónicos empleados en el control de la inyección.

Control de la presión

El control de la presión de combustible del sistema, se realiza a través de un equipo electrónico conocido como regler, mostrado en la Figura 4.13. Este equipo se conecta a la válvula reguladora, y al sensor de presión instalados en el *common-rail*, y además a la válvula de caudal de combustible, instalada en la bomba de alta presión.



Figura 4.13: Equipo electrónico de regulación de la presión de inyección Regler.

En el programa del regler, se introduce, la curva de calibración del sensor, la apertura de la válvula de caudal, y la presión deseada en el sistema. El funcionamiento del equipo para el control de la presión de inyección, se describe en el trabajo realizado por Rodríguez-Ramos et al. [67].

Sincronización de la cámara de alta velocidad

Para la adquisición correcta de las imágenes del chorro de combustible, se debe sincronizar el inicio de la adquisición, con el inicio de la inyección de combustible. Para lograr este objetivo, a través de una pinza amperimétrica modelo i310s, mostrada en la Figura 4.14, se detecta el pulso de corriente enviado hacia la bobina del inyector.



Figura 4.14: Pinza amperimétrica.

La pinza amperimétrica envía una señal de detección hacia un control cRio modelo 9074, el cual, manda un pulso eléctrico hacia la cámara de alta velocidad, para comenzar la adquisición de las imágenes del chorro diésel.

4.2 PLAN DE TRABAJO

4.2.1 COMBUSTIBLES

Se emplearán dos combustibles para el desarrollo del trabajo experimental, del estudio sobre efecto de la temperatura del combustible en los parámetros macroscópicos del chorro, los cuales son: el diésel convencional, y una mezcla binaria diésel-BH, tal como se mencionó en la Sección 3.4.

Diésel

El diésel empleado es comercial producido por Petróleos Mexicanos (PEMEX). Este combustible será utilizado como referencia, es decir que los valores tanto de las

propiedades fisicoquímicas, como de los parámetros macroscópicos del chorro serán comparados con los obtenidos por la mezcla binaria, y con ello determinar si existe una mejora del proceso de mezcla para dichas mezclas binarias.

Biodiésel derivado de aceite de ricino

Se obtiene un aceite a partir de las semillas de la planta de higuera, el cual a través de un proceso de transesterificación es convertido en biodiésel. Una vez obtenido el biodiésel puro, y debido a su alta viscosidad, es mezclado con diésel, dicha mezcla se determinó a partir de una revisión de la literatura, mostrada en las Secciones 2.5 y 2.6. Siendo dicha mezcla BH20, es decir, con una proporción de 20 % de BH, y 80 % de diésel.

Propiedades fisicoquímicas

Las propiedades fisicoquímicas de los combustibles fueron caracterizadas por el LANDACBio, donde el diésel se caracterizó a 40 °C mientras que, para la mezcla BH20 se obtuvieron sus propiedades fisicoquímicas a diferentes temperaturas.

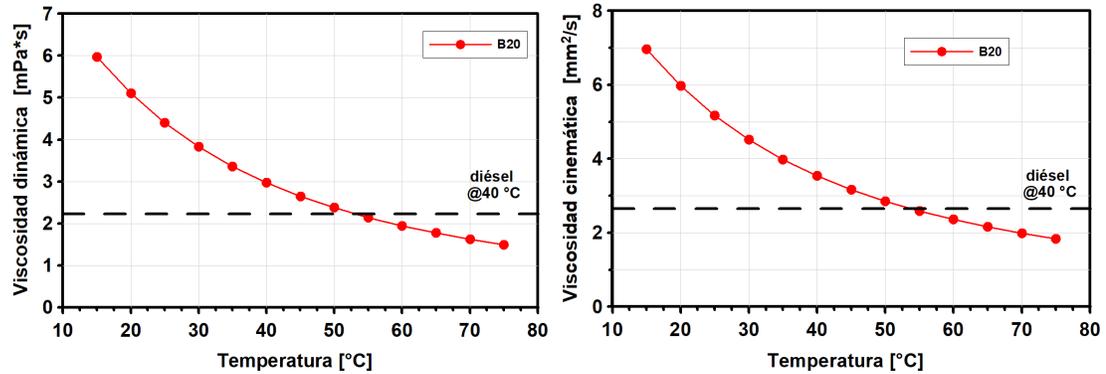
La densidad y la viscosidad se determinaron con un densímetro/viscosímetro marca Anton Paar modelo SVM 3001, donde ambas propiedades se obtienen simultáneamente, mientras que, el punto de inflamación se determinó en un medidor de copa cerrada automático marca Pensky-Martens modelo PMA-5, cumpliendo la norma ASTM D93. La tensión superficial se determinó con un equipo Marca Dataphysics modelo DCAT 15, y el poder calorífico se determinó con una bomba calorimétrica marca Parr. En la Tabla 4.1, se muestran las propiedades del diésel, del biodiésel puro, y las mezcla BH20.

Tabla 4.1: Propiedades fisicoquímicas de los combustibles.

Combustible	Densidad [kg/m ³] @ 40 °C	Viscosidad [mPa·s] @ 40 °C	Tensión superficial [mN/m] @ 40 °C	Poder calorífico [MJ/kg]
Diesel	837.62	2.6571	28.57	45.47
BH	929.52	15.268	N/A	37.123
B20	857.31	3.5404	39.09	43.06

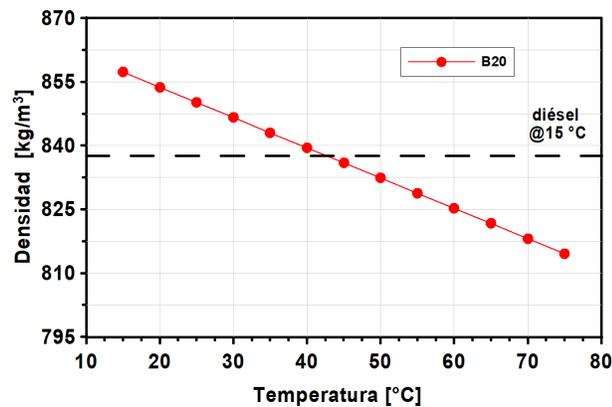
En la Figura 4.15, se muestran la variación de las propiedades fisicoquímicas de la mezcla BH20 con el incremento de la temperatura, de 15 °C a 75 °C. Así mismo, en las Figuras 4.15(a), y 4.15(b), se muestra una línea horizontal discontinua, la cual representa el valor de las propiedades fisicoquímicas del diésel a 40 °C; y en la Figura 4.15(c) se muestra el valor de la densidad del diésel a 15 °.

A partir de las Figuras 4.15(a), y 4.15(b), se observa que ambas viscosidades disminuyen de manera exponencial con el incremento de temperatura de 15 °C a 75 °C, donde a la temperatura de 40 °C la diferencia de la viscosidad cinemática es de aproximadamente 33%, sin embargo, al calentar la mezcla BH20 a una temperatura de entre 52 °C y 55 °C la viscosidad es similar a la del diésel a 40 °C.



(a) Viscosidad dinámica

(b) Viscosidad cinemática



(c) Densidad

Figura 4.15: Propiedades fisicoquímicas de la mezcla BH20 a diferentes temperaturas.

a) Viscosidad dinámica, b) viscosidad cinemática, c) densidad.

Mientras que, a partir de la Figura 4.15(c), se observa la variación de la densidad, la cual con el incremento de la temperatura de 15 °C a 75 °C se reduce de manera lineal, observando que para la temperatura de 15 °C existe una diferencia de aproximadamente 2.35 %, y la mezcla BH20 se tiene que calentar a aproximadamente 44 °C, para que su densidad sea similar a la del diésel a 15 °C.

4.2.2 MODIFICACIÓN Y REVISIÓN DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El calentamiento del combustible en el sistema de inyección se debe realizar de manera correcta, debido a que es uno de los principales objetivos de este trabajo. Debido a esto se optó por cambiar uno de los intercambiador de calor, por un enfriador de combustible como el que se encuentra instalado después de la bomba de baja presión. Dicha instalación se realizó sobre una placa de 1/8 de pulgada, en la cual se tuvo que realizar diferentes orificios, tanto de sujeción como de entrada y salida de combustible, más detalles de la instalación se dan en el Anexo A.

Además de la instalación de los enfriadores, se debe conocer la temperatura del combustible durante la inyección, sin embargo debido a las altas presiones de inyección empleadas, es difícil instalar un termopar en el interior del *common-rail*, por lo cual, se optó por instalar termopares tipo K, en la superficie del *common-rail*, el inyector, y en la línea que une al *common-rail* con el inyector. Esta disposición se eligió debido a que el material del que están hechos son de acero, y con el tiempo suficiente la temperatura de la superficie de los tres, será la misma que la del combustible.

Así mismo, se instalará un aislante de polietileno alrededor del inyector, el *common-rail*, y la línea que los une, asimismo, se modificará la interfaz de LabVIEW. Una vez instalados los termopares, y el aislante se realizaran pruebas al sistema de inyección empleando un nivel de P_{rail} de 80 MPa y 120 MPa, y se empezará a variar la temperatura de los baños térmicos desde 40 °C hasta los 70 °C, y se observarán las mediciones de los tres termopares instalados. Con esto se determinará la temperatura que deberá establecerse en los baños térmicos dependiendo de la temperatura que se requiera en el combustible.

Una vez realizada la instalación de los componentes, y antes de realizar los ensayos de visualización, se comprobará que el sistema de inyección no presente

fugas de combustible, además deberá instalarse un manómetro de alta presión para verificar que el equipo electrónico de control de la presión de combustible, muestre el valor correcto de la presión en su pantalla principal [67]. Así mismo, se verificará la correcta sincronización de la cámara de alta velocidad con el inicio de la inyección, esto a través de realizar una inyección y comprobar la activación de la cámara, para después revisar que se guarden las imágenes del evento de inyección en la carpeta designada. En el Anexo B, se dan detalles de cada sección revisada, y cuales son los pasos a seguir para su correcto funcionamiento.

4.2.3 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para la caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro, tanto del diésel, como de la BH20, se realizaran inyecciones simples cuya matriz de experimentación se muestra en la Tabla 4.2.

Tabla 4.2: Matriz experimental para la realización de las inyecciones simples.

Combustible	P_{rail} [MPa]	P_{back} [MPa]	Temperatura [°C]	TE [ms]
Diésel	80	5	40	1.0
	100			1.2
	120			1.4
BH20	80	5	40	1.0
	100		50	1.2
	120		60	1.4

Se observa que se realizará un barrido de la temperatura de los combustibles desde 40 °C hasta los 60 °C, debido a que el BH es demasiado viscoso como se mostró en la Tabla 4.1, por lo cual al calentarlo dicha viscosidad disminuye. Así mismo, este barrido de temperatura servirá para determinar el efecto de la temperatura del combustible en los parámetros macroscópicos del chorro, y comparar el

comportamiento de la mezcla BH20 con el del diésel a 40 °C. Además, se realizará un barrido de tres presiones de inyección de 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa, la P_{back} será de 5 MPa, la cual representa la contrapresión generada por el pistón en la cámara de combustión, y el TE de 1.0 ms, 1.2 ms, y 1.4, son elegidos debido a que son representativos de los motores Diesel.

4.2.4 OBTENCIÓN Y PROCESADO DE LAS IMÁGENES DEL CHORRO DE COMBUSTIBLE

Para realizar la visualización, y obtención de imágenes del chorro de combustible, primero se deben cambiar los filtros de combustible, asegurándose de que sean nuevos y no contengan restos de algún otro combustible, esto se realizará en cada cambio de combustible. Una vez instalados se introduce el combustible en el depósito, y se procede a realizar el purgado del sistema. Después se enciende la bomba de baja presión hasta alcanzar la presión de 0.5 MPa, y posteriormente se enciende el motor eléctrico, y se establece una frecuencia de 36 Hz que produce un velocidad de giro de 1000 rpm en el motor eléctrico, esta es la velocidad de trabajo de la bomba de alta presión en un motor Diesel para las condiciones de operación descritas en la Tabla 4.2.

Una vez establecida la frecuencia, la presión del sistema de combustible deberá mostrar 1 MPa. Entonces se procederá a subir la presión de inyección en intervalos de 10 MPa hasta llegar a la presión de inyección requerida. Una vez alcanzada la presión de inyección requerida se deberán realizar inyección al ambiente durante 5 minutos. En una recipiente se recolectará el combustible inyectado, y se comparará con una muestra tomada del depósito de combustible, esto se realizará hasta que el combustible inyectado sea similar al de la muestra. Después de lo cual se procederá a instalar el inyector en la cámara de visualización a volumen constante.

Una vez instalado el inyector se presurizará dicha cámara de visualización con

nitrógeno hasta alcanzar el nivel de P_{back} de 5 MPa. Así mismo, se deberán establecer los parámetros en el generador de pulsos, y la configuración de la cámara de alta velocidad. También se modificará el valor de la temperatura de los baños térmicos a la adecuada, para cada condición de operación a estudiar.

Finalmente, verificando que todos los parámetros son los adecuados, se realizarán tres ensayos por cada condición de operación, y se verificará que la cámara de alta velocidad guarde los tres eventos. Una vez obtenidas las imágenes de la visualización del chorro de combustible, se determina la penetración, área, y ángulo del chorro, a través de su procesamiento, con un código desarrollado en MATLAB por Rubio-Gómez et al. [68]. A continuación, se describe de manera general el funcionamiento del código antes mencionado, así como la obtención de la resolución espacial.

Resolución espacial

Para realizar el procesado de las imágenes del chorro de combustible se necesita una resolución espacial, con unidades de píxel/mm. Dicha resolución espacial sirve para convertir, a milímetros, los resultados de la penetración, y el área del chorro, debido a que las funciones empleadas en el procesado de imágenes entregan resultados en píxeles. Para obtener esta resolución espacial, se coloca una hoja de papel milimétrico en el interior de la cámara de visualización a volumen constante, a la altura de la tobera del inyector, con el fin de obtener la resolución espacial justo donde se desarrolla el chorro de combustible. En la Figura 4.16, se muestra la imagen de la hoja milimétrica colocada en el interior de la cámara de visualización, y con la cual se realizó la obtención de la resolución espacial de este trabajo.

Una vez colocada de manera correcta la hoja, se procede a adquirir una imagen, la cual es procesada para obtener el valor de la posición en píxeles de dos puntos, a su vez se debe conocer la distancia en milímetros de ambos puntos. Por último, se divide la distancia en píxeles entre la distancia en mm. Para fines de este documento la resolución espacial obtenida fue de 42.8 píxel/mm.

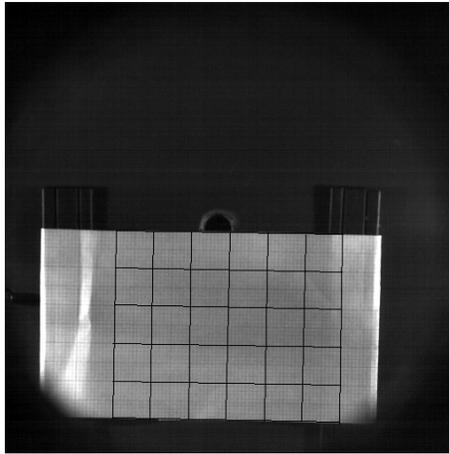


Figura 4.16: Imagen empleada para obtener la relación píxel-mm.

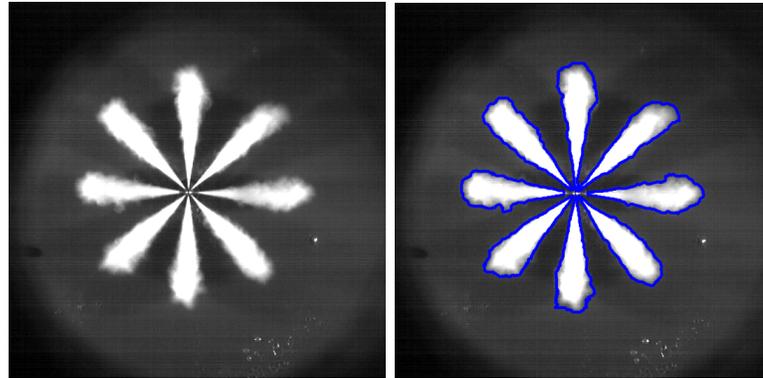
Tratamiento de imágenes

Una vez obtenida la resolución espacial, se ingresa al código desarrollado en MATLAB, para proceder con el tratamiento de las imágenes del chorro, el cual consta de cuatro secuencias principales. Las cuales son:

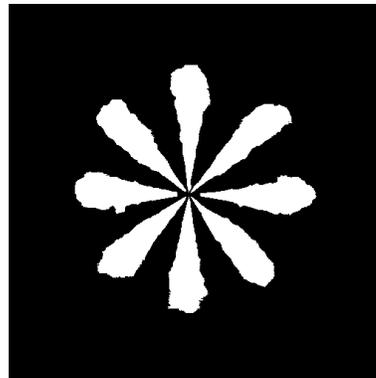
- Primero caracterizar el fondo de la cámara de visualización a volumen constante, con el fin de que el programa pueda detectar la diferencia entre el chorro de combustible, y el fondo.
- Después con esta caracterización, se procede a eliminar el fondo de las imágenes seleccionadas a analizar. Con lo cual sólo se deja el chorro de combustible deseado.
- El código asigna valores de 0 y 1, a los colores negro y blanco, respectivamente. En esta secuencia, al fondo de la imagen se le asignan valores de 0, mientras el chorro de combustible se le asignan valores de 1. A esta secuencia se le conoce como binarizar la imagen.
- Por último, se determinan los diferentes parámetros macroscópicos del chorro para cada imagen seleccionada. Así mismo, se registra en un archivo de Excel,

la penetración (mm), el ángulo ($^{\circ}$), el área del chorro (mm^2), el número de imagen procesada, y el tiempo correspondiente a su adquisición (μs).

En la Figura 4.17, se muestra una imagen obtenida de la visualización del chorro de combustible, la misma imagen binarizada, y contorneada a través del código de procesamiento.



(a) Imagen del chorro obtenida de la visualización (b) Imagen del chorro contorneada



(c) Imagen del chorro binarizada

Figura 4.17: Imagen del chorro de la mezcla BH20 empleando un P_{rail} de 120 MPa, una P_{back} de 5 MPa, una temperatura de 40 $^{\circ}C$, y un TE de 1.0 ms.

CAPÍTULO 5

EFFECTO DE LA TEMPERATURA DEL COMBUSTIBLE EN EL PROCESO DE MEZCLA

En el presente capítulo se discute la influencia de las propiedades fisicoquímicas de los combustibles sobre los parámetros macroscópicos del chorro, empleando diésel, BH20, y una estrategia de inyección simple. Mostrando primero el análisis de los parámetros macroscópicos del chorro empleando diferentes niveles de presión de inyección. Después se analiza el comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro para la mezcla BH20 empleando diferentes temperaturas, y con ello determinar su efecto sobre la penetración, el ángulo, y el área del chorro. Por último, se realiza la comparación de los parámetros macroscópicos de la mezcla BH20, con los resultados del diésel a 40 °C, a diferentes niveles de P_{rail} para comprobar la hipótesis de este trabajo.

5.1 CARACTERIZACIÓN DE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE DIFERENTES COMBUSTIBLES

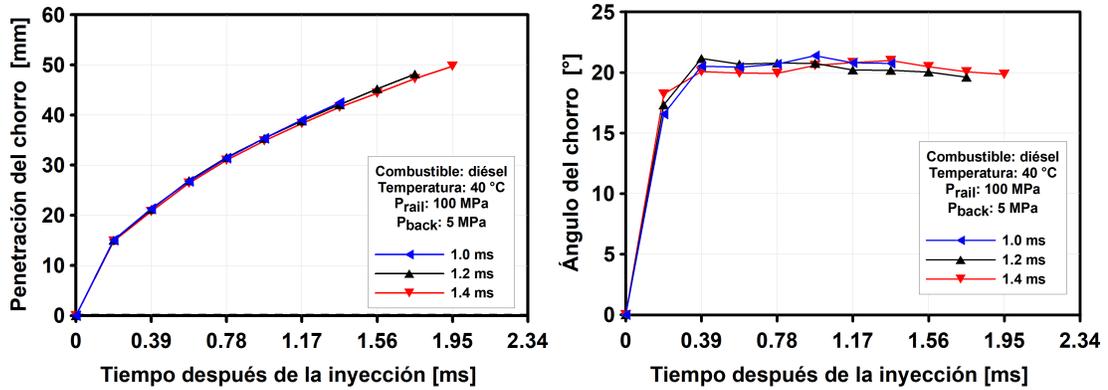
Se realizaron los experimentos de la matriz experimental mostrada en la Tabla 4.2, empleando diferentes combustibles, niveles de presión de inyección, temperaturas, tiempos de energización, y una estrategia de inyección simple. En esta sección se analizará el comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro, tanto del diésel, como de la mezcla BH20, variando primero el TE, y luego el nivel de P_{rail} .

Comparación de los parámetros macroscópicos del chorro empleando diferentes TE.

En las Figuras 5.1, y 5.2, se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro, para el diésel, y la mezcla BH20 empleando diferentes condiciones de trabajo. A partir de estas figuras se realizó la comparación del efecto del TE sobre los parámetros macroscópicos del chorro, donde se observa de color azul, negro, y rojo el TE de 1.0 ms, 1.2 ms, y 1.4 ms, respectivamente.

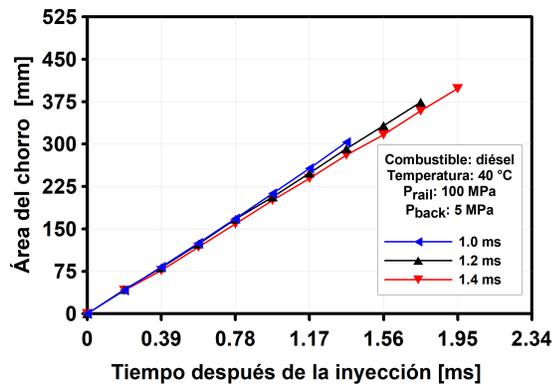
En la Figura 5.1, se muestran las evoluciones temporales de los diferentes parámetros macroscópicos del chorro diésel empleando una P_{rail} de 100 MPa, una P_{back} de 5 MPa, una temperatura de 40 °C, y tiempos de energización de 1.0 ms, 1.2 ms, y 1.4 ms. Existe una similitud en el comportamiento de los tres parámetros macroscópicos estudiados, penetración, ángulo, y área del chorro, específicamente se observa que, al aumentar el TE para los mismos tiempos después de la inyección, no existe una variación de los valores de los parámetros macroscópicos.

Específicamente, la penetración es la que presenta la mayor similitud, mientras que, el ángulo del chorro tiene una pequeña variación de menos de 0.5°. De la misma manera el área del chorro, con el aumento del TE es muy similar, observando pequeñas diferencias en el área del chorro después de los 1.17 ms aSOI.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



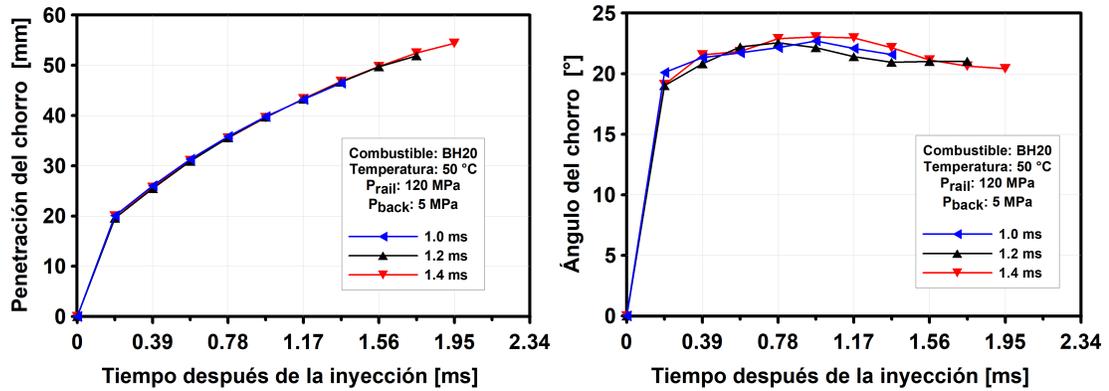
(c) Área del chorro

Figura 5.1: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel a 100 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.

