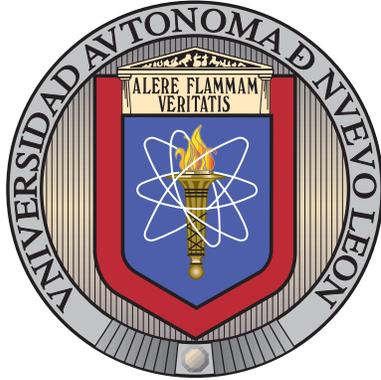


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EFFECTO DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN SOBRE
LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y SU RELACIÓN CON
EL PROCESO DE MEZCLA EMPLEANDO UNA
MEZCLA BINARIA DIÉSEL-BIODIÉSEL DERIVADO
DE ACEITE DE RICINO

POR

JOSÉ CARLOS RAMOS MARTÍNEZ

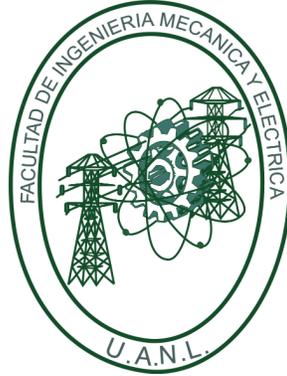
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

OCTUBRE 2024

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



EFFECTO DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN SOBRE
LAS PROPIEDADES FÍSICAS Y SU RELACIÓN CON
EL PROCESO DE MEZCLA EMPLEANDO UNA
MEZCLA BINARIA DIÉSEL-BIODIÉSEL DERIVADO
DE ACEITE DE RICINO

POR

JOSÉ CARLOS RAMOS MARTÍNEZ

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

OCTUBRE 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 presión de inyección sobre las propiedades físicas y su relación con el proceso de mezcla empleando una mezcla binaria diésel-biodiésel derivado de aceite de ricino”, realizada por la estudiante José Carlos Ramos Martínez, con número de matrícula 2172454, 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

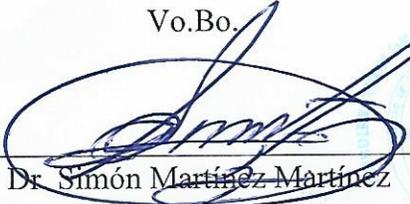
M.C. Miguel García Yera
Co-Director

Dr. Héctor Daniel García Lara
Revisor

Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo
Revisor

M.C. Fernando Ibarra Hernández
Revisor

Vo.Bo.


Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 507507

Acta Núm. 4466

Ciudad Universitaria, a 27 de febrero de 2025.

*A mi familia. A mi yo de niño, que estoy seguro que nunca se imaginó hasta donde
íbamos a poder llegar...y aún falta mucho por lograr.*

AGRADECIMIENTOS

A mi familia, la cual siempre me apoyó durante mi estadía en esta maestría, en especial a mis padres Juan Carlos Ramos Pérez y María Luisa Martínez López.

A mis amigos y compañeros de generación Jaciel López, Lilia Lourdes Cabral y Raúl Santana Rodríguez, por todas las experiencias y momentos vividos durante la estancia en esta maestría. Así como también a aquellos que desafortunadamente no pudieron continuar con nosotros, Jacob Álvarez y Dionicio Pérez.

A mis amigos y compañeros de laboratorio, Christian, Breidy, Alberto y Ramón, por ayudarme durante mi estadía en el laboratorio, y hacer mas ameno el ambiente de trabajo. De igual manera a Ángel Rodríguez, por haberme enseñado muchas cosas relacionadas con el laboratorio y su apoyo en cuestiones académicas.

A mi director de tesis y cordinador del programa de maestría el Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León, así como también al M.C. Miguel García Yera quien fue mi codirector en este presente trabajo, por su apoyo durante la ejecución de esta investigación.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por la estadía en este programa de maestría.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencia y Tecnología (CONAHCYT) por haber financiado mis estudios de posgrado, con el número de CVU 1239379.

Al Programa de Apoyo a la Ciencia, Tecnología e Innovación ProACTI (114-IDT-2024) 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 apoyar la realización del presente trabajo. Este trabajo se llevó a cabo en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) del Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) de la FIME-UANL.

ÍNDICE GENERAL

Agradecimientos	IV
Tabla de símbolos	XXIV
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
2. Estado actual del conocimiento sobre inyección y combustión	6
2.1. Sistema de inyección diésel common-rail	7
2.1.1. Componentes y descripción	8
2.1.2. Chorro de inyección	11
2.1.3. Parámetros macroscópicos del chorro	13
2.1.4. Estrategias de inyección	14
2.2. Influencia del biodiésel en las características de combustión	15
2.2.1. Presión del cilindro	15
2.2.2. Tasa de liberación de calor	16
2.2.3. Retardo de encendido	17

2.2.4. Duración de la combustión	17
2.3. Influencia del biodiésel en el rendimiento del motor	18
2.3.1. Eficiencia térmica del freno	18
2.3.2. Consumo específico de combustible para frenos	19
2.3.3. Temperatura de los gases de escape	19
2.3.4. Par motor	20
2.3.5. Potencia de frenado	20
2.4. Biodiésel y su impacto en las emisiones	21
2.4.1. Humo	21
2.4.2. Material particulado (PM)	21
2.4.3. Dióxido de carbono (CO ₂)	22
2.4.4. Monóxido de carbono (CO)	22
2.4.5. Hidrocarburos no quemados (UHC)	23
2.4.6. Óxidos de nitrógeno (NO _x)	23
2.5. Propiedades fisicoquímicas del biodiésel y sus mezclas	24
2.6. Vías para reducir la viscosidad de un combustible	26
2.6.1. Pre calentamiento	26
2.6.2. Aditivos	27
2.6.3. Presión de inyección	27
3. Planteamiento de la tesis	31

3.1. Síntesis de la revisión bibliográfica	32
3.2. Hipótesis	33
3.3. Objetivos	33
3.3.1. Objetivo general	33
3.3.2. Objetivos específicos	34
3.4. Metodología general utilizada	34
4. Metodología	36
4.1. Instalación experimental	37
4.1.1. Maqueta de visualización a volumen constante	38
4.1.2. Sistema hidráulico de baja presión	39
4.1.3. Sistema hidráulico de alta presión	40
4.1.4. Sistema de inyección diésel common-rail	41
4.1.5. Sistema de enfriamiento	42
4.1.6. Sistema de control	44
4.1.7. Sistema de adquisición de imágenes	44
4.1.8. Procesamiento de imágenes	46
4.1.9. Matriz experimental	49
5. Análisis del proceso de mezcla	52
5.1. Análisis de la influencia de la presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro	53

5.1.1. Estrategia de inyección simple	53
5.1.2. Estrategia de inyección piloto	62
6. Conclusiones y trabajos futuros	107
6.1. Conclusiones	108
6.2. Trabajos futuros	110
A. Influencia del tiempo de energización sobre los parámetros macroscópicos del chorro	111
A.1. Influencia del tiempo de energización sobre los parámetros macroscópicos del diésel y la mezcla B20, empleando diferentes niveles de presión de inyección	111
B. Influencia de la presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro	119
B.1. Influencia de la presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro	119

ÍNDICE DE FIGURAS

2.1. Sistema de inyección diésel common-rail.	7
2.2. Componentes de un inyector diésel tipo piezoeléctrico (Adaptado de Martínez et al. [1]).	9
2.3. Componentes de un inyector diésel tipo solenoide (Adaptado de Martínez et al. [1]).	9
2.4. Componentes de accionamiento de un inyector diésel tipo solenoide (Adaptado de Martínez et al. [1]).	10
2.5. Parámetros macroscópicos del chorro.	13
2.6. Representación esquemática de las estrategias de inyección: a)Inyección simple, b)Inyección piloto, c)Post inyección, d)Inyección dividida.	15
2.7. Efecto de la presión de inyección sobre la penetración del chorro (Adaptado de Zhong et al. [2]).	28
2.8. Efecto de la presión de inyección sobre la penetración del chorro (Adaptado de Lee et al. [3]).	29
2.9. Efecto de la presión de inyección sobre el ángulo del chorro (Adaptado de Corral et al. [4]).	30