En la Figura 5.2, se muestran las evoluciones temporales de los diferentes parámetros macroscópicos de la mezcla BH20 empleando una P_{rail} de 120 MPa, una P_{back} de 5 MPa, una temperatura de 50 °C, y tiempos de energización de 1.0 ms, 1.2 ms, y 1.4 ms. Al igual que en la condición anterior, existe un comportamiento similar de los parámetros macroscópicos del chorro al variar el TE.

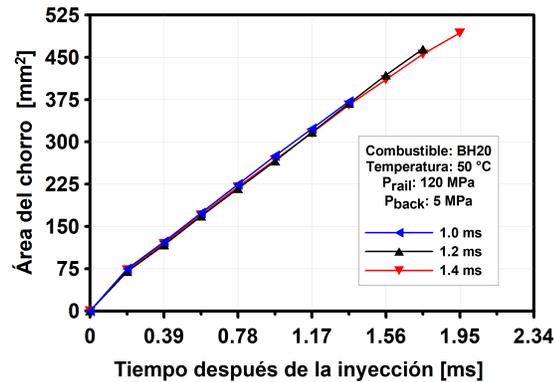
A partir de la Figura 5.2, se observa que la penetración y el área del chorro son los parámetros que menos variación presentaron después de la inyección, al incrementar el TE con diferencias menores al 1%. Mientras que el ángulo del chorro si

tiene variaciones, sin embargo son menores a 0.5° , lo cual es menor a la desviación presentada por los diferentes eventos realizados, como se explicara más adelante.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura 5.2: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 120 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , $50^\circ C$, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.

Se observó el mismo comportamiento descrito anteriormente para cada condición de nivel de P_{rail} , y temperatura empleados. La comparación de los parámetros macroscópicos del chorro variando el TE para las otras condiciones de trabajo se presentan en el Anexo C. Así mismo, este comportamiento a que los parámetros macroscópicos del chorro dependen principalmente del nivel de P_{rail} , del nivel P_{back} , y de las propiedades fisicoquímicas del combustible empleados, mientras que el TE

sólo aumenta la cantidad de masa inyectada, tal como lo concluyó Bae et al. [69], al variar diferentes condiciones de trabajo como el TE, la temperatura, y el nivel de P_{rail} .

Debido a que el tiempo de energización no tiene influencia en los parámetros macroscópicos del chorro, si se mantiene el nivel de presión de inyección, el combustible, y la temperatura del combustible fijos, el análisis posterior de los parámetros macroscópicos del chorro, para el diésel, y la mezcla BH20 a diferentes temperaturas se realizará con los tres niveles de presión, y el TE de 1.0 ms, debido a que es el más representativo de los motores Diesel actuales.

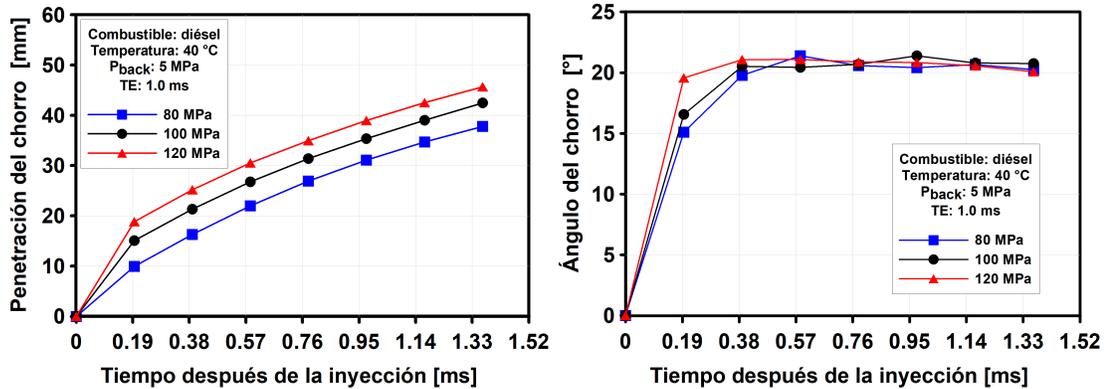
Comparación de los parámetros macroscópicos del chorro a diferentes niveles de P_{rail} .

En las Figuras 5.3 y 5.4, se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro, para el diésel, y la mezcla BH20 empleando diferentes condiciones de trabajo. A partir de estas figuras se realizó la comparación del efecto del nivel de P_{rail} , donde se observa de color azul, negro, y rojo la P_{rail} de 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa, respectivamente.

En la Figura 5.3, se observan las evoluciones temporales de los diferentes parámetros macroscópicos del diésel empleando una P_{back} de 5 MPa, un TE de 1.0 ms, una temperatura el combustible de 40 °C, y tres niveles de P_{rail} . Al aumentar el nivel de P_{rail} , existe un incremento proporcional de la penetración del chorro, entre el nivel de P_{rail} de 80 MPa, y 120 MPa. Asimismo, la diferencia de la penetración es mayor entre los nivel de P_{rail} de 80 MPa y 100 MPa, mientras que, esta diferencia disminuye al elevar el nivel de P_{rail} de 100 MPa a 120 MPa, tal como se muestra en la Figura 5.3(a).

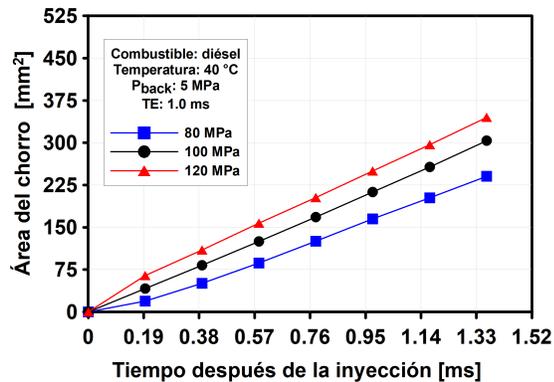
El nivel de P_{rail} no tiene efecto en el ángulo del chorro, tal como se muestra en la Figura 5.3(b). Sin embargo durante los primeros 0.38 ms, después del inicio de la inyección existe una variación de aproximadamente 5°, después de ese tiempo el ángulo del chorro es de aproximadamente 21°, esto debido a que el chorro se

estabiliza con el paso del tiempo. Mientras que en la Figura 5.3(c), se muestra el área del chorro, y al igual que la penetración ésta aumenta con el incremento del nivel de P_{rai} , manteniendo una diferencia proporcional del área con ambos incrementos de P_{rail} , asimismo, la diferencia del área del chorro entre las P_{rail} de 80 MPa y 100 MPa, es más grande que la diferencia existente al incrementar el nivel de P_{rai} de 100 MPa a 120 MPa.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura 5.3: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel empleando una temperatura del combustible de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, y tres niveles de P_{rail} , 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro

Este comportamiento es debido a que el área del chorro es un parámetro que surge de la penetración y el ángulo del chorro, por lo cual, el área aumenta si la penetración es mayor, y el ángulo es el mismo. Así mismo, este comportamiento fue

observado por Haq et al. [54], al evaluar la penetración, y el área del chorro, de mezclas diésel-biodiésel derivado de aceite de ricino, y variar el nivel de P_{rail} de 25 MPa a 75 MPa.

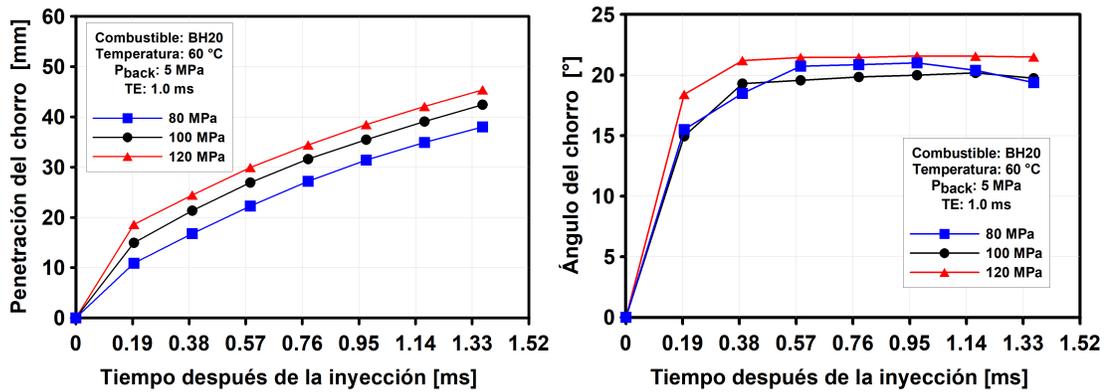
En la Figura 5.4, se observan las evoluciones temporales de los diferentes parámetros macroscópicos de la mezcla BH20 empleando una P_{back} de 5 MPa, un TE de 1.0 ms, una temperatura del combustible de 60 °C, y tres niveles de P_{rail} . Al aumentar el nivel de P_{rail} , existe un incremento proporcional de la penetración del chorro, entre el nivel de P_{rail} de 80 MPa, y 120 MPa. Asimismo, al igual que para el caso anterior, la diferencia de la penetración es mayor entre el nivel de P_{rail} de 80 MPa y 100 MPa, mientras que, esta diferencia disminuye al elevar el nivel de P_{rail} de 100 MPa a 120 MPa, tal como se muestra en la Figura 5.4(a).

En la Figura 5.4(b), se muestra la comparación del ángulo del chorro, donde se observa una ligera variación de menos de 1°, con el incremento del nivel de P_{rail} de 80 MPa a 100 MPa, y de 100 MPa a 120 MPa. Asimismo, durante los primeros 0.38 ms, después del inicio la inyección existe una mayor variación de aproximadamente 5° entre el nivel de P_{rail} de 120 MPa, y los niveles de P_{rail} de 80 MPa, y 100 MPa, después de ese tiempo la diferencia del ángulo del chorro es aproximadamente la misma entre los diferentes niveles de P_{rail} estudiados.

Mientras que en la Figura 5.4(c), se muestra el área del chorro, y al igual que la penetración ésta aumenta con el incremento del nivel de P_{rail} , manteniendo una diferencia proporcional del área con ambos incrementos del nivel de P_{rail} , asimismo, la diferencia del área del chorro entre los niveles de P_{rail} de 80 MPa y 100 MPa, es más grande que la diferencia existente al incrementar el nivel de P_{rail} de 100 MPa a 120 MPa.

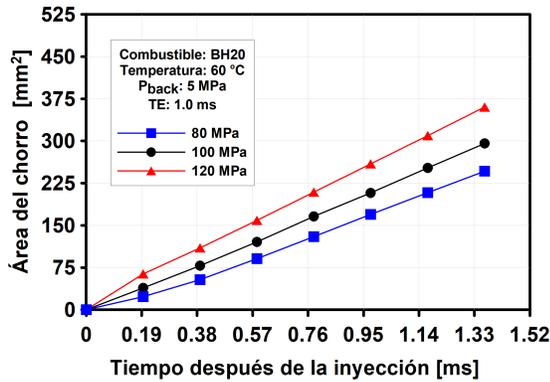
Se observó el mismo comportamiento descrito anteriormente para cada condición de nivel de temperatura de la mezcla BH20, así como para los distintos TE empleados. La comparación de los parámetros macroscópicos del chorro variando el nivel de P_{rail} , para las otras condiciones de trabajo se presentan en el Anexo C.

El comportamiento observado para la penetración del chorro, es debido a que con el aumento del nivel de P_{rail} , se incrementa la velocidad del chorro, por lo cual este puede atravesar más fácil el aire ambiente. Así mismo, con el aumento de la P_{rail} la diferencia de la penetración es similar en todas las condiciones de temperatura y combustible, esto también fue observado por Zhai et al. [70], cuando ellos evaluaron los parámetros macroscópicos del chorro de diésel, empleando elevados niveles de P_{rail} , e inyectores multiorificio.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura 5.4: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos de la mezcla BH20 empleando una temperatura del combustible de 60 °C, y tres niveles de P_{rail} , 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro

El ángulo del chorro no se ve afectado por el nivel de P_{rail} , lo cual es consistente

con el trabajo realizado por Wang et al. [71], al evaluar los parámetros macroscópicos del chorro de diésel, y biodiésel derivados de aceite de palma, y de cocina, empleando niveles de P_{rail} de hasta 300 MPa. Mientras que el comportamiento del área del área del chorro fue explicado para la Figura 5.3.

5.2 EFECTO DE LA TEMPERATURA SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE LA MEZCLA BH20

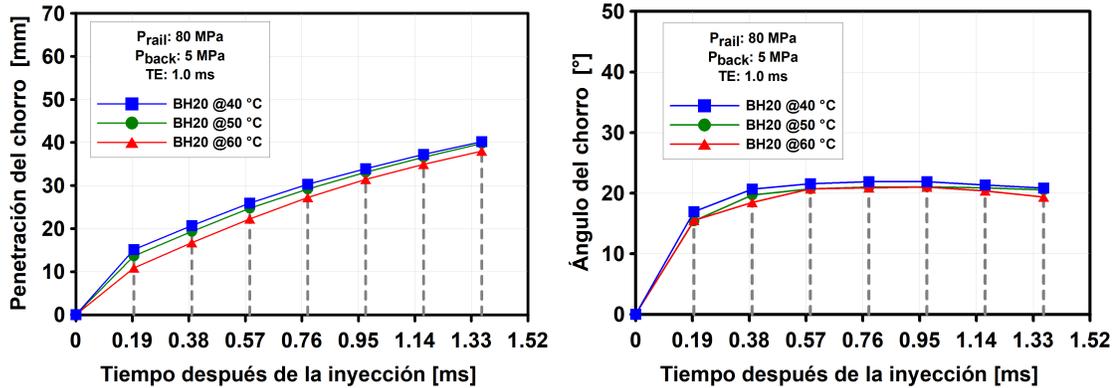
Se realizaron ensayos de visualización de los parámetros macroscópicos del chorro con la mezcla BH20 a diferentes temperaturas, en las siguientes secciones se presentan la comparación de las parámetros macroscópicos del chorro, específicamente la penetración, el ángulo, y el área del chorro, empleando niveles de P_{rail} de 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa, una P_{back} de 5 MPa, y temperaturas de combustible de 40 °C, 50 °C, y 60 °C. En las siguientes figuras, las temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C, se muestran de color azul, verde, y rojo, respectivamente.

5.2.1 NIVEL DE PRESIÓN DE INYECCIÓN: 80 MPA

En la Figura 5.5, se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando diferentes temperaturas. A partir de la Figura 5.5, se observa que la penetración del chorro es mayor para la temperatura de 40 °C, y ésta se reduce con el incremento de la temperatura, siendo la reducción de la penetración mayor al incrementar la temperatura de 50 °C a 60 °C.

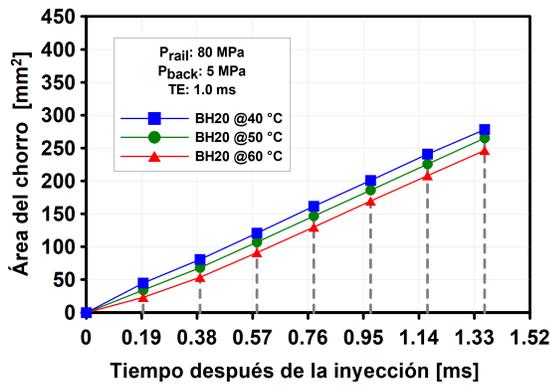
Mientras que el ángulo del chorro es similar en las tres temperaturas, sin embargo, para las temperatura de 50 °C, y 60 °C es donde se presenta la mayor similitud

como se muestra en la Figura 5.5(b). Por último, el área del chorro se comporta de manera similar que la penetración, sin embargo, la reducción del área es similar con el incremento de $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la temperatura del combustible, como se observa en la Figura 5.5(c).



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura 5.5: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando tres diferentes temperaturas. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.

Se eligieron diferentes isotiempos aSOI en la Figura 5.5 marcados con líneas verticales discontinuas, a los 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, con el fin de realizar una mejor comparación de los parámetros macroscópicos antes mostrados.

En la Figura 5.6, se muestran los isotiempos de la penetración del chorro empleando tres diferentes temperaturas del combustible. La reducción de la penetración al incrementar la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ es de 1.49 mm, 1.10 mm, y 0.42 mm en los aSOI de 0.19 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Mientras que, al incrementar la temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ la reducción de la penetración, en los mismos aSOI, es de 2.80 mm, 2.00 mm, y 1.73 mm. Por lo cual, la reducción de la penetración de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ es, en promedio, de más del 13 %, donde las mayores diferencias se presentan en los tres primeros aSOI 0.19 ms, 0.39 ms, y 0.58 ms, siendo del 28.33 %, 19.04 %, y 14.05 %, respectivamente.

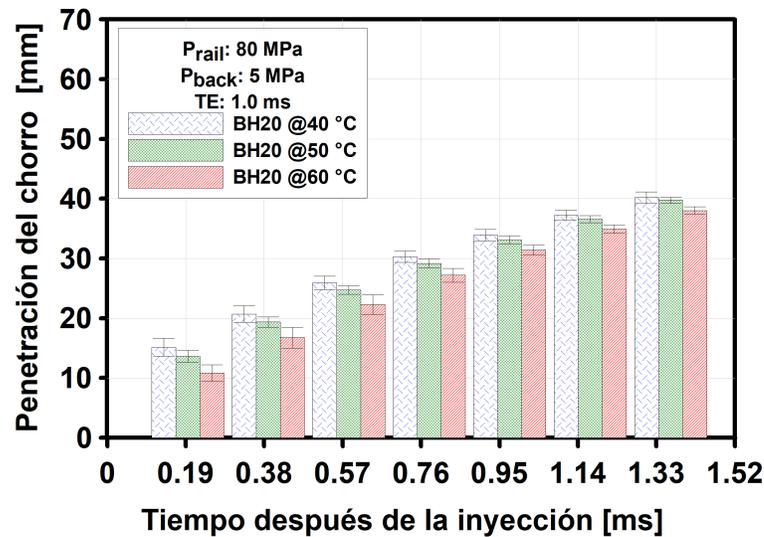


Figura 5.6: Isotiempos de la penetración del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 80 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.

Así mismo, se observan las desviaciones entre las repeticiones de cada condición realizada. Dichas desviaciones son menores a 1.2 mm en promedio en las tres temperaturas. Manteniendo una diferencia promedio del 4.23 %, 2.72 %, y 4.95 %, para las temperaturas de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente.

Este comportamiento es debido a que, al incrementar la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, existe una reducción de sus propiedades fisicoquímicas, específicamente, la viscosidad, y la densidad del combustible. Siendo estas propiedades las que afectan

principalmente a la penetración del chorro, tal y como lo concluyeron Bhikuning et al. [72].

Ghandilou and Taghavifar [73], al evaluar los parámetros macroscópicos del chorro del diésel, y del biodiésel derivado de aceite de soya, empleando diferentes niveles de temperatura, una P_{rail} de 80 MPa, y una tobera, encontraron que, debido a la mayor densidad del biodiésel este gana un mayor flujo de cantidad de movimiento, causando una mayor penetración. Asimismo, al incrementar la temperatura, observaron una reducción de la viscosidad, y tensión superficial, provocando una reducción de la penetración para el biodiésel.

En la Figura 5.7, se presentan los isotiempos para el ángulo del chorro empleando tres niveles de temperatura. Las diferencias de este parámetros al incrementar la temperatura de 40 °C a 50 °C, es en promedio de 0.84°, mientras que al aumentar de 50 °C a 60 °C la diferencia es de menos de 0.50°. Por lo tanto, incrementar la temperatura de 40 °C a 60 °C es de aproximadamente 7% en promedio en todos los aSOI estudiados.

Además, se muestran las desviaciones entre las repeticiones de los eventos realizados en cada condición empleada. Dichas desviaciones son menores de 1° en promedio para las tres temperaturas, siendo de un 4.64%, 2.04%, y 4.15% para 40 °C, 50 °C, y 60 °C, respectivamente.

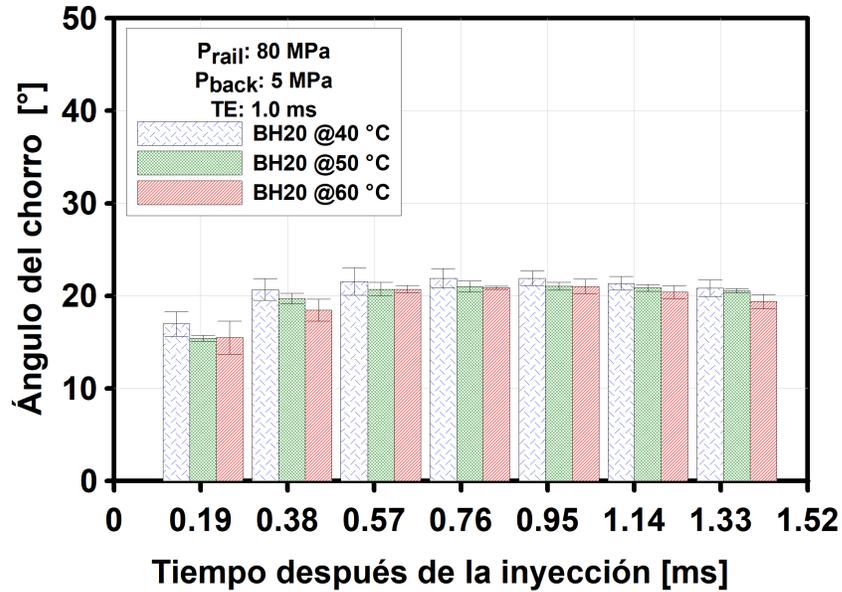


Figura 5.7: Isotiempos del ángulo del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 80 MPa, TE de 1.0 ms, y las tres temperaturas estudiadas.

El ángulo del chorro no se ve influenciado por la temperatura del combustible, debido a que depende principalmente de la geometría interna del inyector, y de la P_{back} , cuando la P_{rail} es alta, tal como lo observó Guevara [74], al evaluar los parámetros macroscópicos del chorro de mezclas diésel-biodiésel, derivado de aceite residual de soya, variando la P_{rail} , la P_{back} , y el TE.

En la Figura 5.8, se observan los isotiempos del área del chorro para las tres diferentes temperaturas estudiadas, donde al incrementar la temperatura del combustible de 40 °C a 50 °C existe una reducción del área del chorro de 10.59 mm^2 , 14.63 mm^2 , y 13.31 mm^2 , en los aSOI de 0.19 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms, respectivamente, lo cual es una diferencia de aproximadamente 11 % en promedio.

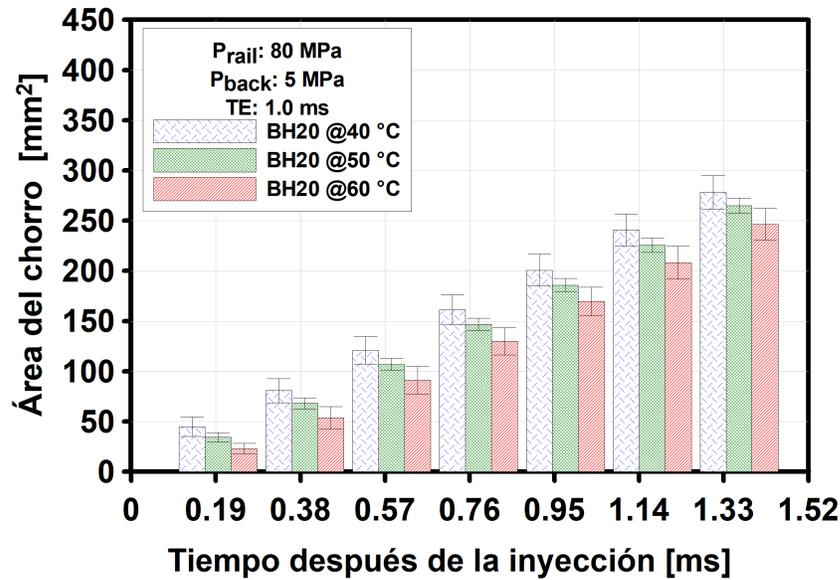


Figura 5.8: Isotiempos del área del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 80 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.

Mientras que al incrementar la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ existe una reducción del área del chorro. Esta reducción es de 21.59 mm^2 , 31.59 mm^2 , y 31.89 mm^2 , en los aSOI de 0.19 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms, respectivamente, estas diferencias representan un 23.82 %, donde en el primer aSOI la diferencia es de 48 %, mientras que, en el último aSOI es del 11.46 %.

Así mismo, se presentan las desviaciones de los ensayos realizados, donde las desviaciones son en promedio de 14.05 mm^2 , 6.20 mm^2 , y 12.86 mm^2 , para las temperaturas de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. Por lo cual representan una diferencia menor al 10 % en promedio para las tres temperaturas.

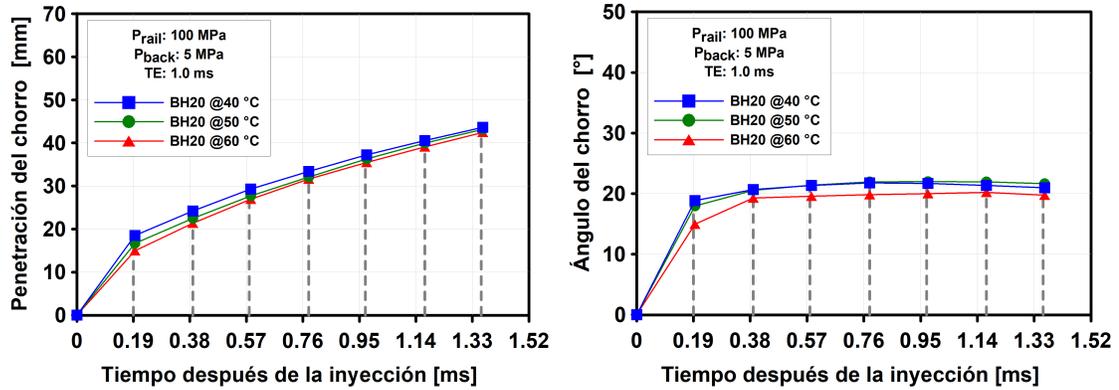
Este comportamiento del área del chorro, es debido a la misma razón presentada en la Sección 5.1, cuando se comparó el área del chorro para diferentes niveles de P_{rail} . Este comportamiento también fue observado por Mena-Cervantes et al. [16], al evaluar los parámetros macroscópicos del chorro del diésel, y mezclas diésel-biodiésel derivado del aceite residual de cocina (WCO, por sus siglas en inglés *Waste cooking oil*), encontrando que las mezclas de diésel-WCO tiene una mayor área del chorro.

Así mismo, también podría deberse a la cantidad de masa inyectada, la cual varia con el incremento de la temperatura, Bae et al. [69], al estudiar el efecto de la temperatura del combustible, en el levantamiento de la aguja, y la velocidad de inyección en un inyector diésel tipo solenoide, empleando diferentes niveles de P_{rail} , y temperatura, concluyeron que, con el incremento de la temperatura, la velocidad del chorro se incrementa significativamente, debido a la menor densidad, y viscosidad del combustible, así mismo, existe una variación de la velocidad de la apertura y cierre de la aguja.

5.2.2 NIVEL DE PRESIÓN DE INYECCIÓN: 100 MPA

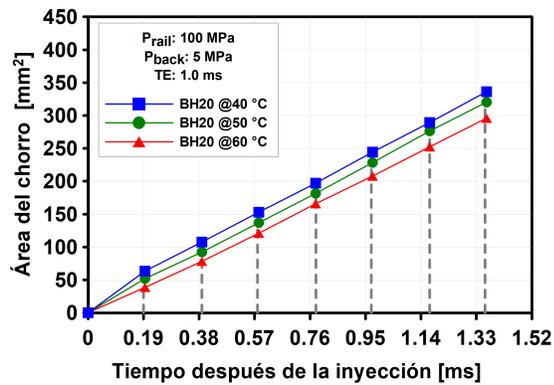
Se observa en la Figura 5.9, la evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando diferentes niveles de temperatura. Encontrando que, la mayor penetración de la mezcla BH20 es alcanzada empleando una temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, sin embargo, con el incremento de la temperatura existe una reducción de dicho parámetro.

Igualmente, se observa una reducción del ángulo del chorro conforme se aumenta la temperatura, sin embargo, conforme pasa el tiempo después de la inyección, el ángulo se vuelve similar para ambas condiciones de temperaturas. Por último, la mayor área del chorro, al igual que la penetración, se muestra para la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, y se reduce conforme aumenta la temperatura, sin embargo cuando se incrementa la temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ existe una mayor diferencia del área del chorro.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura 5.9: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando diferentes temperaturas. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro

Una mejor comparación de los parámetros macroscópicos del chorro empleando diferentes temperaturas, se realizó eligiendo diferentes isotiempos, los cuales se encuentran marcados por líneas verticales discontinuas en la Figura 5.9, a los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms.

En la Figura 5.10, se muestran los isotiempos para la penetración del chorro empleando tres diferentes niveles de temperatura, donde al incrementar de 40 °C a 50 °C la penetración se reduce un 4.54%, donde en los aSOI de 0.19 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms, la reducción es de 1.88 mm, 1.26 mm, y 0.49 mm, respectivamente.

Mientras que, al aumentar la temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ existe una reducción de la penetración de 1.67 mm en el primer aSOI de 0.19 ms, 0.49 mm en el aSOI de 0.71 ms, y de 1.02 mm en el último aSOI de 1.36 ms, es decir una reducción promedio de 3.63 %. Con lo cual se puede observar que conforme aumenta el tiempo, la diferencia de la penetración se reduce entre los niveles de temperaturas empleados.

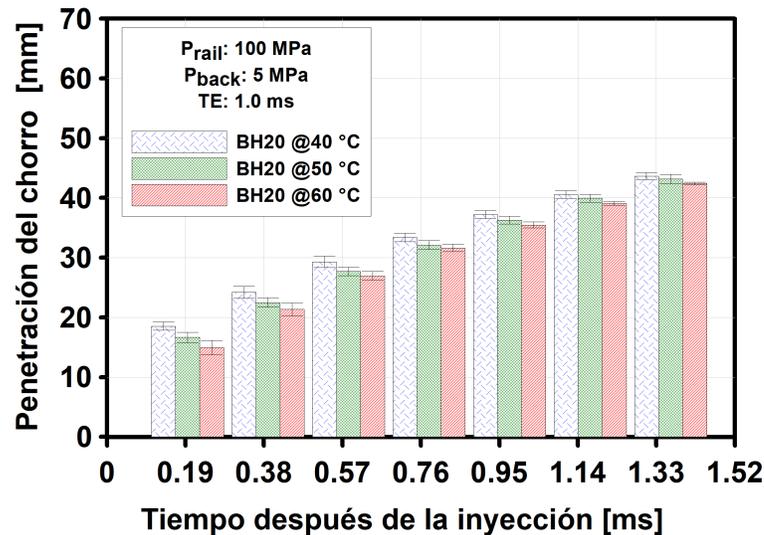


Figura 5.10: Isotiempos de la penetración del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 100 MPa, TE de 1.0 ms, y dos temperaturas.

Así mismo, se observa que las desviaciones entre los ensayos realizados para las tres temperaturas es pequeña, siendo de menos de 1 mm en promedio, para todos los aSOI estudiados. Donde la diferencia de los ensayos es de aproximadamente 2.26 %, 2.70 %, y 2.38 %, para las temperaturas de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. El comportamiento de la penetración del chorro, es similar al observado al nivel de P_{rail} de 80 MPa, y por tanto, tienen las mismas causas descritas anteriormente en la Sección 5.2.1.

En la Figura 5.11, se muestran los isotiempos para el ángulo del chorro de la mezcla BH20, empleando tres niveles de temperatura. En el ángulo del chorro no se ve un efecto significativo de la temperatura de la mezcla BH20, donde al incrementar la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, el ángulo cambia en aproximadamente 0.41° , mientras

que al incrementar la temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ esta diferencia se incrementa a aproximadamente 2° , es decir menos de 10% de reducción.

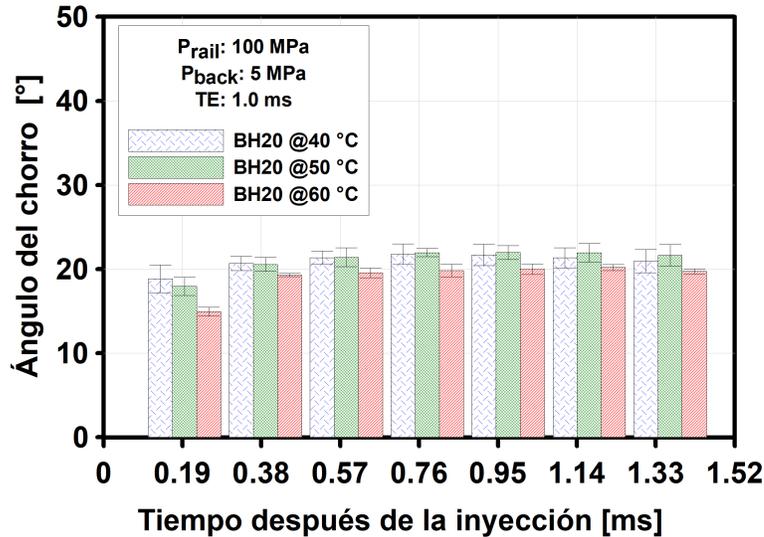


Figura 5.11: Isotiempos del ángulo del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 100 MPa, TE de 1.0 ms, y dos temperaturas.

Las diferencias entre los resultados de los eventos realizados, para el ángulo, son de aproximadamente 1.19° , para la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ mientras que, para las temperaturas de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ son de 0.96° , y 0.48° , respectivamente. Por lo cual, la desviación representa un 5% , 4.10% , y 2.31% para las temperaturas de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, respectivamente. El comportamiento del ángulo del chorro, es similar al observado empleando un nivel de P_{rail} de 80 MPa, y por tanto, tienen las mismas causas descritas anteriormente en la Sección 5.2.1.

En la Figura 5.12, se muestran los isotiempos para el área del chorro de la mezcla BH20 a diferentes niveles de temperatura. El incremento de la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ reduce el área del chorro en 24.70 mm^2 , 29.45 mm^2 , 32.30 mm^2 , 31.48 mm^2 , 36.41 mm^2 , 36.95 mm^2 , y 40.20 mm^2 , en los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Donde con el incremento de la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ el área del chorro se reduce 9.55% en promedio, mientras que, la reducción del área del chorro es de 12.31% al incrementar

la temperatura de 50 °C a 60 °C.

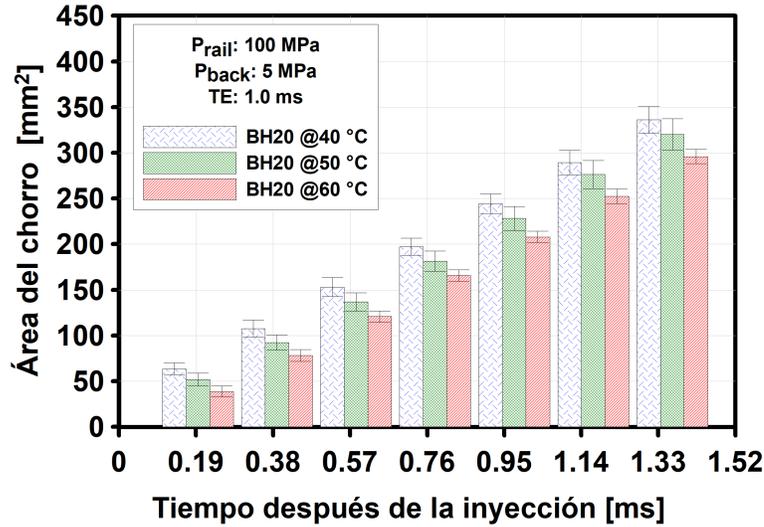


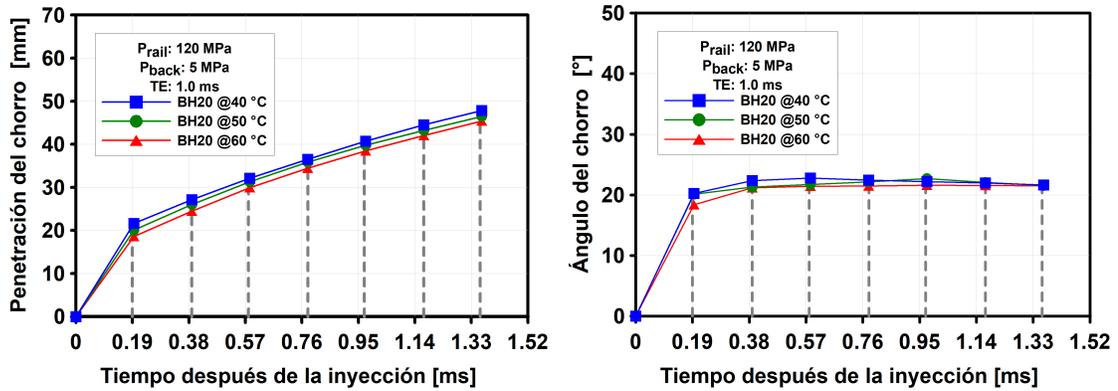
Figura 5.12: Isotiempos del área del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 100 MPa, TE de 1.0 ms, y dos temperaturas.

Las desviaciones del área del chorro de los diferentes eventos realizados para cada condición de temperatura empleada son de 5.75 %, 6.97 %, 5.58 %, para las temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C, respectivamente. Esto representa una desviación promedio de 10.60 mm^2 , 11.78 mm^2 , 6.74 mm^2 , para las temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C, respectivamente. El comportamiento del área del chorro, es similar al observado al nivel de P_{rail} de 80 MPa, y por tanto, tienen las mismas causas descritas anteriormente en la Sección 5.2.1.

5.2.3 NIVEL DE PRESIÓN DE INYECCIÓN: 120 MPa

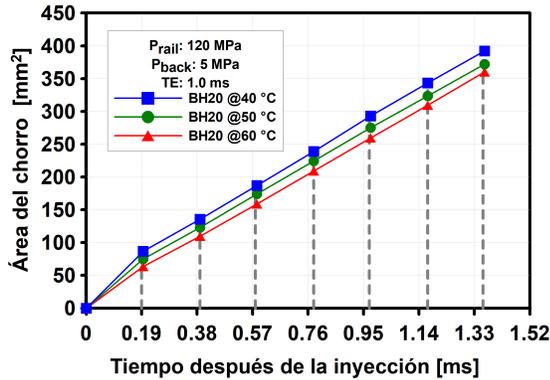
En la Figura 5.13, se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20, empleando un nivel de P_{rail} de 120 MPa, y tres diferentes niveles de temperatura. Incrementar la temperatura de la mezcla, de 40 °C a 60 °C, reduce la penetración del chorro, siendo ésta mayor al incrementar la temperatura de 50 °C a 60 °C en los diferentes tiempos estudiados. Mientras que,

el ángulo del chorro se mantiene similar con el incremento de la temperatura, siendo de aproximadamente 20° para las tres temperaturas al final del tiempo estudiado.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura 5.13: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando tres diferentes temperaturas. a) Penetración, b) Ángulo, c) Área del chorro.

Por último, el área del chorro, al igual que la penetración, se reduce al incrementar la temperatura de $40^\circ C$ a $60^\circ C$, sin embargo la diferencia del área del chorro es similar con el incremento de la temperatura. Asimismo, se destacan en la Figura 5.13 con líneas verticales discontinuas los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, con el fin de realizar una mejor comparación de la penetración, ángulo, y área del chorro empleando las tres diferentes presiones.

En la Figura 5.14, se observan los isotiempos de la penetración del chorro empleando una P_{rail} de 120 MPa, y tres diferentes temperaturas. Elevar la temperatura de la mezcla de 40 °C a 50 °C provoca una reducción de la penetración de 1.13 mm en promedio, es decir, una reducción promedio del 3.45 %, donde en los aSOI 0.19 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms, la diferencia es de aproximadamente 7.28 %, 1.88 %, y 2.91 %, respectivamente.

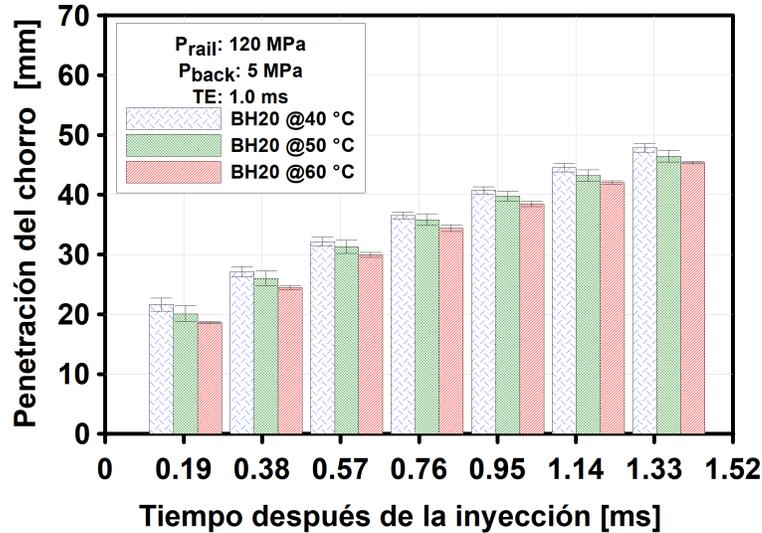


Figura 5.14: Isotiempos de la penetración del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 120 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.

Mientras que, al incrementar la temperatura de 50 °C a 60 °C la reducción de la penetración es de 1.46 mm, 1.42 mm, y 1.06 mm en los aSOI de 0.19 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms, respectivamente, lo cual representa un 4.26 % de reducción en promedio en los siete aSOI estudiados. Entonces, el incremento de la temperatura de la mezcla BH20 de 40 °C a 60 °C, provoca una reducción promedio de 7.53 % en los diferentes aSOI estudiados.

Las desviaciones de los valores de los eventos realizados para cada condición de operación empleada, fue en promedio de 1.07 mm al emplear la temperatura de 50 °C, mientras que fue menor a 0.8 mm en promedio para las temperaturas de 40 °C, y 60 °C, esto representa una diferencia de menos del 3 % entre cada repetición, para

las tres temperaturas. El comportamiento de la penetración del chorro, es similar al observado al nivel de P_{rail} de 80 MPa, y por tanto, tienen las mismas causas descritas anteriormente en la Sección 5.2.1.

En la Figura 5.15, se presenta la comparación del ángulo del chorro a diferentes isotiempos, y empleando tres diferentes temperaturas de la mezcla BH20. Al incrementar la temperatura de la mezcla de 40 °C a 60 °C la diferencia del valor del ángulo del chorro es de aproximadamente 4 % en todos los tiempos estudiados, lo cual representa una diferencia de menos de 1°, entre ambas temperaturas en promedio.

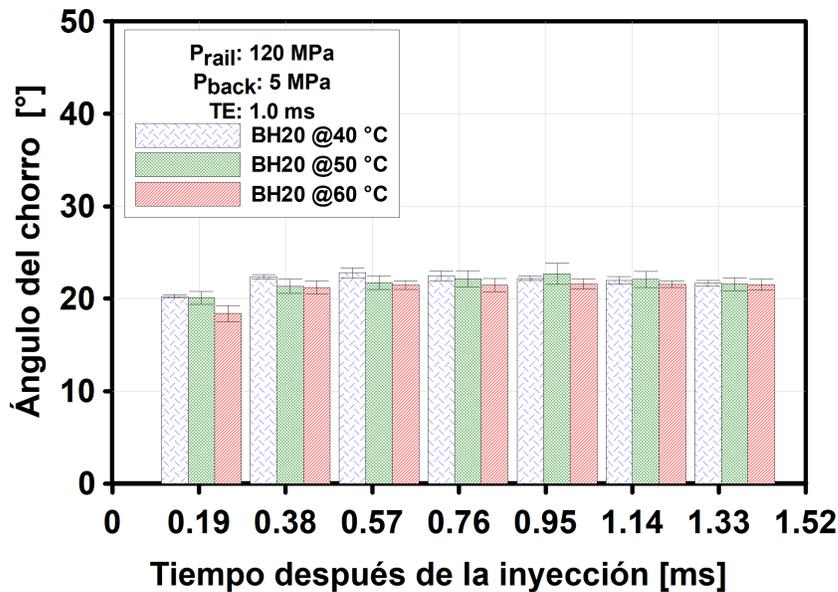


Figura 5.15: Isotiempos del ángulo del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 120 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.

Las desviaciones de los eventos realizados para cada condición empleada también son mostradas en la Figura 5.15. Para las temperatura de 40 °C la desviación es en promedio de 1.43 %, mientras que, para las temperaturas de 50 °C, y 60 °C la desviación es de 3.43 %, y 2.70 %, respectivamente. El comportamiento del ángulo del chorro, es similar al observado al nivel de P_{rail} de 80 MPa, y por tanto, tienen las mismas causas descritas anteriormente en la Sección 5.2.1.

En la Figura 5.16, se presenta el área del chorro de la mezcla BH20 a diferentes

isotiempos, empleando tres diferentes niveles de temperatura. Existe una diferencia del área del chorro de aproximadamente 8 % al incrementar la temperatura de 40 °C a 50 °C, y de 50 °C a 60 °C.

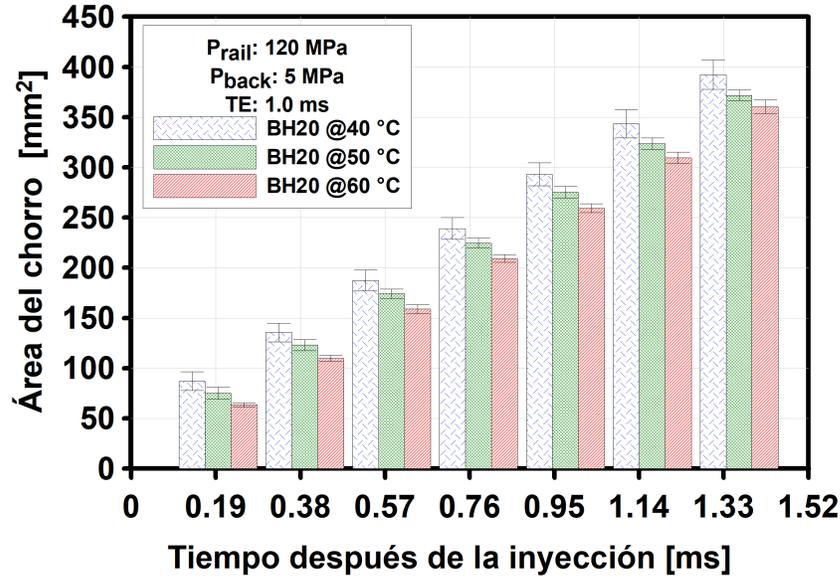


Figura 5.16: Isotiempos del área del chorro empleando la mezcla BH20, P_{rail} de 120 MPa, TE de 1.0 ms, y tres temperaturas.