4.1. Diagrama del montaje experimental empleado para la visualización del chorro líquido (Adaptado de Rodríguez et al. [5]).	37
4.2. Cámara de visualización a volumen constante.	38
4.3. Tanque de combustible.	39
4.4. Filtros de cartucho para combustible.	40
4.5. Bomba de combustible de baja presión.	40
4.6. Componentes del sistema hidráulico de alta presión.	41
4.7. Componentes del sistema de inyección diésel common-rail.	42
4.8. Conjunto de intercambiadores de calor 1.	43
4.9. Conjunto de intercambiadores de calor 2.	43
4.10. Baños térmicos.	43
4.11. Equipos de control a) Unidad de control de inyección Genotec, b) Generador de onda cuadrada.	44
4.12. Cámara de alta velocidad.	45
4.13. Técnica óptica de iluminación directa por dispersión Mie.	46
4.14. Determinación píxel/mm.	47
4.15. Binarización del chorro de combustible.	48
4.16. Detección del contorno del chorro de combustible.	48
5.1. Comportamiento de la penetración del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando 1 ms de tiempo de energización, y 140 MPa de presión de inyección. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	54

5.2. Comportamiento de la penetración del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando 1 ms de tiempo de energización, y 160 MPa de presión de inyección. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	55
5.3. Comportamiento de la penetración del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando 1 ms de tiempo de energización, y 180 MPa de presión de inyección. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	55
5.4. Comportamiento del ángulo del chorro diésel y la mezcla B20, cuando 1 ms de tiempo de energización, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa fueron empleados. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	57
5.5. Comportamiento del ángulo del chorro diésel y la mezcla B20, cuando 1 ms de tiempo de energización, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa fueron empleados. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	57
5.6. Comportamiento del ángulo del chorro diésel y la mezcla B20, cuando 1 ms de tiempo de energización, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa fueron empleados. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	58
5.7. Comportamiento del área del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando un tiempo de energización de 1 ms y un nivel de presión de inyección de 140 MPa de presión de inyección. a) Comparación mediante isotiempos, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	59

5.8. Comportamiento del área del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando un tiempo de energización de 1 ms de tiempo de energización y un nivel de presión de inyección de 160 MPa. a) Comparación mediante isotiempos, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	59
5.9. Comportamiento del área del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando un tiempo de energización de 1 ms y un nivel de presión de inyección de 180 MPa. a) Comparación mediante isotiempos, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.	60
5.10. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y un valor de dwell time de 2 ms.	63
5.11. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y un valor de dwell time de 2.25 ms.	64
5.12. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y un valor de dwell time de 2.5 ms.	65
5.13. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa	67
5.14. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa	68

5.15. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa	68
5.16. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.	69
5.17. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.	70
5.18. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.	70
5.19. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.	71
5.20. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.	72
5.21. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.	72
5.22. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.	74

-
- 5.23. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa. 75
- 5.24. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa. 76
- 5.25. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y un valor de dwell time de 2 ms. 79
- 5.26. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y un valor de dwell time de 2.25 ms. 80
- 5.27. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y un valor de dwell time de 2.5 ms. 81
- 5.28. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa. 83

5.29. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	83
5.30. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	84
5.31. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	85
5.32. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	85
5.33. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	86
5.34. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	87
5.35. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	87
5.36. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	88

5.37. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	89
5.38. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	90
5.39. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.	91
5.40. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y un valor de dwell time de 2 ms.	93
5.41. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y un valor de dwell time de 2.25 ms.	94
5.42. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y un valor de dwell time de 2.5 ms.	95

5.43. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	97
5.44. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	97
5.45. Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	98
5.46. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	99
5.47. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	99
5.48. Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	100
5.49. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	101
5.50. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	101

5.51. Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	102
5.52. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) área, y c) ángulo durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	103
5.53. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) área, y c) ángulo durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	104
5.54. Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) área, y c) ángulo durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.	105
A.1. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms.	112
A.2. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms.	113

A.3. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms. 114

A.4. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para diésel, y empleando un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms. 115

A.5. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para diésel, y empleando un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms. 116

A.6. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para diésel, y empleando un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms. 117

B.1. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para el diésel, y empleando los niveles de presión de inyección de 140, 160, y 180 MPa, y un tiempo de energización de 0.8 ms. 120