Donde en los aSOI de 0.19 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms, la reducción del área del chorro es de aproximadamente 12 mm^2 , 14.63 mm^2 , y 20.57 mm^2 , respectivamente, al aumentar la temperatura de 40 °C a 50 °C mientras que, el incremento de la temperatura de 50 °C a 60 °C presenta una reducción de 11.42 mm^2 , 15.34 mm^2 , y 11.58 mm^2 , respectivamente.

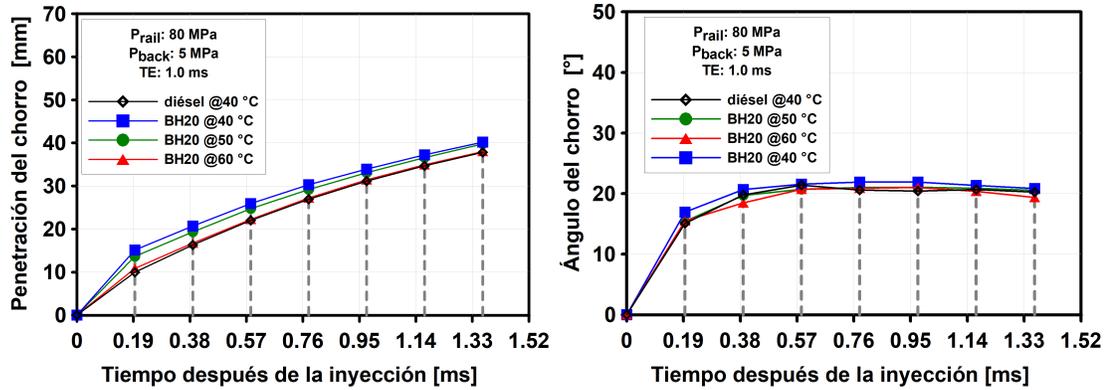
Así mismo, las desviaciones de los eventos realizados para cada condición empleada fueron menores de 4% para cada temperatura empleada, por lo cual, la diferencia entre los eventos fue de 11.43 mm^2 , 5.33 mm^2 , y 4.19 mm^2 , para las temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C, respectivamente. El comportamiento del área del chorro, es similar al observado al nivel de P_{rail} de 80 MPa, y por tanto, tienen las mismas causas descritas anteriormente en la Sección 5.2.1.

5.3 COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE LA MEZCLA BH20 CON EL DIÉSEL

En la sección anterior se analizó el efecto de la temperatura, de la mezcla BH20, sobre los parámetros macroscópicos del chorro, observando una reducción de la penetración, y el área del chorro. En esta sección se compararan la penetración, el ángulo, y el área del chorro de la mezcla BH20 empleando una P_{back} de 5 MPa, un TE de 1.0 ms, y tres diferentes niveles de P_{rail} , y temperaturas, 80 MPa, 100 MPa, 120 MPa, y 40 °C, 50 °C, y 60 °C. Con ello, se determinará si alguna de las temperaturas estudiadas provoca un comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20, similares a los obtenidos para el diésel a 40 °C. Para las figuras mostradas en las siguientes subsecciones, se muestra la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C, de color azul, verde, y rojo, respectivamente. Mientras que, el diésel a 40 °C se muestra de color negro.

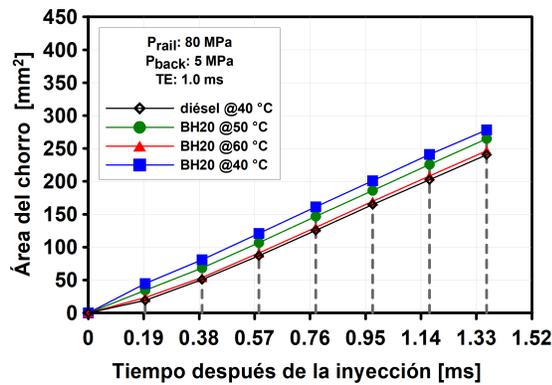
5.3.1 NIVEL DE PRESIÓN DE INYECCIÓN 80 MPa

En la Figura 5.18, se presentan las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para el diésel a 40 °C, y para la mezcla BH20 a tres diferentes temperaturas 40 °C, 50 °C, y 60 °C. Se observa que para la mezcla BH20 empleando una temperatura de 60 °C, los parámetros macroscópicos del chorro son similares a los del diésel a 40 °C, específicamente la penetración, y el área del chorro. Mientras que, el ángulo del chorro sin importar el nivel de la temperatura es similar al obtenido por el diésel empleando 40 °C.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura 5.17: Comparación de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para el diésel, y la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C. a) Penetración, b) Ángulo, c) Área del chorro.

Para una mejor comparación de los parámetros macroscópicos del chorro, se realizó la normalización de los resultados obtenidos con la mezcla BH20 empleando diferentes temperaturas con respecto a los obtenidos para el diésel a 40 °C, esta normalización fue para los isotiempos mostrados en la Figura 5.17, con líneas verticales discontinuas, a los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms.

En la Figura 5.18, se observan los valores de la penetración del chorro de las mezclas BH20 normalizados con respecto a los del diésel, empleando tres diferentes

temperaturas, 40 °C, 50 °C, y 60 °C. La normalización produce que si el valor, del parámetro macroscópico de la mezcla BH20, es de 1, entonces esto indica que la mezcla tiene el mismo comportamiento, mientras que un valor mayor o menor, indica comportamiento superiores o inferiores, respectivamente.

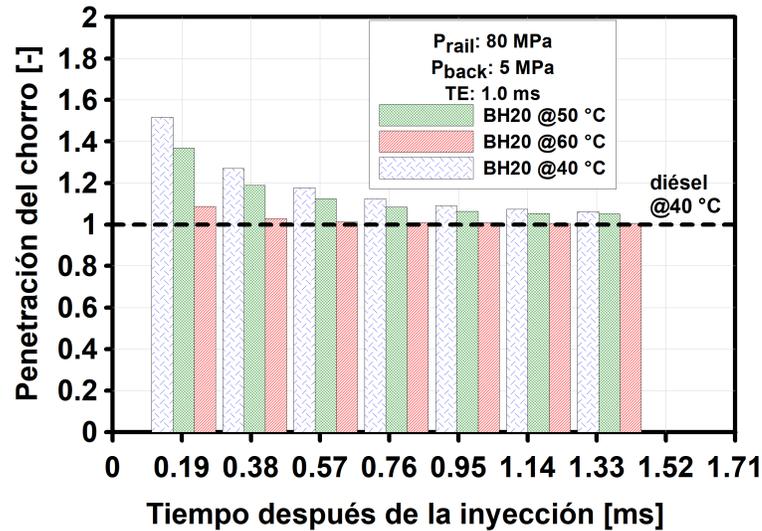


Figura 5.18: Penetración normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.

Para la mezcla BH20 empleando la temperatura de 40 °C, sus valores normalizados son de 1.52, 1.27, 1.18, 1.12, 1.09, 1.07, 1.06, en los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente, entonces, empleando la temperatura de 40 °C la penetración es aproximadamente 19% mayor a la del diésel.

Mientras que, para los mismos aSOI empleando la mezcla BH20 a una temperatura de 50 °C, los valores normalizados de la penetración son de 1.37, 1.19, 1.12, 1.08, 1.06, 1.05, 1.05. Por lo tanto, la penetración empleando esta temperatura, es aproximadamente 13% mayor a la del diésel.

Por último, se observa que empleando una temperatura de 60 °C, la penetración normalizada es de 1.09, 1.03, para los aSOI de 0.19 ms, y 0.39 ms, respectivamente, mientras que para los aSOI de 0.58 ms a 1.36 ms, el valor normalizado de la penetración es de 1.01. Por lo tanto, al emplear este nivel de temperatura la penetración

es de apenas 2% mayor en promedio en los tiempos estudiados, lo cual indica un comportamiento similar al del diésel.

En la Figura 5.19, se muestra el ángulo del chorro normalizado para la mezcla BH20 a diferentes niveles de temperaturas. El incremento de temperatura no muestra un efecto significativo en este parámetro, donde los valores normalizados varían en apenas 0.1 en las tres temperaturas, especialmente al final de los tiempos estudiados donde empieza la estabilización del chorro.

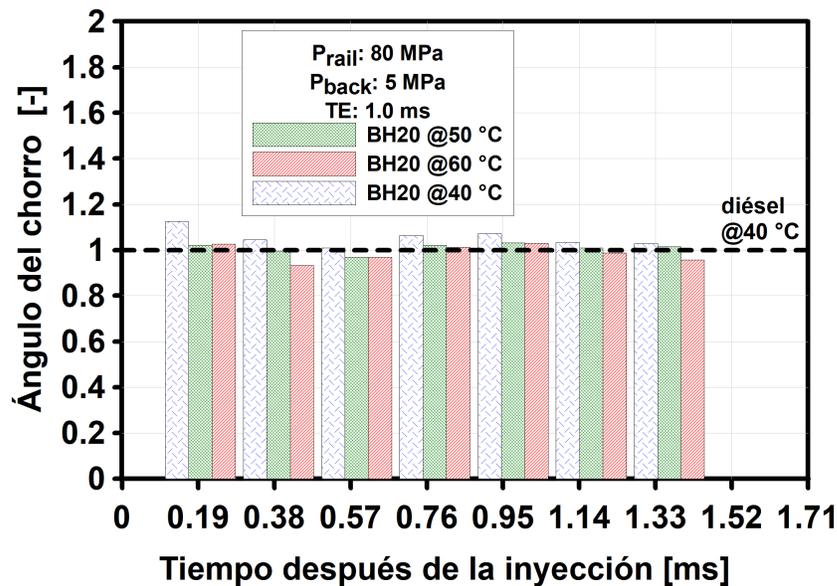


Figura 5.19: Ángulo del chorro normalizado de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.

Los valores normalizados para la mezcla BH20, empleando una temperatura de 40 °C, son de 1.12, 1.04, 1.01, 1.06, 1.07, para los aSOI de 0.19 ms, 0.38 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, y 0.97 ms, respectivamente, mientras que para los aSOI de 1.17 ms, y 1.13 ms, el valor normalizado del ángulo es de 1.03. Por tanto, existe una variación promedio de aproximadamente 5%, con respecto al diésel.

Mientras que, al emplear la temperatura de 50 °C, los valores del ángulo con respecto al diésel son de 1.02 para los aSOI de 0.19 ms, y 0.78 ms. Para los aSOI de 0.39 ms, y 1.17 ms, es de 1.0, y para los aSOI de 0.58 ms, 0.97 ms, y 1.36 ms, los

valores normalizados son de 0.97, 1.03, 1.01, respectivamente. Donde el ángulo del chorro con respecto al diésel presenta una diferencia de menos del 1 %.

Por último, emplear la temperatura de 60 °C, produce una diferencia de menos del 2 %, donde los valores normalizados del ángulo del chorro son de 1.03 para los aSOI de 0.19 ms, y 0.97 ms, mientras que son de 0.93, 0.97, 1.01, 0.99, y 0.96, para los aSOI de 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente.

En la Figura 5.20, se presenta el área del chorro de la mezcla BH20 normalizada con respecto al diésel, y empleando diferentes temperaturas. Los valores normalizados del área del chorro para la mezcla BH20, empleando una temperatura de 40 °C, son de 2.34, 1.60, 1.39, 1.29, 1.22, 1.19, y 1.16, para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Entonces, la diferencia con el diésel es de aproximadamente 45 % en promedio empleando la temperatura de 40 °C.

Al emplear la temperatura de 50 °C el área del chorro normalizada es de 1.78, 1.35, 1.23, 1.17, 1.13, 1.11, y 1.10, para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Por tanto, existe una diferencia de aproximadamente 27 %. Mientras que, empleando la temperatura de 60 °C, la diferencia del área del chorro, con respecto al diésel, es en promedio de 6 %, donde los valores normalizados del área del chorro son de 1.21, y 1.06 para los aSOI de 0.19 ms, y 0.39 ms, respectivamente. Mientras que es de 1.04 para los aSOI de 0.58 ms, y 0.78 ms, y de 1.03 para los aSOI restantes.

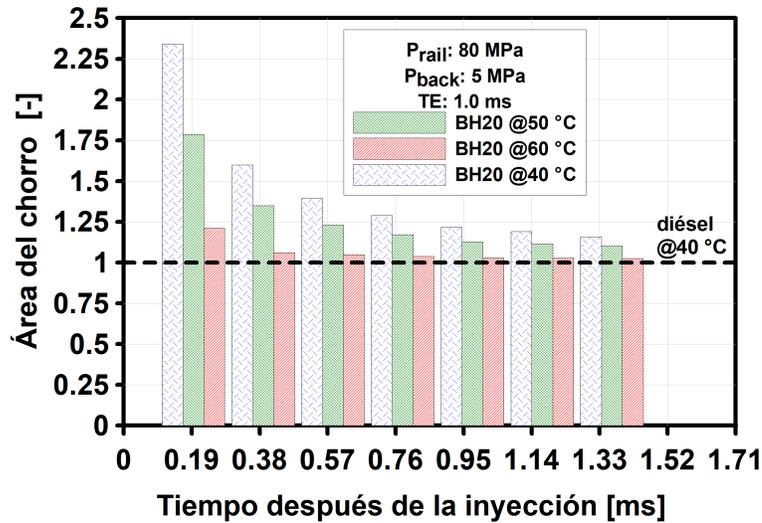


Figura 5.20: Área del chorro normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.

5.3.2 NIVEL DE PRESIÓN DE 100 MPa

En la Figura 5.21, se muestra la comparación de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C, con los del diésel a 40 °C, empleando una P_{rail} de 100 MPa, una P_{back} de 5 MPa, y un TE de 1.0 ms. Se observa que en los tres parámetros la mezcla BH20, se comporta similar al diésel a 40 °C, cuando tiene una temperatura de 60 °C, específicamente la penetración, y el área del chorro. Sin embargo, para el ángulo del chorro son las temperaturas de 40 °C y 50 °C, son las que tienen un comportamiento más similar al diésel.

Para realizar un mejor análisis comparativo de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20, empleando diferentes temperaturas, con los obtenidos para el diésel a 40 °C, se realizó la misma normalización que para el nivel de P_{rail} de 80 MPa, a los isotiempos mostrados con líneas verticales discontinuas en los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms.

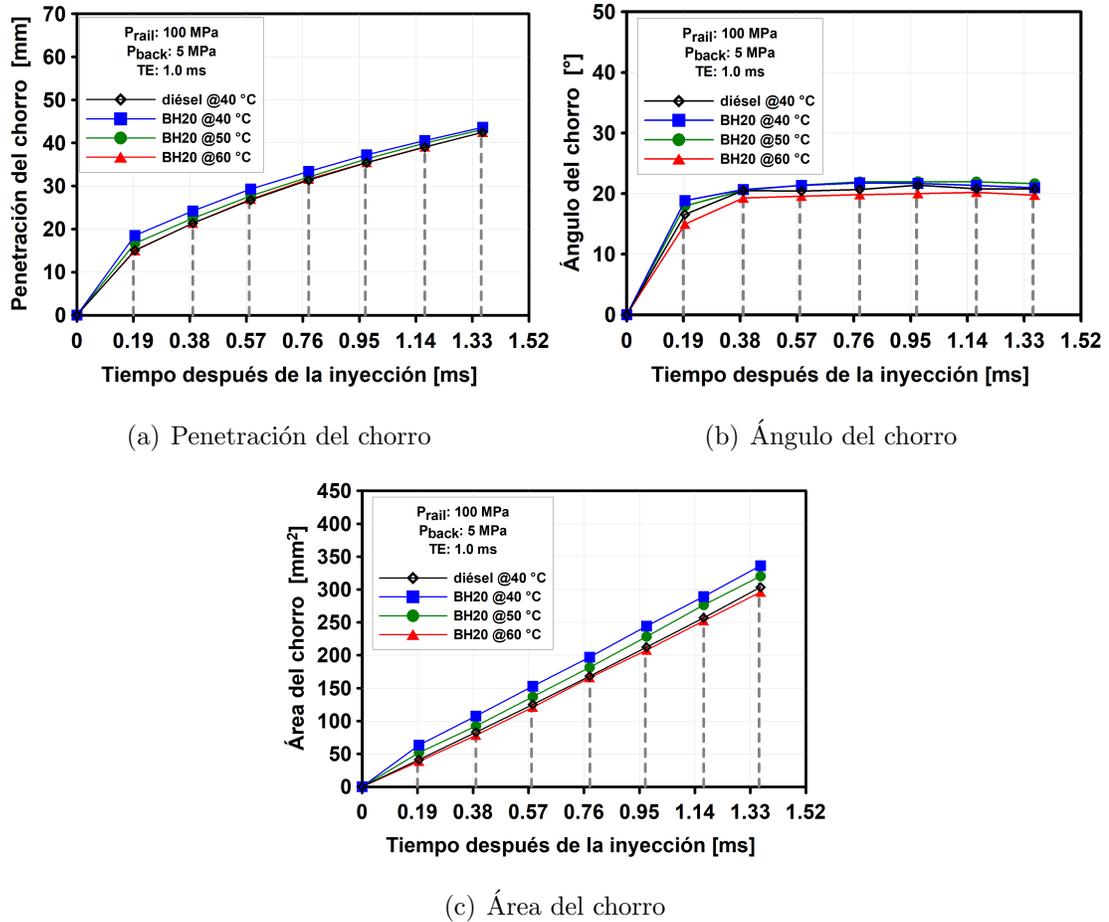


Figura 5.21: Comparación de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para el diésel, y la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C. a) Penetración, b) Ángulo, c) Área del chorro.

En la Figura 5.22, se muestra la penetración normalizada de las mezcla BH20, con respecto a la del diésel a 40 °C, empleando tres diferentes temperaturas. Se observa que, la penetración normalizada de la mezcla BH20, empleando una temperatura de 40 °C, es de 1.23, 1.13, 1.09, 1.06, 1.05, 1.04, y 1.03, para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Por lo tanto, la diferencia con el diésel es de aproximadamente 9% en promedio.

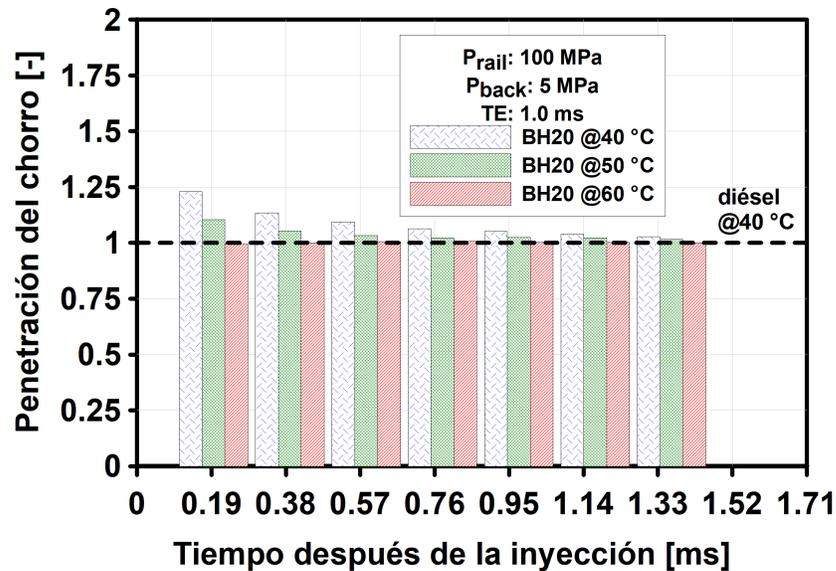


Figura 5.22: Penetración normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.

Al emplear la temperatura de 50 °C la penetración del chorro normalizada es de 1.13, 1.07, 1.05, 1.04, 1.04, 1.03, y 1.02, para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Entonces, la diferencia con el diésel es de aproximadamente 4 %. Mientras que, para la temperatura de 60 °C, la penetración del chorro normalizada es de 0.99 para el aSOI de 0.19 ms, y de 1.0, para los aSOI de 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms y 1.36 ms, por lo cual a esta temperatura la mezcla BH20 tiene una diferencia con el diésel a 40 °C de menos del 1 %.

En la Figura 5.23, se muestra el ángulo del chorro normalizado de la mezcla BH20 empleando tres niveles de temperaturas. Se observa que al emplear la temperatura de 40 °C, y 50 °C, el ángulo del chorro normalizado es similar, teniendo diferencias con el diésel de aproximadamente 4 %. Mientras que, al emplear 60 °C la diferencia con el diésel a 40 °C es de aproximadamente 5 %. Los valores del ángulo normalizado para la mezcla BH20 empleando 40 °C son de 1.14, 1.0, 1.04, 1.05, 1.01, y 1.02 para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.98 ms, y 1.17 ms, respectivamente.

Para la temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ el valor normalizado del ángulo del chorro es de 1.08, 1.0, 1.05, 1.06, 1.03, y 1.04, para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Mientras que, para la temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ son de 0.90 en el aSOI de 0.19 ms, 0.94 para los aSOI de 0.39 ms, y 0.97 ms. Mientras que, es de 0.96 para los aSOI restantes, 0.58 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms.

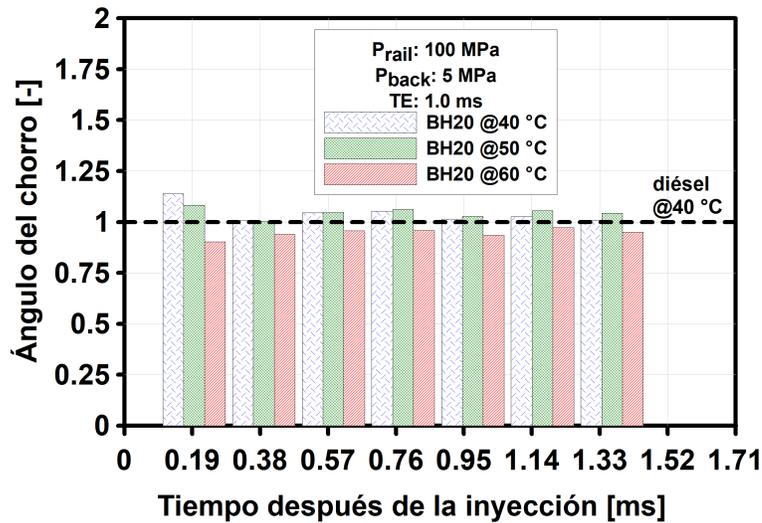


Figura 5.23: Ángulo del chorro normalizado de la mezcla BH20 a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

En la Figura 5.24, se muestra las áreas del chorro normalizadas de la mezcla BH20 empleando temperaturas de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. Se observa que los valores normalizados para la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ son de 1.53, 1.30, 1.22, 1.17, 1.15, 1.12, y 1.11, para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.98 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Lo cual provoca una diferencia promedio, con respecto al diésel, de aproximadamente un 23 %.

Al emplear la temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, el valor del área del chorro normalizada para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.98 ms, y 1.36 ms, es de 1.25, 1.12, 1.09, 1.08, 1.07, y 1.05, respectivamente, por lo cual la diferencia promedio del área entre el diésel, y la mezcla BH20 a esta temperatura es de aproximadamente 11 %. Mientras que, para la temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ el valor normalizado es de 0.93,

0.94, 0.97, y 0.99, para los aSOI de 0.19 ms, 0.38 ms, 0.58 ms, y 0.78 ms, respectivamente, y para los aSOI restantes de 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, el valor es de 0.98. Por tanto, la diferencia entre el diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y la mezcla BH20 a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ es en promedio de 3.4%.

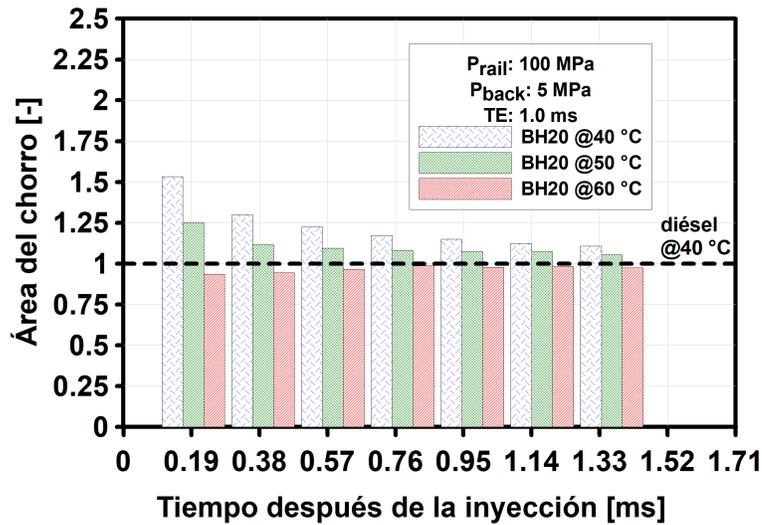


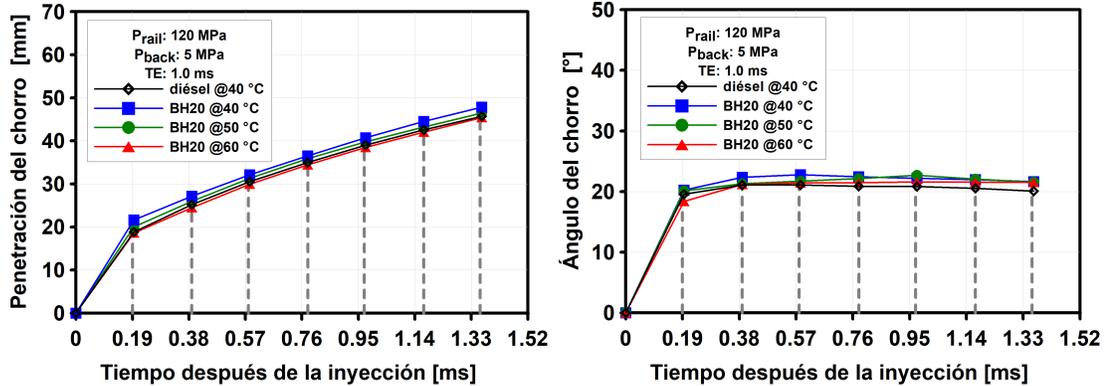
Figura 5.24: Área del chorro normalizada de la mezcla BH20 a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

5.3.3 NIVEL DE PRESIÓN DE 120 MPa

En la Figura 5.25, se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para la mezcla BH20 empleando tres diferentes temperaturas, y para el diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. A partir de esta figura se observa que, la penetración, ángulo y área del chorro de la mezcla BH20 a una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ son similares a los del diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, el ángulo del chorro de la mezcla BH20 es similar sin importar el nivel de temperatura empleado, tal como se observa en la Figura 5.25(b).

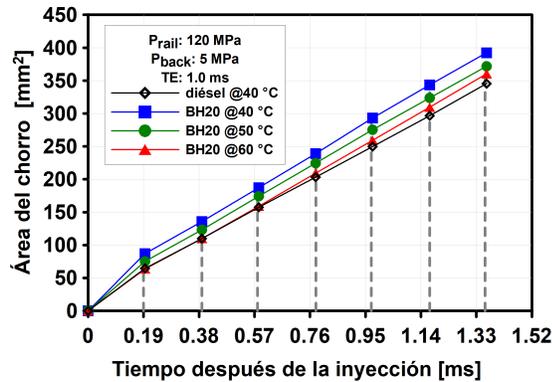
De igual manera que para el nivel de presión de 80 MPa, se normalizaron los valores de los parámetros macroscópicos del chorro para la mezcla BH20, empleando diferentes temperaturas, con respecto a los obtenidos para el diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$. Dicha

normalización se realizó para los isotiempos mostrados con líneas verticales discontinuas mostrados en las Figuras 5.25(a), 5.25(b), y 5.25(c), a los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms.



(a) Penetración del chorro

(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura 5.25: Comparación de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para el diésel, y la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C. a) Penetración, b) Ángulo, c) Área del chorro.

En la Figura 5.25(a), se muestra la penetración del chorro normalizada de las mezclas BH20, empleando 40 °C, 50 °C, y 60 °C. Donde los valores normalizados de la penetración de la mezcla BH20, empleando la temperatura de 40 °C, son de 1.15, y 1.08 para los aSOI de 0.19 ms, y 0.39 ms, respectivamente. Mientras que, es de 1.05 para los aSOI de 0.58 ms, 1.17, y 1.36 ms, y para los aSOI de 0.78 ms, y 0.97

ms los valores normalizados de la penetración son de 1.04. Por lo tanto, la diferencia entre este nivel de temperatura y el diésel es de aproximadamente 7% en promedio, para los diferentes tiempos estudiados.

Al emplear la temperatura de 50 °C la penetración normalizada es de 1.06, y 1.03 para los aSOI de 0.19 ms, y 0.39 ms, respectivamente, mientras que es de 1.02 para los aSOI restantes. Por tanto, existe una diferencia de aproximadamente 3% con respecto al diésel a 40 °C. Mientras que, empleando la temperatura de 60 °C se obtiene una diferencia de la penetración de menos del 2% con respecto al diésel. Donde los valores de la penetración normalizada son de 0.99 para los aSOI de 0.19 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, mientras que, para los aSOI de 0.39 ms, y 0.58 ms, la penetración normalizada es de 0.97, y 0.98, respectivamente.

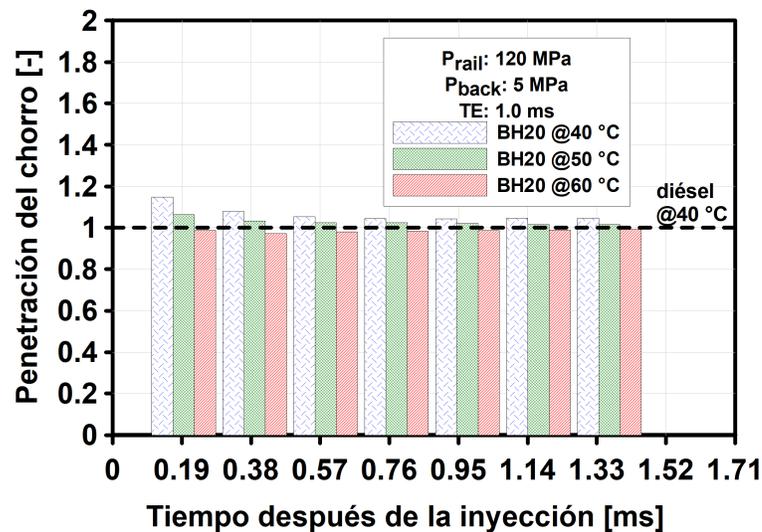


Figura 5.26: Penetración normalizada de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.

En la Figura 5.27, se muestra la comparación de los valores del ángulo del chorro normalizados, de la mezcla BH20 empleando diferentes niveles de temperatura. Observando que, aunque el ángulo del chorro es muy similar sin importar el nivel de temperatura, existe una variación, del ángulo de la mezcla BH20 con respecto al diésel, del 7%, 5%, y 2%, para las temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C, respectivamente. Donde para la temperatura de 40 °C el valor normalizado del ángulo del

chorro es 1.03, y 1.06 para los aSOI de 0.19 ms, y 0.39 ms, mientras que es de 1.08 para los aSOI de 0.58 ms, 0.78 ms, y 1.36 ms.

Empleando la temperatura de 50 °C, el ángulo del chorro normalizado es de 1.02, 1.01, 1.03, 1.06, 1.09, 1.08, y 1.07, para los aSOI de 0.19 ms, 0.38 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Mientras que, emplear la temperatura de 60 °C produce valores del ángulo normalizado de 0.94, 1.0, 1.02, 1.03, 1.04, 1.05, y 1.07, para los mismos aSOI mencionados para la temperatura de 50 °C.

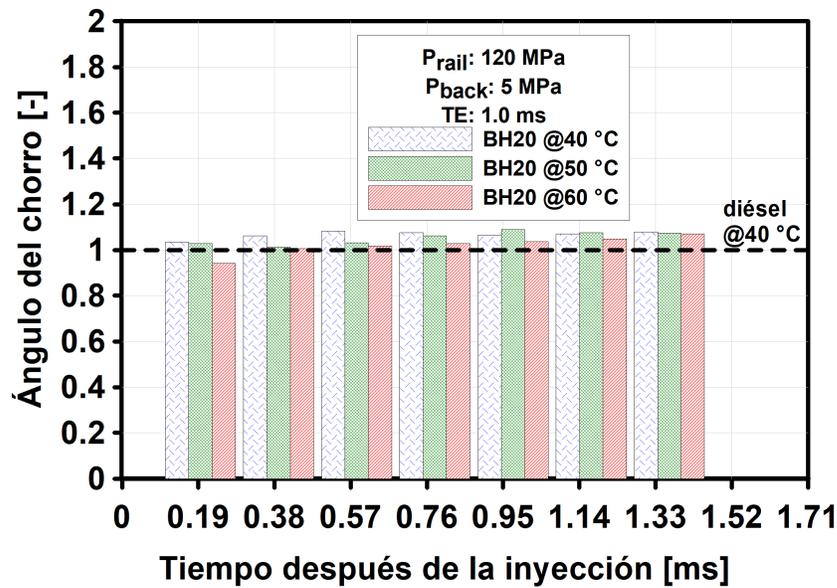


Figura 5.27: Ángulo del chorro normalizado de la mezcla BH20 a 40 °C, 50 °C, y 60 °C.

En la Figura 5.28, se muestra el área del chorro normalizada para la mezcla BH20, empleando temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C, con respecto a los valores del diésel a 40 °C. Donde para la temperatura de 40 °C los valores normalizados del área del chorro son de 1.35, 1.24, 1.19, 1.18, 1.17, 1.16, y 1.14, para los aSOI de 0.19 ms, 0.38 ms, 0.58 ms, 0.78 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente. Por tanto, la diferencia del área del chorro entre esta temperatura y el diésel a 40 °C es de aproximadamente 20%.

Al emplear la temperatura de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ el valor normalizado del área del chorro es de 1.17, 1.12, 1.10, 1.09, y 1.08 para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.97 ms, 1.17 ms, y 1.36 ms, respectivamente, y para los aSOI de 0.58 ms, y 0.78 ms el valor normalizado es de 1.11, por tanto la diferencia del área del chorro entre el diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, y la mezcla BH20 empleando $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ es de aproximadamente 11%. Mientras que, para la temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ la diferencia de la mezcla BH20 con el diésel es de aproximadamente 2% en todos los tiempos estudiados. Donde los valores normalizados del área son de 0.99, 1.0, 1.01, y 1.03, para los aSOI de 0.19 ms, 0.39 ms, 0.58 ms, y 0.78 ms, respectivamente, y para los aSOI restantes el valor normalizado es de 1.04.

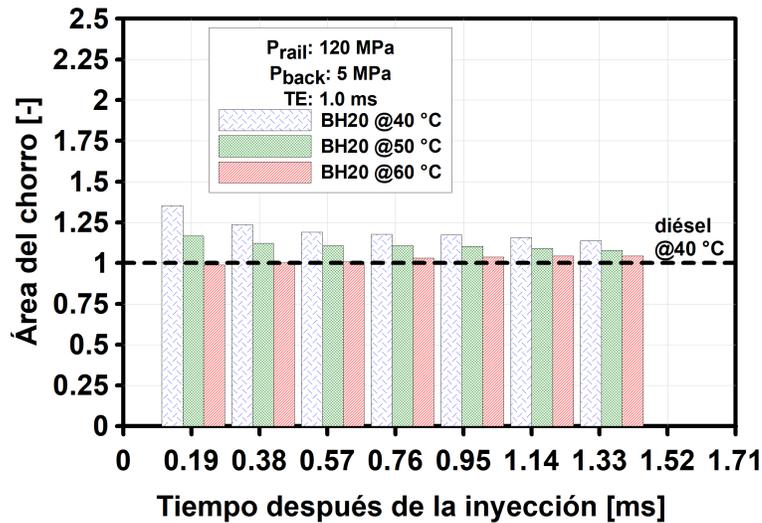


Figura 5.28: Área del chorro normalizada de la mezcla BH20 a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En este capítulo se presentan dos secciones, la primera enfocada en las conclusiones obtenidas a partir del análisis de los resultados mostrados en el Capítulo “Efecto de la temperatura del combustible en el proceso de mezcla”. Mientras que, en la segunda sección se propondrán trabajos que continúen con lo realizado en esta investigación.

6.1 CONCLUSIONES

Mezclar diésel con biodiésel de higuera es una buena alternativa como combustible en los motores Diesel, debido a que la materia prima de donde se obtiene el biodiésel tiene muchas ventajas sobre otras, tales como, la toxicidad de su fruto para el consumo humano, por lo cual sólo es empleado en la fabricación de productos, la resistencia a las crisis hídricas, y fácil producción de biodiésel. No obstante una de las principales desventajas es su alta viscosidad, densidad, y tensión superficial con respecto a las presentadas por el diésel, sin embargo, estas propiedades se pueden reducir, y con ello hacer más atractivo su uso en los motores, aumentando la temperatura del combustible antes de inyectarlo en el interior de la cámara de combustión.

Por lo expuesto previamente, se realizó la correcta modificación, y puesta a punto de un sistema de inyección diésel tipo *common-rail*, donde se puede variar la temperatura del combustible antes de la bomba de alta presión, y por lo tanto, en el interior del rail de combustible, y del inyector diésel, y con la cual se estudió el efecto de la temperatura de la mezcla BH20, sobre los parámetros macroscópicos del chorro, específicamente la penetración, el ángulo, y el área del chorro. A continuación se presentan las principales conclusiones obtenidas en esta investigación.

- La densidad de la mezcla BH20 disminuye de manera lineal con el incremento de la temperatura de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, existiendo una diferencia del 3% entre el valor del diésel, y la mezcla BH20 a una temperatura de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- La viscosidad cinemática de la mezcla BH20 disminuye de manera exponencial con el incremento de la temperatura de $15\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $75\text{ }^{\circ}\text{C}$, siendo la temperatura de $55\text{ }^{\circ}\text{C}$, donde la mezcla BH20 tiene la misma viscosidad que el diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- Para un nivel de P_{rail} entre 80 MPa y 120 MPa, una P_{back} de 5 MPa, tempera-

turas entre $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla BH20, tales como la penetración, el ángulo, y el área, no se ven afectados por el tiempo de energización del inyector.

- Al aumentar el nivel de P_{rail} de 80 MPa a 120 MPa, se incrementa la penetración del chorro en un 23 % en promedio, debido al aumento de la velocidad de atomización. Mientras el ángulo del chorro no se ve influenciado por este parámetro con una diferencia menor a 6 % o de 1° .
- Reducir la viscosidad, densidad y tensión superficial, de la mezcla BH20, ayuda a mejorar el proceso de mezcla en el interior de la cámara de combustión, por lo cual se observa que al incrementar la temperatura de $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$:
 - Se reduce la penetración de la mezcla BH20, donde para un nivel de P_{rail} de 80 MPa la reducción de este parámetro es de aproximadamente 12 %, mientras que para los niveles de P_{rail} de 100 MPa, y 120 MPa, la reducción es de 8 %, y 7.53 %, respectivamente.
 - La temperatura del combustible entre $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ no tiene efecto significativo en el ángulo del chorro, y conforme se aumenta el TE se observa una estabilización del ángulo del chorro alrededor de los 20° , para el nivel de P_{rail} de 80 MPa, y 120 MPa, mientras que para la P_{rail} de 100 MPa, fue de aproximadamente 21° .
 - El área del chorro, al igual que la penetración, presenta una reducción de aproximadamente 24 %, 20 %, y 15 %, para los niveles de P_{rail} de 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa, respectivamente.
- La mejora de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 empleando la temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, provoca que la penetración del chorro sea un 98 % similar a la del diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$ una P_{rail} de 80 MPa, mientras que a 100 MPa, y 120 MPa, la similitud es de aproximadamente 99 %, y 98 %, respectivamente.

- Empleando una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y 80 MPa, y 120 MPa de nivel de P_{rail} , en la mezcla BH20 provoca que el ángulo del chorro sea aproximadamente 98 % similar al del diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que empleando la P_{rail} de 100 MPa, provoca una similitud de 95 % en este parámetro.
- Empleando una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ en la mezcla BH20 provoca que el área del chorro sea aproximadamente 94 %, 96 %, y 98 % similar al del diésel a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$, empleando un nivel de P_{rail} de 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa, respectivamente.
- Un motor Diesel funcionaría con la mezcla BH20 a una temperatura de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, con los mismos parámetros macroscópicos del chorro, es decir con el mismo proceso de mezcla en el interior de la cámara de combustión, y por tanto, se esperaría un rendimiento y emisiones contaminantes similares o mejores a las del diésel mineral.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

En la presente tesis se investigó el efecto de la temperatura del combustible sobre los parámetros macroscópicos del chorro empleando una estrategia de inyección simple. Para la continuidad y complemento de este trabajo se presentan las siguientes líneas de investigación:

- Emplear las estrategias de inyección múltiple más comunes en los vehículos Diesel, tales como, inyección dividida, piloto, y post, con el fin de determinar si se obtienen las mismas tendencias que para la estrategia de inyección simple.
- Estudiar el efecto de la temperatura del combustible sobre los parámetros macroscópicos del chorro, empleando niveles de presión de inyección de hasta 180 MPa, para determinar si con el aumento de la presión de inyección se necesitara la misma temperatura o será diferente.
- Modificar la instalación experimental con otra configuración o dispositivo para variar la temperatura del combustible antes de la inyección en el interior de la cámara de combustión, que permita un mejor control de la temperatura empleando elevados niveles de presión de inyección.
- Realizar el mismo estudio para otras relaciones de mezclas diésel-BH, con el fin de determinar el nivel de temperatura para mezclas con mayor de proporción de biodiésel.
- Realizar un estudio empleando la mezcla BH20 a una temperatura de 60 °C, en un vehículo Diesel comercial, y en uso cotidiano para verificar el rendimiento del motor, y las emisiones de gases contaminantes.

APÉNDICE A

INSTALACIÓN DE LOS INTERCAMBIADORES DE CALOR

Para el control de la temperatura se instaló un arreglo de dos enfriadores de aceite de transmisión empleados en un vehículo comercial Diesel. Se colocaron después del retorno del rail, debido a que en las pruebas realizadas se encontró que la temperatura en el retorno aumentaba a más de $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en consecuencia, la temperatura del tanque aumentaba rápidamente, provocando un nulo control de la temperatura del combustible antes del inyector.

La instalación de estos enfriadores se llevo a cabo en una placa con espesor de $1/8$ de pulgada, realizando los orificios, tanto de entrada y salida de combustible, como de sujeción a la placa. Una vez realizados los orificios se soldó un tubo de $1/4$ de pulgada a los orificios de entrada y salida de combustible, en la Figura A.1, se muestra la placa empleada para la instalación de los enfriadores, la cual se encuentra perforada para la sujeción de los mismos, así como las entradas y salidas de combustible.



Figura A.1: Placa para instalación de los enfriadores.

Para evitar fugas de combustible entre el enfriador y la placa se colocaron empaques tipo O-ring en cada perforación de entrada y salida de combustible, y se colocaron los tornillos de sujeción evitando que se desplazara el O-ring. En la Figura A.2, se muestra el enfriador de aceite empleado, y el montaje realizado en la instalación experimental.



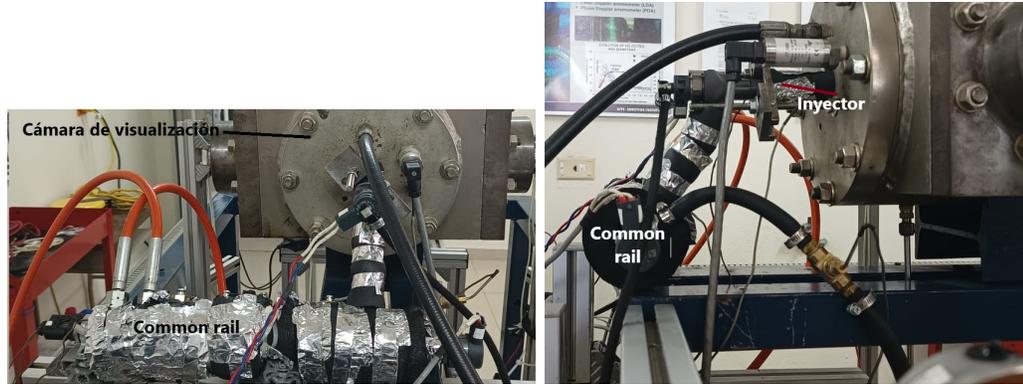
(a) Enfriador de aceite empleado



(b) Montaje en la instalación experimental

Figura A.2: Enfriador de combustible empleado. a) Enfriador, b) Montaje en la instalación experimental.

Para evitar la pérdida de calor en el rail, el inyector, y la conexión del mismo, se aisló con poliuretano. En la Figura A.3, y A.4, se muestra el rail aislado, y la modificación del programa de monitorización de la maqueta de visualización.



(a) Rail de combustible.

(b) Inyector diésel tipo solenoide

Figura A.3: Instalación de fibra de vidrio en el sistema de inyección.

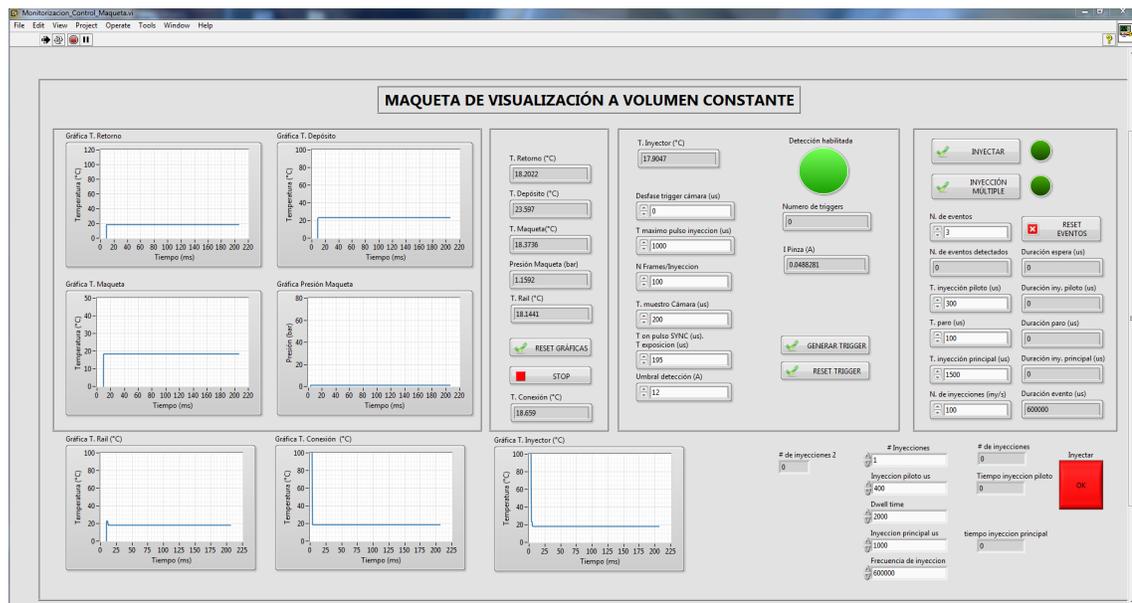


Figura A.4: Programa de Visualización modificado.