B.2. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para el diésel, y empleando los niveles de presión de inyección de 140, 160, y 180 MPa, y un tiempo de energización de 1 ms. 121

<p>B.3. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando los niveles de presión de inyección de 140, 160, y 180 MPa, y un tiempo de energización de 0.8 ms.</p>	<p>122</p>
<p>B.4. Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando los niveles de presión de inyección de 140, 160, y 180 MPa, y un tiempo de energización de 1 ms.</p>	<p>123</p>

ÍNDICE DE TABLAS

1.1. Límite de emisiones de la normativa medioambiental Euro 6.	3
1.2. Límites de emisiones en vehículos diésel con un peso mayor a 3500 kg. . . .	3
1.3. Norma Euro-límites de emisiones para vehículos a gasolina y diésel.	3
1.4. Normativa Bin de emisiones para vehículos de pasajeros.	4
1.5. Normativa EPA de emisiones para vehículos pesados.	4
4.1. Propiedades fisicoquímicas del diésel y de la mezcla B20.	49
4.2. Matriz experimental para la estrategia de inyección simple.	51
4.3. Matriz experimental para la estrategia de inyección piloto.	51
5.1. Parámetros macroscópicos del chorro del diésel y de la mezcla B20, obteni- dos a 0.582 ms aSOI, y al emplear el nivel de presión de inyección de 140 MPa.	61
5.2. Parámetros macroscópicos del chorro del diésel y de la mezcla B20, obteni- dos a 0.582 ms aSOI, y al emplear el nivel de presión de inyección de 160 MPa.	61

5.3. Parámetros macroscópicos del chorro del diésel y de la mezcla B20, obtenidos a 0.582 ms aSOI, y al emplear el nivel de presión de inyección de 180 MPa.	61
--	----

TABLA DE SÍMBOLOS

Siglas

DT	Tiempo transcurrido entre una inyección de combustible y la siguiente (<i>Dwell Time</i>)
ECU	Unidad de control electrónico (<i>Electronic Control Unit</i>)
EPA	Agencia de protección ambiental (<i>Environmental Protection Agency</i>)
MMA	Masa máxima autorizada

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En el presente capítulo se describen las razones por las cuales se realizó este estudio, de igual manera se define la terminología necesaria para la comprensión del tema presentado en lo referente al biodiésel.

1.1 MOTIVACIÓN

A nivel global, debido al crecimiento de las actividades diarias en materia de transporte de la población, se generan consecuencias derivadas en lo referente a la contaminación del aire como consecuencia de la quema de los hidrocarburos utilizados como combustible. Esto provoca un incremento en las emisiones de partículas y óxidos de nitrógeno generadas a partir de la quema de combustibles fósiles, para ello se han establecido diversas normas que permitan regular el impacto que generan éstas en el medio ambiente. Esto debido a que si en los próximos años el calentamiento global supera de manera transitoria los 1.5 °C se producirán afectaciones tanto en la vida humana como en el medio ambiente [6, 7].

Dentro del territorio Europeo, la norma Euro 6 busca un mejoramiento en la calidad del aire a partir del control de las emisiones de los vehículos, mediante el establecimiento de un valor máximo para cada una de las sustancias contaminantes producidas por los motores de inyección directa, haciendo una categorización para los diversos tipos de vehículos en el mercado, y asignándole a cada uno sus propios límites de emisiones [8].

M1: Vehículos con un máximo de 8 asientos, además del sitio del conductor, sin espacios destinados para estar de pie (todos los pasajeros deben ir sentados).

M2: vehículos que cuentan con más de 8 sitios de asiento, además de la del conductor. Puede contarse con espacios disponibles para que los pasajeros estén de pie. Su masa máxima autorizada (MMA por sus siglas en español) no deberá ser mayor a 5000 kg.

N1: vehículos cuya masa máxima autorizada (MMA por sus siglas en español) no sea mayor a los 3500 kg.

N2: vehículos cuya masa máxima autorizada (MMA por sus siglas en español) sea mayor a las 3.5 t. pero no sobrepase los 12000 kg.