APÉNDICE B

PRUEBAS DE LA INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

Se realizaron diferentes pruebas a la instalación experimental para la puesta a punto, tales pruebas son la revisión de la cámara de visualización a volumen constante, así como pruebas de temperaturas del sistema de inyección. A continuación se detallan cada una de las pruebas y los resultados encontrados.

B.1 REVISIÓN DE LA CÁMARA DE VISUALIZACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

- Revisar los accesos ópticos de la cámara de visualización a volumen constante, debido a que cuentan con un O-ring que sirve de sello entre el Zafiro y el metal de la cámara, el cual si esta dañado presentara fugas de nitrógeno.
- Revisar la tapa frontal de la cámara de visualización para conocer su estado, debido a que este facilita o dificulta el procesado de imágenes del chorro de combustible. En caso de estar en mal estado se deberá retirar la tapa, y proceder a realizar un lijado de la tapa, y un pintado con una base gris, y luego con pintura verde la cual ayuda en el procesado.

- Comprobar el torque de los accesos ópticos, el cual debe ser de $20 N \cdot m$, para evitar fugas.
- Comprobar el funcionamiento del sensor de temperatura, y de presión instalados en la tapa frontal. Así mismo, la tarjeta electrónica empleada para el sensor de presión debe tener una alimentación entre 8 V, y 32 V, para que funcione adecuadamente el sensor de presión.
- Revisar la manguera de alimentación de nitrógeno.
- Revisar las sujeción del inyector, y comprobar que éste se encuentre con el torque adecuado, debido a que con la presión de inyección empleada, se puede dañar tanto el inyector como las cuerdas de los tornillos de sujeción.

Después de realizar los pasos descritos anteriormente, se realizó el pintado de la tapa frontal, los cuales se muestran en las Figuras B.1- B.3.



Figura B.1: Tapa frontal de cámara a volumen constante encontrada después de la revisión.

El proceso de pintado se realizó primero retirando toda la pintura anterior, después se realizó un lijado con lijas del número 80, 120, y 600, hasta dejar una superficie lo más alisada posible. Posteriormente, se procedió a aplicar una base con gris primario, aplicando 3 veces, y entre cada aplicación se dejó secar una hora. Después, de la última aplicación de la base, se dejó secar durante un día completo, y se aplicó la pintura verde la cual se realizó en al menos tres capas, las cuales se dejaron secar por aproximadamente 30 minutos entre cada una.

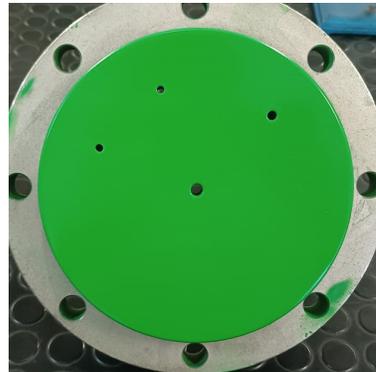


Figura B.2: Tapa frontal de la cámara a volumen constante lijada y preparada para el proceso de pintado.

Por último, después de esperar un día de secado de la pintura color verde, se aplicó un esmalte transparente para proteger la pintura, y evitar daños de manera rápida. En la Figura B.3(c), se muestra la tapa frontal de la cámara a volumen constante después del proceso de pintado, lista para volver a ser instalada en la cámara a volumen constante.



(a) Tapa frontal pintada con la base de gris primario (b) Tapa frontal pintada de color verde



(c) Tapa frontal lista para su instalación

Figura B.3: Tapa frontal en diferentes etapas del proceso de pintado. a) Pintada con la base gris, b) Pintada de verde, c) Lista para su instalación

Una vez terminado el proceso de pintado se procedió a instalar la tapa frontal de la cámara de visualización a volumen constante además, se realizó una alineación, y enfoque de la cámara de alta velocidad. Por último, se obtuvieron imágenes de dicha tapa con la cámara de alta velocidad, para realizar una comparación del antes y después. En las Figuras B.4(a), y B.4(b), se muestran las imágenes obtenidas antes y después del proceso de pintado. Se observa que, existe una mejora al tomar las imágenes del fondo debido a que, se presenta una uniformidad en el color, así como también la eliminación de los daños de la tapa frontal.

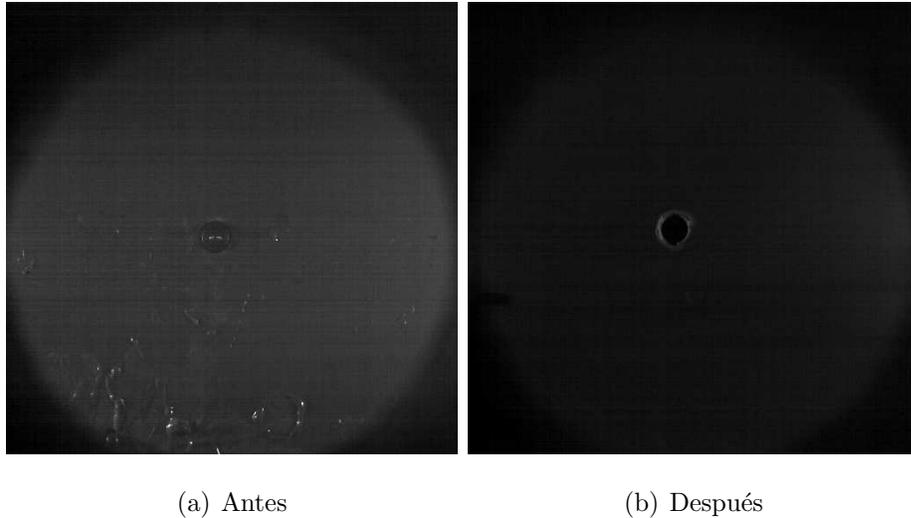


Figura B.4: Imágenes obtenidas de la tapa de la cámara de visualización a volumen constante.

B.2 PRUEBAS DEL SISTEMA DE INYECCIÓN TIPO *common-rail*

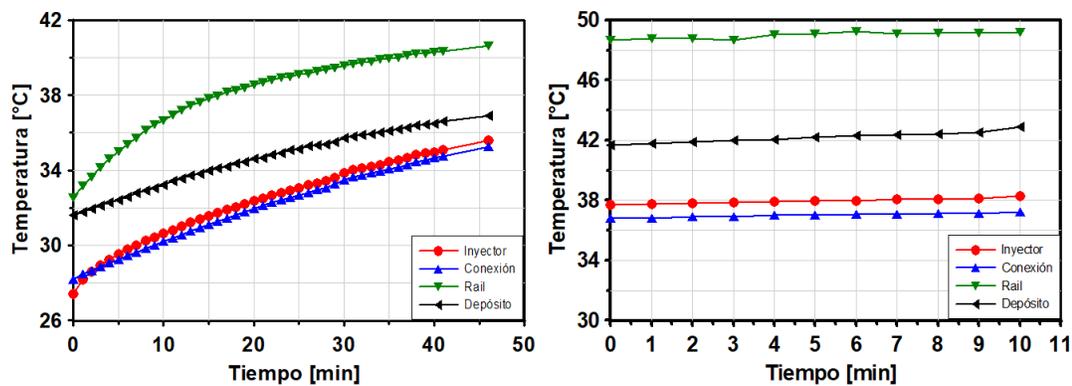
La revisión de este sistema se basa en encontrar fugas de combustible cuando se enciende la bomba de alta presión, así como de que el control del nivel de P_{rail} sea el correcto, por lo cual se eleva la presión de combustible, y se compara los valores de la unidad electrónica de control de presión con los obtenidos con un manómetro de alta presión.

Además, se realizaron pruebas del control de la temperatura empleando dos diferentes P_{rail} , con el fin de determinar la temperatura necesaria de los baños térmicos para cumplir con la matriz experimental mostrada en la Sección 4.2.3. En la Figura B.5, se muestran los resultados obtenidos de la temperatura en cuatro diferentes puntos, empleando una P_{rail} de 80 MPa.

La Figura B.5(a), muestra un aumento desde aproximadamente $27\text{ }^{\circ}\text{C}$ debido a

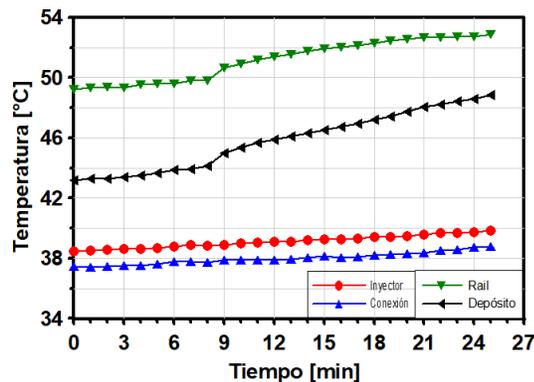
que el sistema se encontraba apagado cuando se inició la prueba. Se puede notar un incremento rápido de la temperatura del rail durante los primeros 20 minutos hasta llegar a los $39\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras que, los siguientes 20 minutos la temperatura varía en $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Sin embargo, la temperatura del depósito, la conexión, y el inyector se mantiene en un aumento constante durante los 45 minutos de prueba.

En la Figura B.5(b), se observa que las temperaturas medidas en los cuatro puntos del sistema de inyección, se mantienen constantes durante 10 minutos, sin embargo, la temperatura del *common-rail* se mantuvo en aproximadamente $49\text{ }^{\circ}\text{C}$.



(a) Baño térmico a $40\text{ }^{\circ}\text{C}$

(b) Baño térmico a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$



(c) Baño térmico a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura B.5: Distribución de la temperatura en cuatro puntos del sistema de inyección diésel *common-rail* empleando una P_{rail} de 80 MPa .

Con respecto a lo mencionado en el párrafo anterior, se aumentó la temperatura

del baño a $60\text{ }^{\circ}\text{C}$, y en la Figura B.5(c), se muestra su evolución, observando que, después de 25 minutos la temperatura más alta obtenida fue de $53\text{ }^{\circ}\text{C}$, momento en el que se aumentó la temperatura de los baños, sin embargo debido a que la presión de la bomba de baja presión era menor a 0.4 MPa , la cual es la presión mínima de entrada para la bomba de alta presión recomendada por el fabricante, se procedió a detener las pruebas.

En la Tabla B.1, se muestran las temperaturas estables alcanzadas en las diferentes pruebas anteriormente mencionadas, y en la Tabla B.2, se observan las temperaturas a dos diferentes P_{rail} , y estableciendo la temperatura de los baños térmicos a $20\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tabla B.1: Datos experimentales de la temperatura del sistema de inyección empleando una P_{rail} de 80 MPa .

Temperatura del baño [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura del rail [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura del depósito [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura del inyector [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura de la conexión [$^{\circ}\text{C}$]
40	41	37	35.60	35
50	49	43	38.50	37.30
60	53	39	38.75	38
70	54	50	40	40
75	55	52	40	40

Tabla B.2: Datos experimentales de la temperatura del sistema de inyección a diferentes P_{rail} , y con $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ en los baños térmicos.

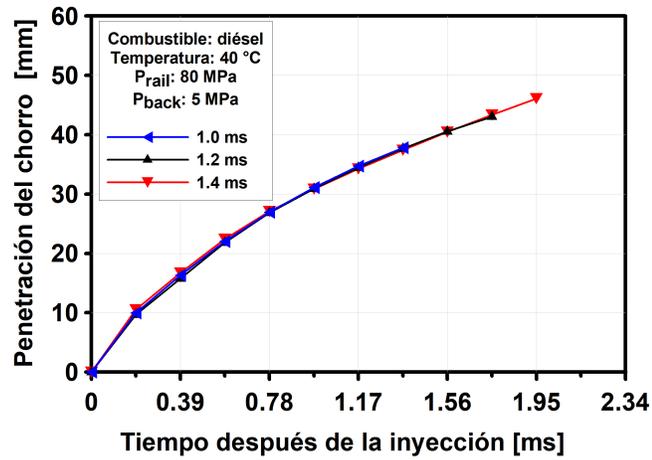
P_{rail} [MPa]	Temperatura del rail [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura del depósito [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura del inyector [$^{\circ}\text{C}$]	Temperatura de la conexión [$^{\circ}\text{C}$]
80	35	26	33	30
120	40	26	45	32

APÉNDICE C

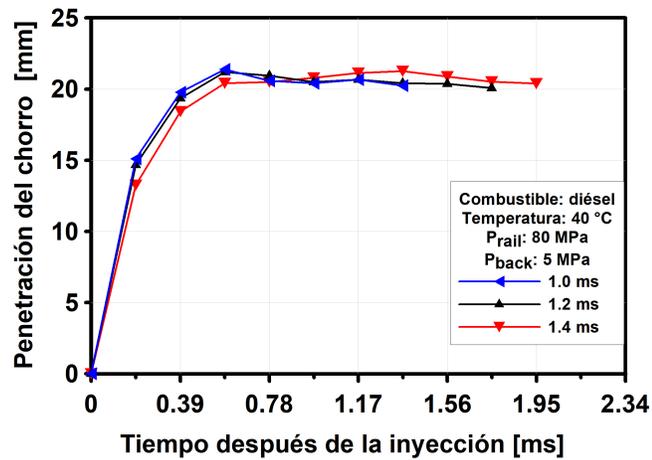
COMPARACIÓN DE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

C.1 VARIACIÓN DEL TIEMPO DE ENERGIZACIÓN

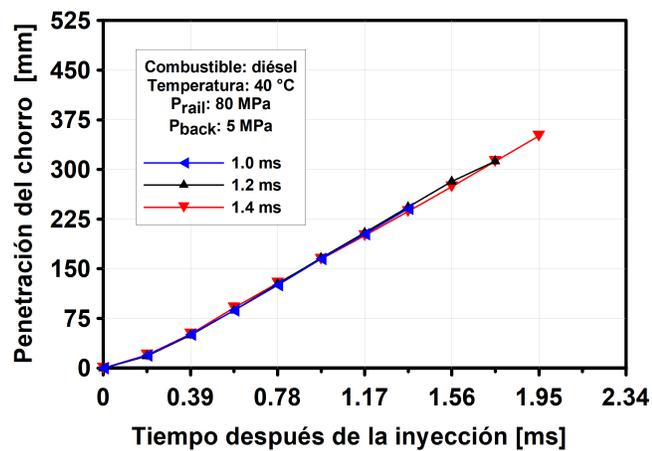
A continuación, se muestra la comparación a diferentes TE de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel, y de la mezcla BH20 empleando P_{rail} de 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa, una P_{back} de 5 MPa, y temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C. En las Figuras C.1 a C.10, se muestran de color azul, negro, y rojo los TE de 1.0 ms, 1.2 ms, y 1.4 ms, respectivamente.



(a) Penetración del chorro

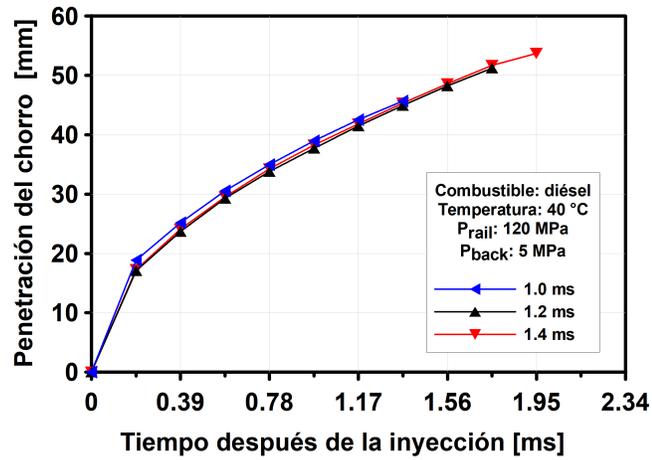


(b) Ángulo del chorro

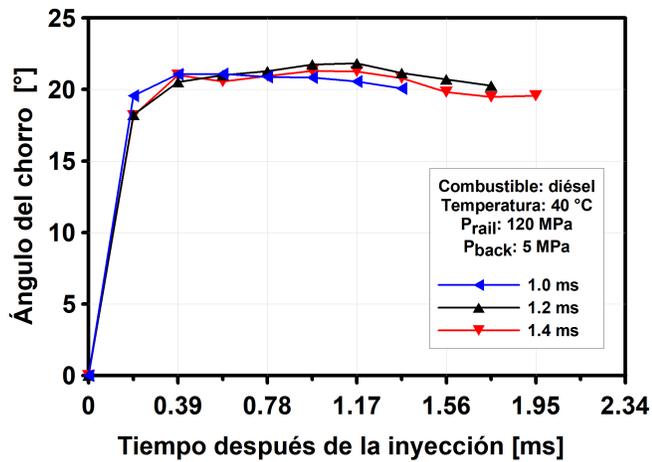


(c) Área del chorro

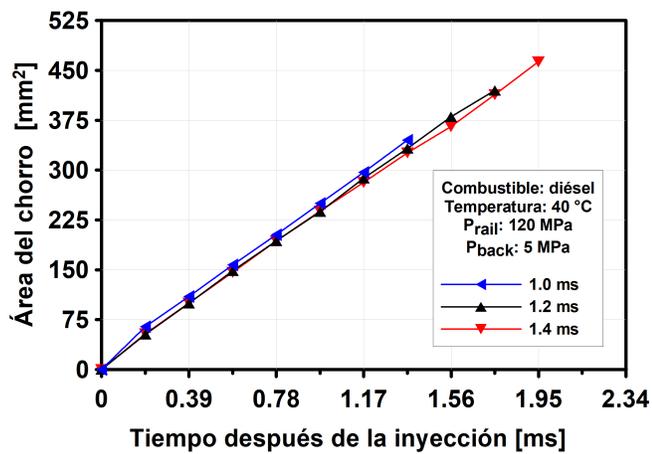
Figura C.1: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel a 80 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro

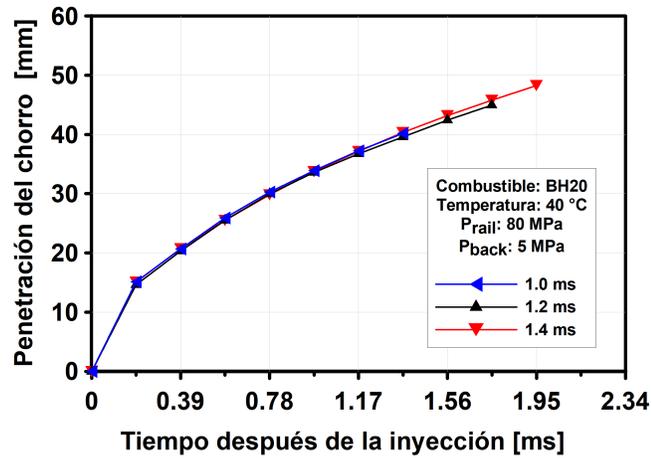


(b) Ángulo del chorro

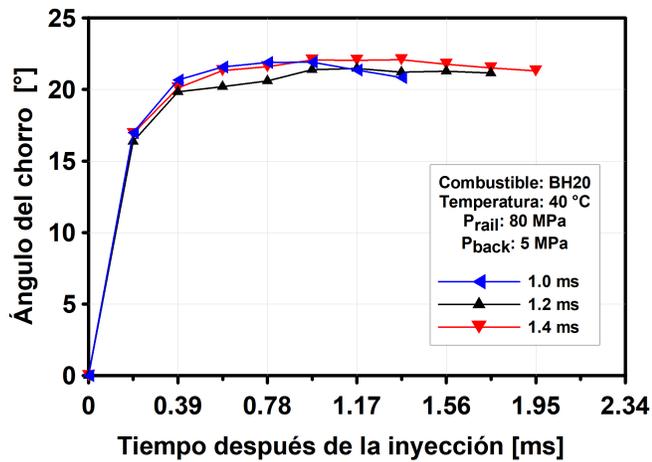


(c) Área del chorro

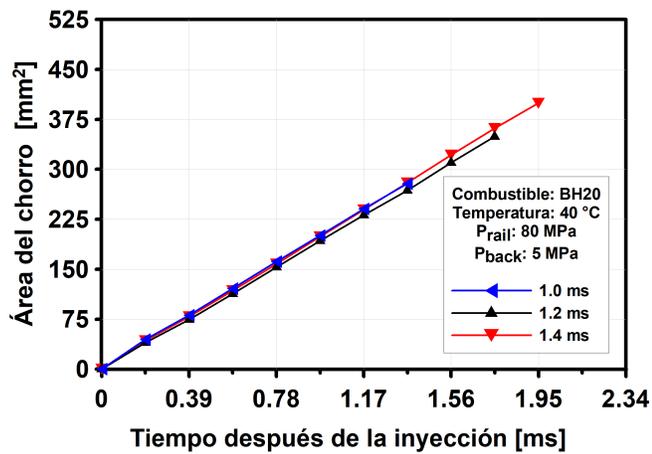
Figura C.2: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel a 120 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro

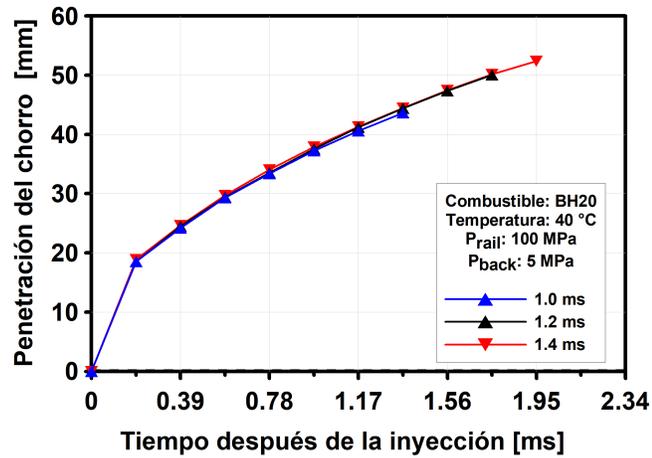


(b) Ángulo del chorro

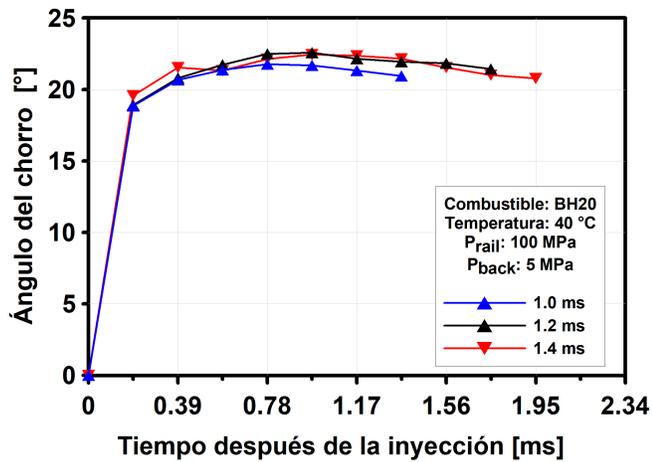


(c) Área del chorro

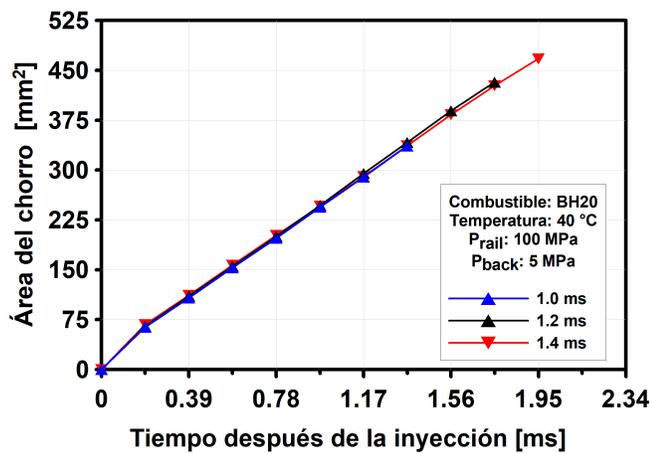
Figura C.3: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 80 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 40 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro

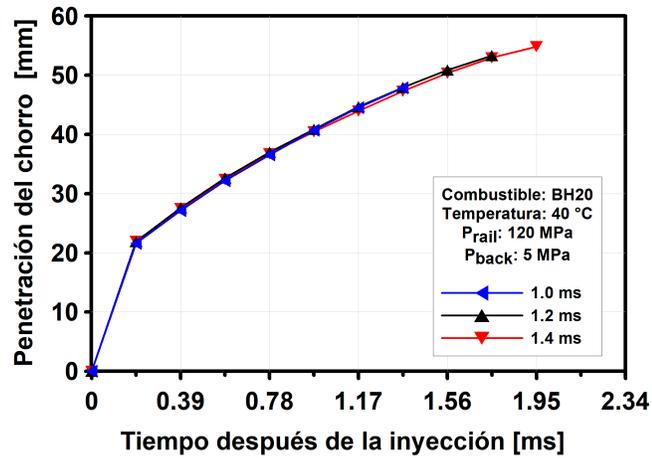


(b) Ángulo del chorro

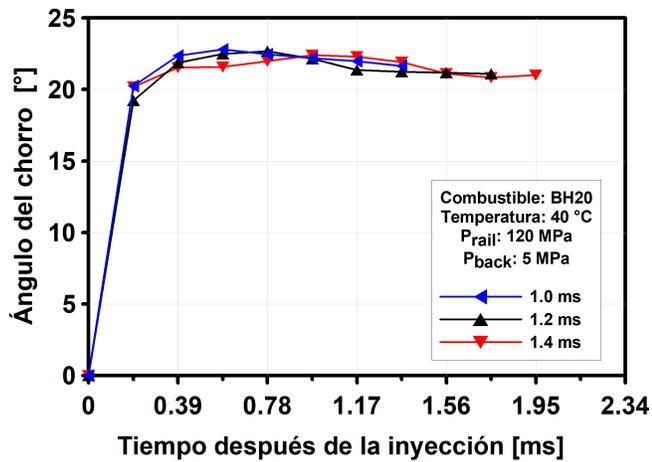


(c) Área del chorro

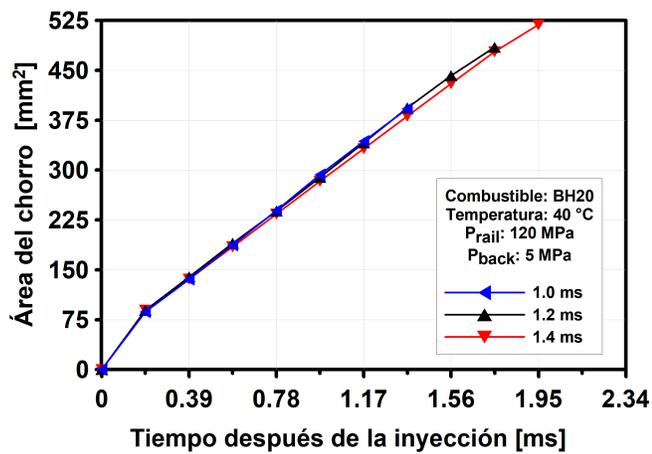
Figura C.4: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 100 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 40 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro

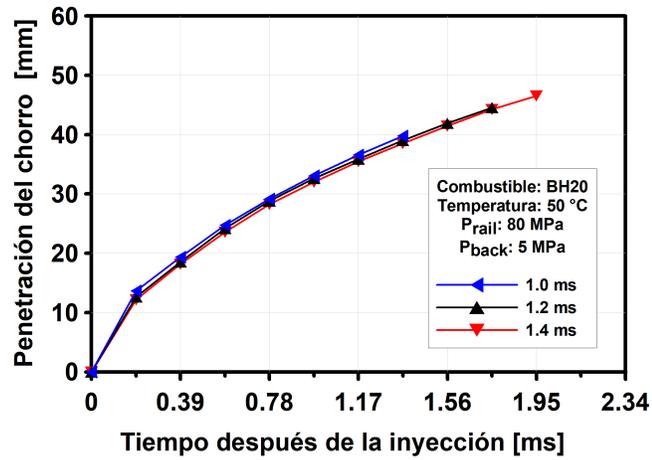


(b) Ángulo del chorro

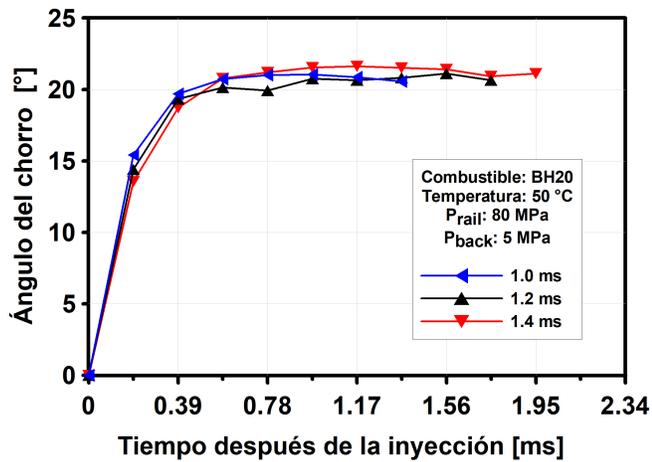


(c) Área del chorro

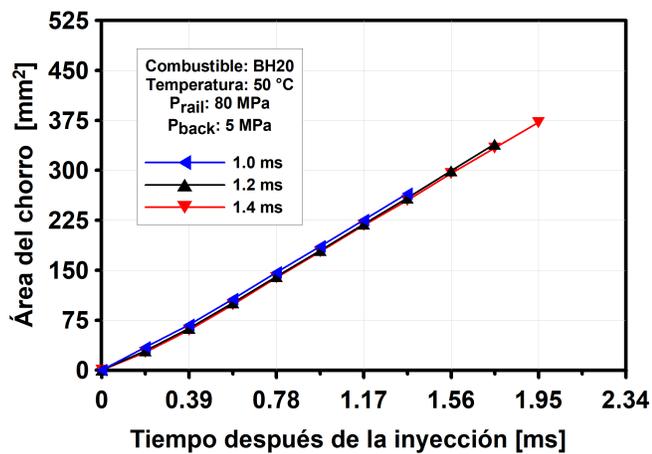
Figura C.5: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 120 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 40 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro

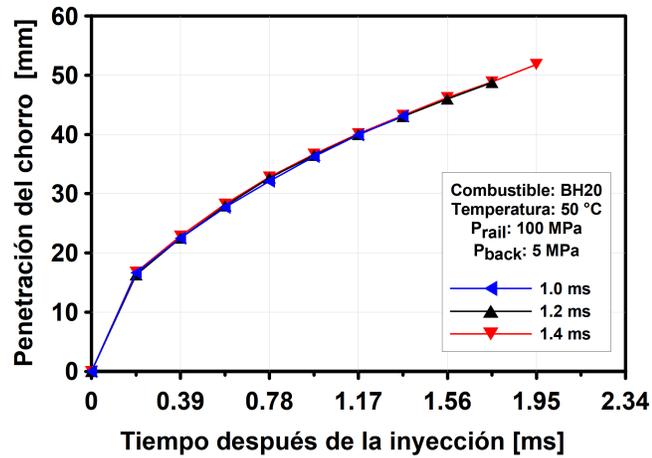


(b) Ángulo del chorro

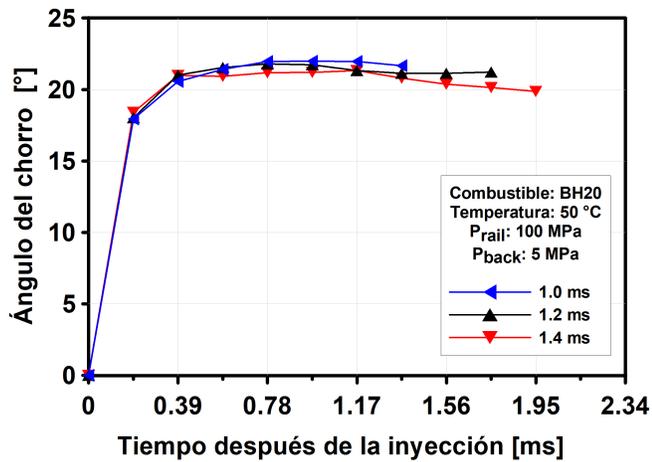


(c) Área del chorro

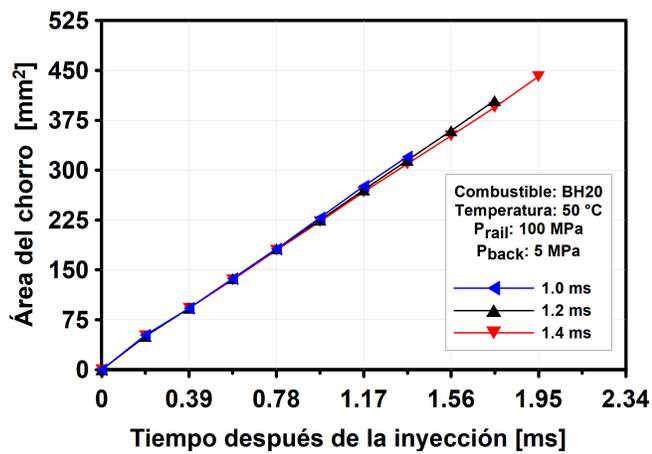
Figura C.6: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 80 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 50 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro

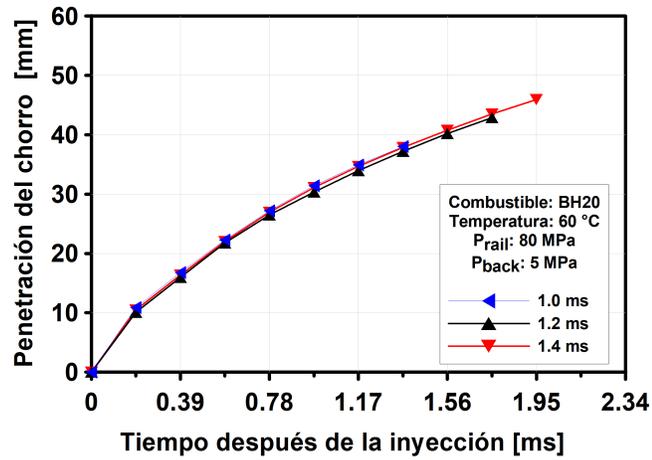


(b) Ángulo del chorro

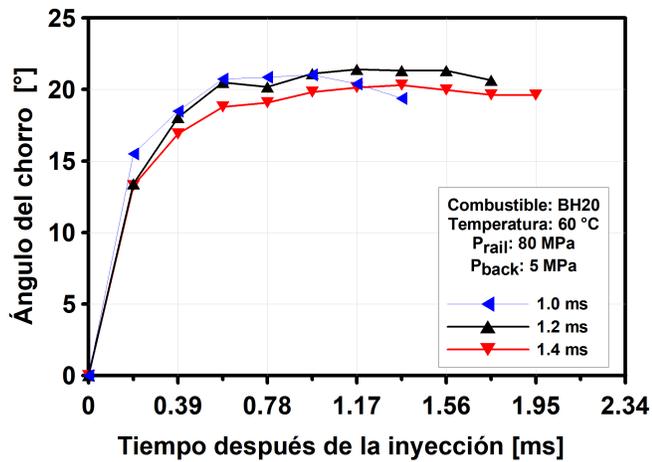


(c) Área del chorro

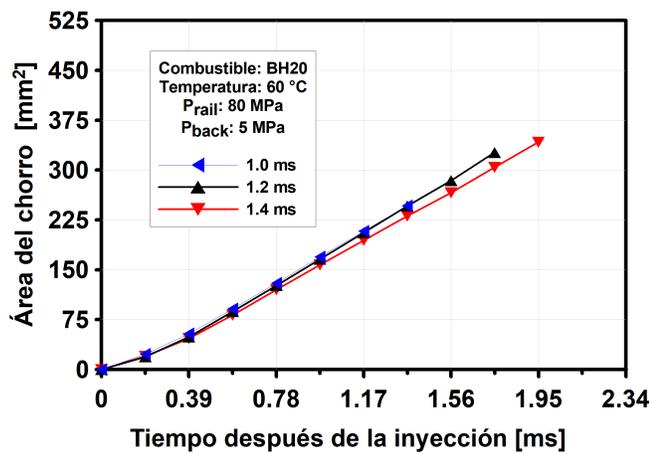
Figura C.7: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 100 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 50 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro

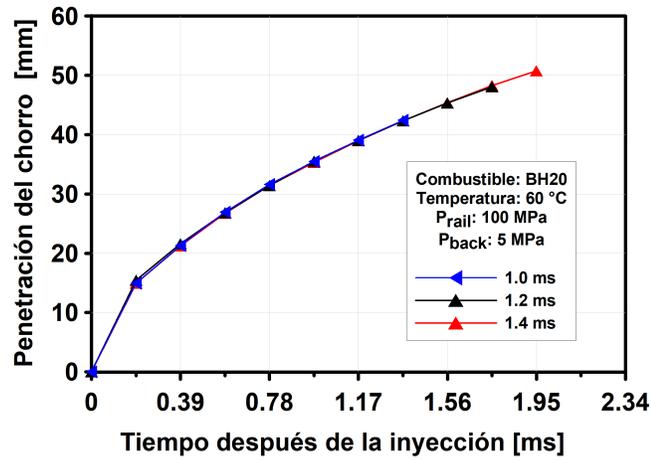


(b) Ángulo del chorro

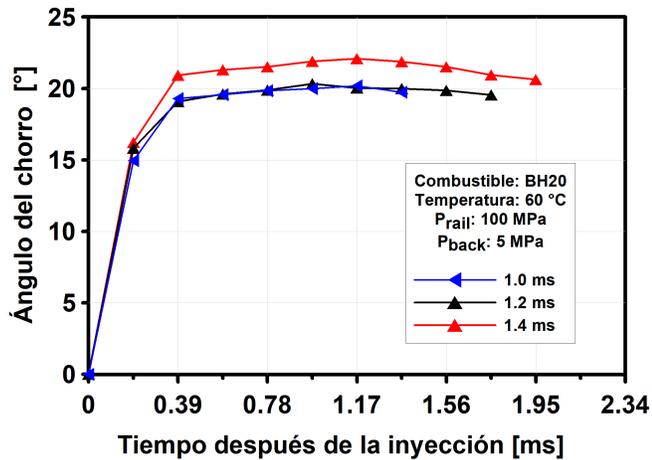


(c) Área del chorro

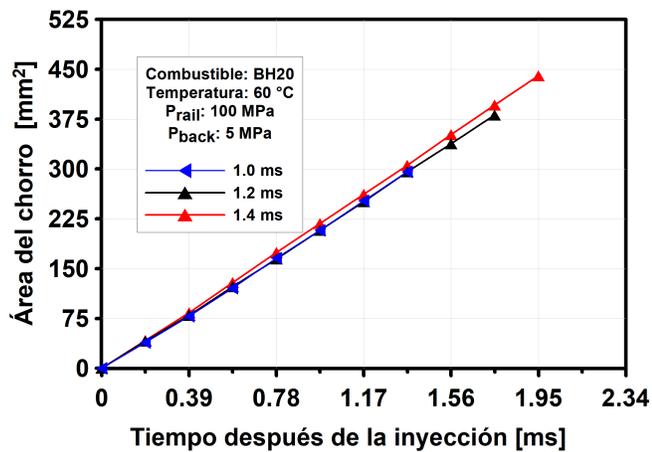
Figura C.8: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 80 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 60 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro

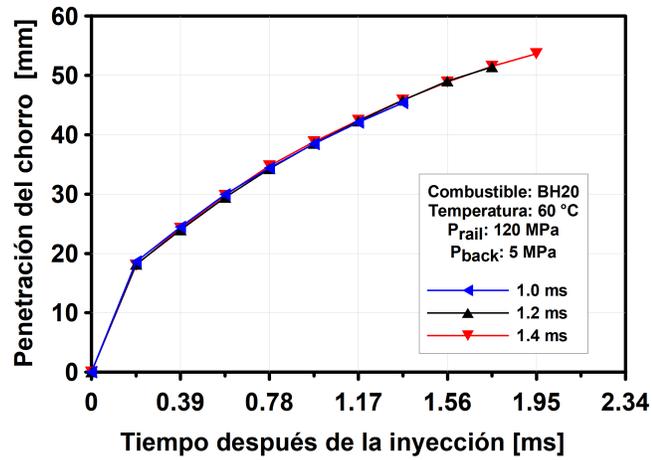


(b) Ángulo del chorro

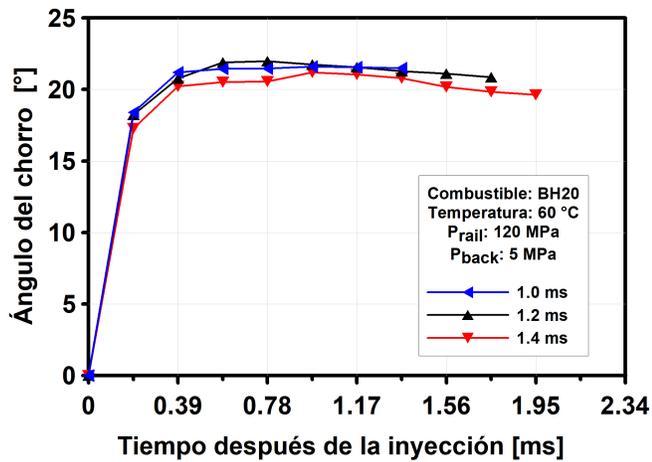


(c) Área del chorro

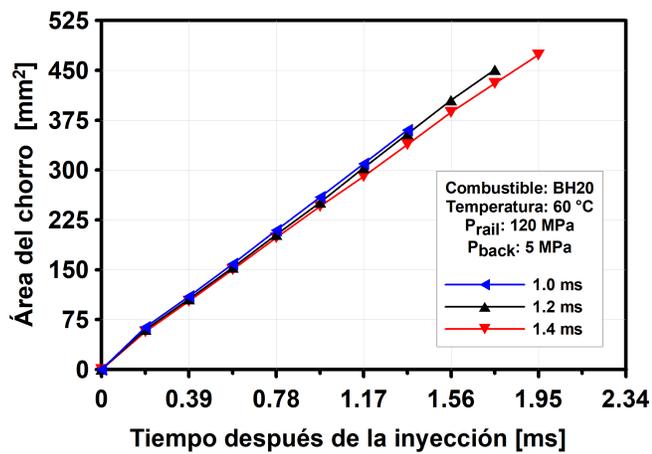
Figura C.9: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 100 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 60 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.



(a) Penetración del chorro



(b) Ángulo del chorro

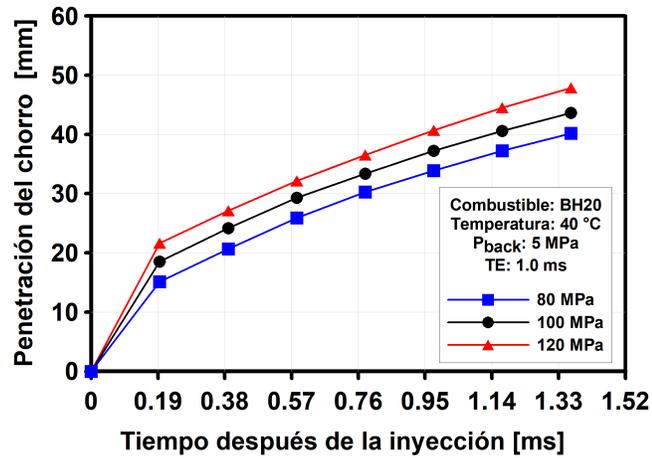


(c) Área del chorro

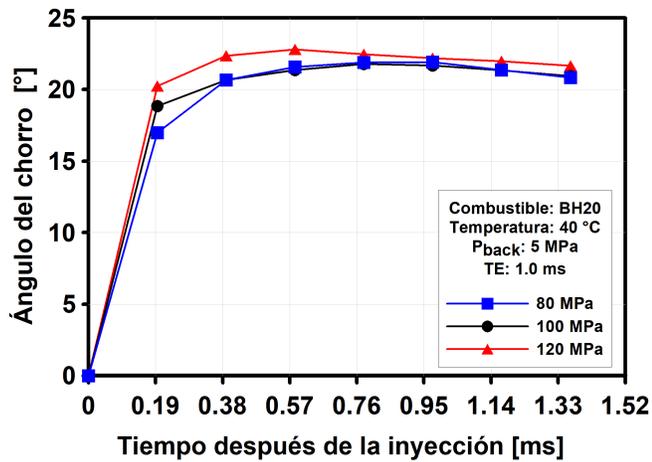
Figura C.10: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla BH20 a 120 MPa de P_{rail} , 5 MPa de P_{back} , 60 °C, y tres diferentes tiempos de energización. a) Penetración, b) Ángulo, y c) Área del chorro.

C.2 VARIACIÓN DEL NIVEL DE PRESIÓN DE INYECCIÓN

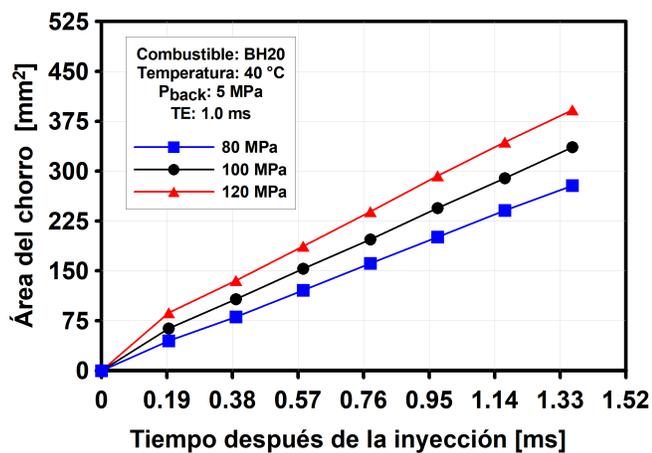
A continuación se muestra la comparación a diferentes niveles de P_{rail} de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel, y de la mezcla BH20 empleando una P_{back} de 5 MPa, temperaturas de 40 °C, 50 °C, y 60 °C, y un TE de 1.0 ms. En las Figuras C.11, y C.12, se muestran de color azul, negro, y rojo los niveles de P_{rail} de 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa, respectivamente.



(a) Penetración del chorro

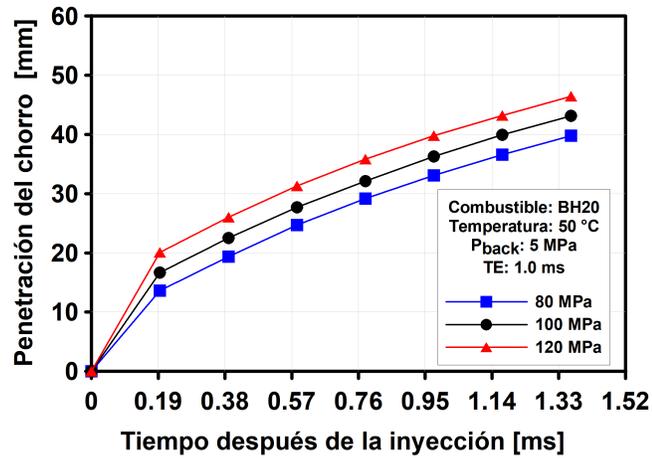


(b) Ángulo del chorro

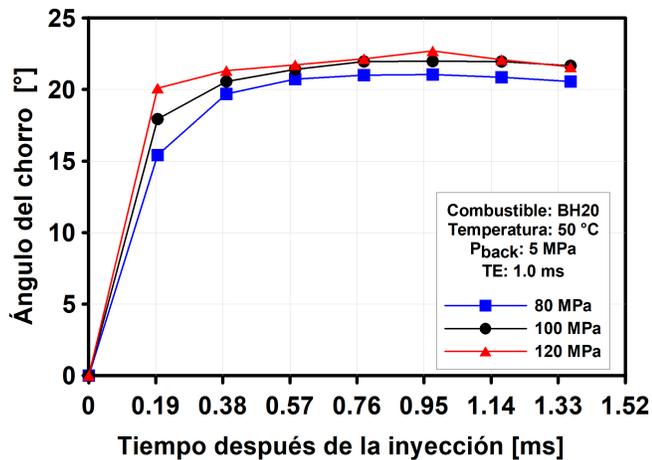


(c) Área del chorro

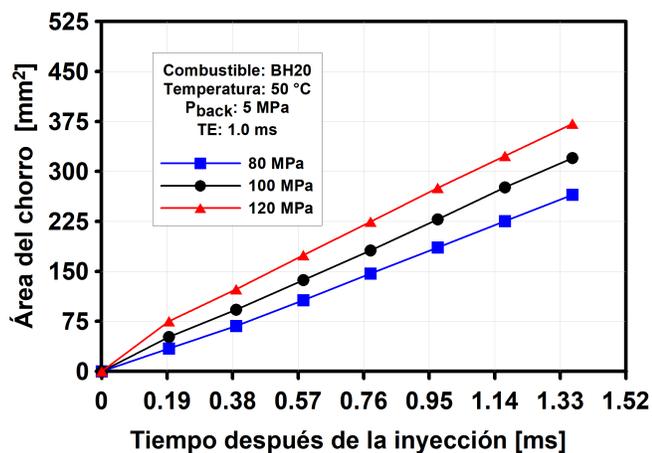
Figura C.11: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos de la mezcla BH20 empleando una temperatura de 40 °C, una P_{back} de 5 MPa, un TE de 1.0 ms, y tres niveles de P_{rail} , 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro.



(a) Penetración del chorro



(b) Ángulo del chorro



(c) Área del chorro

Figura C.12: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos de la mezcla BH20 empleando una temperatura de 50 °C, una P_{back} de 5 MPa, un TE de 1.0 ms, y tres niveles de P_{rail} , 80 MPa, 100 MPa, y 120 MPa. a) Penetración, b) ángulo, y c) área del chorro.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] S. Ouenou-Gamo, M. Ouladsine, and A. Rachid. Measurement and prediction of diesel engine exhaust emissions. *ISA Transactions*, 37:135–140, 7 1998. ISSN 00190578. doi: 10.1016/S0019-0578(98)00024-X.
- [2] Herman Autrup. Ambient air pollution and adverse health effects. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 2:7333–7338, 2010. ISSN 18770428. doi: 10.1016/j.sbspro.2010.05.089.
- [3] Nathália Duarte Souza Alvarenga Santos, Vinícius Rückert Roso, Augusto César Teixeira Malaquias, and José Guilherme Coelho Baêta. Internal combustion engines and biofuels: Examining why this robust combination should not be ignored for future sustainable transportation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 148:111292, 9 2021. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2021.111292.
- [4] Larissa R. Sassykova, Sendilvelan Subramanian, Bhaskar Kathirvelu, Ardak S. Zhumakanova, Yermek A. Aubakirov, Tleutai S. Abildin, Sholpan N. Kubekova, Zayra T. Mataeva, and Aiman A. Zhakupova. Norms of emissions of harmful substances generated from vehicles in the different countries of the world. *NEWS of National Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan*, 2:181–190, 4 2019. ISSN 22245278. doi: 10.32014/2019.2518-170X.53.
- [5] Helmut Greim. Diesel engine emissions: are they no longer tolerable? *Archives of Toxicology*, 93:2483–2490, 9 2019. ISSN 0340-5761. doi: 10.1007/s00204-019-02531-5.

-
- [6] Peter L. Herzog, Ludwig Bürgler, Ernst Winklhofer, Paul Zelenka, and Wolfgang Cartellieri. No x reduction strategies for di diesel engines. *SAE Transactions*, 101:820–836, 1992. ISSN 0096736X, 25771531. URL <http://www.jstor.org/stable/44611254>.
- [7] Sheikh Muhammad Farhan and Pan Wang. Post-injection strategies for performance improvement and emissions reduction in di diesel engines—a review. *Fuel Processing Technology*, 228:107145, 4 2022. ISSN 03783820. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107145.
- [8] Shuzhan Bai, Guobin Chen, Qiang Sun, Guihua Wang, and Guo xiang Li. Influence of active control strategies on exhaust thermal management for diesel particulate filter active regeneration. *Applied Thermal Engineering*, 119:297–303, 6 2017. ISSN 13594311. doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.012.
- [9] Jeffrey M. Bergthorson and Murray J. Thomson. A review of the combustion and emissions properties of advanced transportation biofuels and their impact on existing and future engines. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 42: 1393–1417, 2 2015. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2014.10.034.
- [10] Avinash Kumar Agarwal, Sungwook Park, Atul Dhar, Chang Sik Lee, Suhan Park, Tarun Gupta, and Neeraj K. Gupta. Review of experimental and computational studies on spray, combustion, performance, and emission characteristics of biodiesel fueled engines. *Journal of Energy Resources Technology*, 140, 12 2018. ISSN 0195-0738. doi: 10.1115/1.4040584.
- [11] Raslan A. Alenezi, Erdiwansyah, Rizalman Mamat, A.M. Norkhizan, and G. Najafi. The effect of fusel-biodiesel blends on the emissions and performance of a single cylinder diesel engine. *Fuel*, 279:118438, 11 2020. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2020.118438.
- [12] Jayaprabakar Jayaraman, Shaik Mohammad Muzahid Basha, Putchakayala Pavan Sai Venkata Anil, Anish Mariadhas, Nivin Joy, and Prabhu Appavu. Influence of liquid additives on waste cooking oil biodiesel-isopropanol blend operated

- in ci engine. *Materials Today: Proceedings*, 44:3595–3600, 2021. ISSN 22147853. doi: 10.1016/j.matpr.2020.09.489.
- [13] M.M. Gui, K.T. Lee, and S. Bhatia. Feasibility of edible oil vs. non-edible oil vs. waste edible oil as biodiesel feedstock. *Energy*, 33:1646–1653, 11 2008. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2008.06.002.
- [14] Avinash Kumar Agarwal, Sibendu Som, Pravesh Chandra Shukla, Harsh Goyal, and Douglas Longman. In-nozzle flow and spray characteristics for mineral diesel, karanja, and jatropha biodiesels. *Applied Energy*, 156:138–148, 10 2015. ISSN 03062619. doi: 10.1016/j.apenergy.2015.07.003.
- [15] 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(6):5952–5972, 2015. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en8065952. URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/8/6/5952>.
- [16] 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*, 14(3):303–313, 2023. doi: 10.1080/17597269.2022.2134642.
- [17] Niraj Kumar, Varun, and Sant Ram Chauhan. Performance and emission characteristics of biodiesel from different origins: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 21:633–658, 5 2013. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2013.01.006.
- [18] B. Karpanai Selvan, Soni Das, M. Chandrasekar, R. Girija, S. John Vennison, N. Jaya, P. Saravanan, M. Rajasimman, Yasser Vasseghian, and N. Rajamohan. Utilization of biodiesel blended fuel in a diesel engine – combustion engine performance and emission characteristics study. *Fuel*, 311:122621, 2022.

- ISSN 0016-2361. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2021.122621>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0016236121024881>.
- [19] Samsudin Anis and Galuh Nur Budiandono. Investigation of the effects of preheating temperature of biodiesel-diesel fuel blends on spray characteristics and injection pump performances. *Renewable Energy*, 140:274–280, 9 2019. ISSN 18790682. doi: 10.1016/j.renene.2019.03.062.
- [20] Raul Payri, Jaime Gimeno, Carmen Mata, and Alberto Viera. Rate of injection measurements of a direct-acting piezoelectric injector for different operating temperatures. *Energy Conversion and Management*, 154:387–393, 12 2017. ISSN 01968904. doi: 10.1016/j.enconman.2017.11.029.
- [21] M. Leenus Jesu Martin, V. Edwin Geo, and B. Nagalingam. Effect of fuel inlet temperature on cottonseed oil–diesel mixture composition and performance in a di diesel engine. *Journal of the Energy Institute*, 90:563–573, 8 2017. ISSN 17460220. doi: 10.1016/j.joei.2016.05.005.
- [22] Gina Hincapié, Fanor Mondragón, and Diana López. Conventional and in situ transesterification of castor seed oil for biodiesel production. *Fuel*, 90:1618–1623, 4 2011. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2011.01.027.
- [23] Aldara da Silva César and Mário Otávio Batalha. Biodiesel production from castor oil in brazil: A difficult reality. *Energy Policy*, 38:4031–4039, 8 2010. ISSN 03014215. doi: 10.1016/j.enpol.2010.03.027.
- [24] André Valente Bueno, Mariana Paulinia Bento Pereira, João Victor de Oliveira Pontes, Francisco Murilo Tavares de Luna, and Célio Loureiro Cavalcante. Performance and emissions characteristics of castor oil biodiesel fuel blends. *Applied Thermal Engineering*, 125:559–566, 2017. ISSN 1359-4311. doi: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.06.114>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116339102>.

- [25] Digambar Singh, Dilip Sharma, S. L. Soni, Sumit Sharma, Pushpendra Kumar Sharma, and Amit Jhalani. A review on feedstocks, production processes, and yield for different generations of biodiesel. *Fuel*, 262, 2 2020. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2019.116553.
- [26] Bryan R. Moser. Biodiesel production, properties, and feedstocks. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 45:229–266, 6 2009. ISSN 1054-5476. doi: 10.1007/s11627-009-9204-z.
- [27] Muhammad Aamir Bashir, Sarah Wu, Jun Zhu, Anilkumar Krosuri, Muhammad Usman Khan, and Robinson Junior Ndeddy Aka. Recent development of advanced processing technologies for biodiesel production: A critical review. *Fuel Processing Technology*, 227, 3 2022. ISSN 03783820. doi: 10.1016/j.fuproc.2021.107120.
- [28] Dong-Shik Kim, Mohammadmatin Hanifzadeh, and Ashok Kumar. Trend of biodiesel feedstock and its impact on biodiesel emission characteristics. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 37:7–19, 1 2018. ISSN 19447442. doi: 10.1002/ep.12800.
- [29] Liuqing Yang, Mohammed Takase, Min Zhang, Ting Zhao, and Xiangyang Wu. Potential non-edible oil feedstock for biodiesel production in africa: A survey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 38:461–477, 10 2014. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2014.06.002.
- [30] Oscar A. de la Garza, S. Martínez-Martínez, Madan Mohan Avulapati, Radboud Pos, Thanos Megaritis, and Lionel Ganippa. Biofuels and its spray interactions under pilot-main injection strategy. *Energy*, 219:119464, 3 2021. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2020.119464.
- [31] Carlos S. Osorio-González, Natali Gómez-Falcon, Fabiola Sandoval-Salas, Rahul Saini, Satinder K. Brar, and Antonio Avalos Ramírez. Production of biodiesel from castor oil: A review. *Energies*, 13:2467, 5 2020. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en13102467.

- [32] Francisco. Payri González and José María. Desantes Fernández. *Motores de combustión interna alternativos*. Universitat Politécnica de València, 2011. ISBN 9788483637050.
- [33] M.M. Elkotb. Fuel atomization for spray modelling. *Progress in Energy and Combustion Science*, 8:61–91, 1 1982. ISSN 03601285. doi: 10.1016/0360-1285(82)90009-0.
- [34] 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. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2021.120303.
- [35] Todd D Fansler and Scott E Parrish. Spray measurement technology: a review. *Measurement Science and Technology*, 26:012002, 1 2015. ISSN 0957-0233. doi: 10.1088/0957-0233/26/1/012002.
- [36] I. V. Roisman, Lucio Araneo, and C. Tropea. Effect of ambient pressure on penetration of a diesel spray. *International Journal of Multiphase Flow*, 33: 904–920, 8 2007. ISSN 03019322. doi: 10.1016/j.ijmultiphaseflow.2007.01.004.
- [37] Su Han Park, Hyung Jun Kim, Hyun Kyu Suh, and Chang Sik Lee. A study on the fuel injection and atomization characteristics of soybean oil methyl ester (sme). *International Journal of Heat and Fluid Flow*, 30:108–116, 2 2009. ISSN 0142727X. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2008.11.002.
- [38] J. M. Desantes, R. Payri, F. J. Salvador, and A. Gil. Development and validation of a theoretical model for diesel spray penetration. *Fuel*, 85:910–917, 5 2006. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2005.10.023.
- [39] J. C. Dent. A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration. In *International Mid-Year Meeting*. SAE International, feb 1971. doi: <https://doi.org/10.4271/710571>. URL <https://doi.org/10.4271/710571>.

- [40] Yutaro Wakuri, Masaru Fujii, Tatsuo Amitani, and Reijiro Tsuneya. Studies on the penetration of fuel spray in a diesel engine. *Bulletin of JSME*, 3:123–130, 1960. ISSN 0021-3764. doi: 10.1299/jsme1958.3.123.
- [41] Hyun Kyu Suh and Chang Sik Lee. A review on atomization and exhaust emissions of a biodiesel-fueled compression ignition engine. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 58:1601–1620, 5 2016. ISSN 13640321. doi: 10.1016/j.rser.2015.12.329.
- [42] Dennis L. Siebers. Scaling liquid-phase fuel penetration in diesel sprays based on mixing-limited vaporization. In *SAE Technical Paper*, 3 1999. doi: 10.4271/1999-01-0528.
- [43] Jai Gopal Gupta and Avinash Kumar Agarwal. Macroscopic and microscopic spray characteristics of diesel and karanja biodiesel blends. In *SAE Technical Paper*, 4 2016. doi: 10.4271/2016-01-0869.
- [44] E. Delacourt, B. Desmet, and B. Besson. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques. *Fuel*, 84:859–867, 5 2005. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2004.12.003.
- [45] Edwin Javier Barrios-Gómez, Jaime Canul-Ku, Marian Guadalupe Hernández-Arenas, and José Luis Solís-Bonilla. Evaluación de dos ciclos de higuierilla en morelos, méxico: siembra y rebrote. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas*, 9: 1663–1673, 12 2018. ISSN 2007-9230. doi: 10.29312/remexca.v9i8.679.
- [46] Bibin Chidambaranathan, S. Gopinath, R. Aravindraj, A. Devaraj, S. Gokula Krishnan, and J.K.S. Jeevaanathan. The production of biodiesel from castor oil as a potential feedstock and its usage in compression ignition engine: A comprehensive review. *Materials Today: Proceedings*, 33:84–92, 2020. ISSN 22147853. doi: 10.1016/j.matpr.2020.03.205.
- [47] S. T. Keera, S. M. El Sabagh, and A. R. Taman. Castor oil biodiesel production

- and optimization. *Egyptian Journal of Petroleum*, 27:979–984, 12 2018. ISSN 20902468. doi: 10.1016/j.ejpe.2018.02.007.
- [48] Paula Berman, Shahar Nizri, and Zeev Wiesman. Castor oil biodiesel and its blends as alternative fuel. *Biomass and Bioenergy*, 35:2861–2866, 7 2011. ISSN 09619534. doi: 10.1016/j.biombioe.2011.03.024.
- [49] Osmano Souza Valente, Vanya Márcia Duarte Pasa, Carlos Rodrigues Pereira Belchior, and José Ricardo Sodré. Physical-chemical properties of waste cooking oil biodiesel and castor oil biodiesel blends. *Fuel*, 90:1700–1702, 2011. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2010.10.045.
- [50] Mithun Das, Mouktik Sarkar, Amitava Datta, and Apurba Kumar Santra. An experimental study on the combustion, performance and emission characteristics of a diesel engine fuelled with diesel-castor oil biodiesel blends. *Renewable Energy*, 119:174–184, 2018. ISSN 0960-1481. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2017.12.014>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148117312107>.
- [51] Dilip Kumar, Tapas Das, Balendu Shekher Giri, and Bhawna Verma. Preparation and characterization of novel hybrid bio-support material immobilized from pseudomonas cepacia lipase and its application to enhance biodiesel production. *Renewable Energy*, 147:11–24, 2020. ISSN 0960-1481. doi: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.08.110>. URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148119312972>.
- [52] Osman Gokdogan, Tanzer Eryilmaz, and Murat Kadir Yesilyurt. Thermophysical properties of castor oil (*ricinus communis* L.) biodiesel and its blends. 6, 2015. ISSN 2382-4581.
- [53] Yung Sung Lin and Hai Ping Lin. Spray characteristics of emulsified castor biodiesel on engine emissions and deposit formation. *Renewable Energy*, 36:3507–3516, 12 2011. ISSN 09601481. doi: 10.1016/j.renene.2011.05.039.

- [54] Muteeb Haq, Ali Turab Jafry, Muhammad Salman Abbasi, Muhammad Jawad, Saad Ahmad, Taqi Ahmad Cheema, and Naseem Abbas. Numerical and experimental spray analysis of castor and jatropha biodiesel under non-evaporating conditions. *Energies*, 15:7808, 10 2022. ISSN 1996-1073. doi: 10.3390/en15207808.
- [55] M. Özcanli, H. Serin, O. Y. Saribiyik, K. Aydin, and S. Serin. Performance and emission studies of castor bean (*ricinus communis*) oil biodiesel and its blends with diesel fuel. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*, 34:1808–1814, 7 2012. ISSN 15567036. doi: 10.1080/15567036.2010.545800.
- [56] Brahma Nand Agrawal, Shailendra Sinha, Desh Bandhu Singh, and Gagan Bansal. Effects of blends of castor oil with pure diesel on performance parameters of direct injection compression ignition engine. *Materials Today: Proceedings*, 21:1462–1466, 2020. ISSN 22147853. doi: 10.1016/j.matpr.2019.10.137.
- [57] Ramalingam Senthil and Gunasekaran Arun Vijay. Review of physicochemical properties and spray characteristics of biodiesel. *Environmental Science and Pollution Research*, 5 2023. ISSN 16147499. doi: 10.1007/s11356-023-27250-4.
- [58] Mithun Das, Mouktik Sarkar, Amitava Datta, and Apurba Kumar Santra. Study on viscosity and surface tension properties of biodiesel-diesel blends and their effects on spray parameters for ci engines. *Fuel*, 220:769–779, 5 2018. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2018.02.021.
- [59] Hanbey Hazar and Huseyin Sevinc. Investigation of exhaust emissions and performance of a diesel engine fueled with preheated raw grape seed oil/propanol blends. *Chemical Engineering and Processing - Process Intensification*, 188, 6 2023. ISSN 02552701. doi: 10.1016/j.cep.2023.109378.
- [60] Junkyu Park, Ji Hwan Jang, and Sungwook Park. Effect of fuel temperature on heavy fuel oil spray characteristics in a common-rail fuel injection system

- for marine engines. *Ocean Engineering*, 104:580–589, 6 2015. ISSN 00298018. doi: 10.1016/j.oceaneng.2015.06.002.
- [61] Anh Tuan Hoang. Experimental study on spray and emission characteristics of a diesel engine fueled with preheated bio-oils and diesel fuel. *Energy*, 171: 795–808, 3 2019. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2019.01.076.
- [62] Shankar Vitthal Kodate, Pragada Satyanarayana Raju, Ajay Kumar Yadav, and G. N. Kumar. Effect of fuel preheating on performance, emission and combustion characteristics of a diesel engine fuelled with vateria indica methyl ester blends at various loads. *Journal of Environmental Management*, 304, 2 2022. ISSN 10958630. doi: 10.1016/j.jenvman.2021.114284.
- [63] Rachid Aitbelale, Ilham Abala, Fatima Ezzahrae M’hamdi Alaoui, Abdela-ziz Sahib Eddine, Natalia Munoz Rujas, and Fernando Aguilar. Characterization and determination of thermodynamic properties of waste cooking oil biodiesel: Experimental, correlation and modeling density over a wide temperature range up to 393.15 and pressure up to 140 mpa. *Fluid Phase Equilibria*, 497:87–96, 10 2019. ISSN 03783812. doi: 10.1016/j.fluid.2019.06.003.
- [64] Prem Shanker Yadav, Zafar Said, Raghvendra Gautam, Roshan Raman, and Hakan Caliskan. Novel investigation on atomization, performance, and emission characteristics of preheated jatropa oil methyl ester and ethyl ester. *Energy*, 270, 5 2023. ISSN 03605442. doi: 10.1016/j.energy.2023.126870.
- [65] 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. ISSN 2580-0817. doi: 10.17977/um016v5i22021p135.
- [66] V. D. Chaudhari, Vishal S. Jagdale, Devashish Chorey, and D. Deshmukh. Combustion and spray breakup characteristics of biodiesel for cold start application. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 12 2021. ISSN 26667908. doi: 10.1016/j.clet.2021.100285.

- [67] Ángel Leonides Rodríguez-Ramos, María Fernanda Uscanga-Tenorio, Marissa Hernández-Aguilar, Oscar A. De La Garza, Miguel García-Yera, and Simón Martínez-Martínez. Caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro diésel empleando elevados niveles de presión de inyección. 2023. doi: 10.59920/EIGN7075.
- [68] 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. ISSN 0957-0233. doi: 10.1088/1361-6501/aab121.
- [69] Gyuhan Bae, Sungsik Choi, Sanggwon Lee, Seoksu Moon, Jin Wang, Kihyun Kim, Jinwoo Lee, and Jinsuk Kang. Experimental investigation of fuel temperature effects on transient needle motion and injection velocity of solenoid type diesel injector. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 181:121838, 12 2021. ISSN 00179310. doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2021.121838.
- [70] Chang Zhai, Yu Jin, Keiya Nishida, and Youichi Ogata. Diesel spray and combustion of multi-hole injectors with micro-hole under ultra-high injection pressure – non-evaporating spray characteristics. *Fuel*, 283:119322, 1 2021. ISSN 00162361. doi: 10.1016/j.fuel.2020.119322.
- [71] 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. ISSN 0142727X. doi: 10.1016/j.ijheatfluidflow.2010.03.006.
- [72] Annisa Bhikuning, Ryunosuke Sugawara, Eriko Matsumura, and Jiro Senda. 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. ISSN 2214157X. doi: 10.1016/j.csite.2020.100661.
- [73] Ali Jabbarzadeh Ghandilou and Hadi Taghavifar. New insight into air/spray boundary interaction for diesel and biodiesel fuels under different fuel temperatures. *Biofuels*, 13:1087–1101, 10 2022. ISSN 1759-7269. doi: 10.1080/17597269.2022.2105867.
- [74] Romero Fernando Guevara. Estudio de los efector de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre las características del chorro de combustible líquido. 2019.