De acuerdo a la normativa Euro 6 [8] se presenta en la Tabla 1.1 los límites de emisiones para cada categoría de vehículo.

TABLA 1.1: Límite de emisiones de la normativa medioambiental Euro 6.

		Masa de referencia (MR) (kg)	Valores límite													
			Monóxido de carbono en masa (CO)		Hidrocarburos Masa total (HCT)		Hidrocarburos no metanos en masa (HCNM)		Óxidos de nitrógeno en masa (NOx)		Óxidos de nitrógeno totales e hidrocarburos en masa combinada (HCT+NOx)		Masa de partículas (PM)		Número de partículas (P)	
			L1 (mg/km)		L2 (mg/km)		L3 (mg/km)		L4 (mg/km)		L2+L4 (mg/km)		L5 (mg/km)		L6 (#/km)	
Categoría	Clase	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	PI	CI	
M	-	Todos		1000.0	500.0	100.0	-	68.0	-	60.0	80.0	-	170.0	5.0	5.0	
	I	MR<=1305.0		1000.0	500.0	100.0	-	68.0	-	60.0	80.0	-	170.0	5.0	5.0	
N1	II	1305<MR<=1760.0		1810.0	630.0	130.0	-	90.0	-	75.0	105.0	-	195.0	5.0	5.0	
	III	1760.0<MR		2270.0	740.0	160.0	-	108.0	-	82.0	125.0	-	215.0	5.0	5.0	
N2				2270.0	740.0	160.0	-	108.0	-	82.0	125.0	-	215.0	5.0	5.0	

A lo largo del tiempo, la normativa europea ha tenido cambios en lo que respecta al límite máximo de emisiones que puede producir un vehículo. En la Tabla 1.2 es posible observar las modificaciones que ha tenido esta normativa para vehículos que emplean diésel como combustible y que tengan un peso superior a los 3500 kg [9].

TABLA 1.2: Límites de emisiones en vehículos diésel con un peso mayor a 3500 kg.

Etapa	Fecha	Límite de emisiones g/kWh			
		CO	NOx	HC	PM
Euro 0	1998-1992	12.3	15.8	2.6	-
Euro 1	1992-1995	4.9	9	1.23	0.4
Euro 2	1995-1999	4	7	1.1	0.15
Euro 3	1999-2005	2.1	5	0.66	0.1
Euro 4	2005-2008	1.5	3.5	0.46	0.02
Euro 5	2008-2012	1.5	2	0.46	0.02
Euro 6	2013	1.5	0.5	0.13	0.009

Análogamente, en la Tabla 1.3, se observan también los cambios a través del tiempo de la normativa europea en materia de restricciones en las emisiones contaminantes en vehículos industriales ligeros que utilicen diésel o gasolina como combustible, y que tengan un peso de entre 1760 a 3500 kg.

TABLA 1.3: Norma Euro-límites de emisiones para vehículos a gasolina y diésel.

Etapa	Fecha	Límite de emisiones g/km									
		Diésel					Gasolina				
		CO	HC	HC+NOx	NOx	PM	CO	HC	HC+NOx	NOx	PM
Euro 1	1994	6.90	-	1.70	-	0.250	6.90	-	1.70	-	-
Euro 2	1998	1.50	-	1.60	-	0.20	5.0	-	0.80	-	-
Euro 3	2001	0.950	-	0.860	0.780	0.10	5.220	0.290	-	0.210	-
Euro 4	2006	0.950	-	0.460	0.390	0.060	2.270	0.160	-	0.110	-
Euro 5	2010	0.740	-	0.350	0.280	0.0050	2.270	0.160	-	0.0820	0.0050
Euro 6	2015	0.740	-	0.350	0.280	0.0050					

De manera similar la Agencia de Protección Ambiental (EPA, por sus siglas en inglés *Environmental Protection Agency*) de los Estados Unidos propone su propia normativa con el propósito de establecer límites en las emisiones producidas por vehículos a gasolina y diésel. En ella se señalan dos clasificaciones para cada tipo de vehículo: Bin (Base Increment Number, por sus siglas en inglés): Para vehículos ligeros como motocicletas o automóviles EPA: Vehículos que funcionan con diésel como combustible y son de encendido por compresión, es decir, vehículos pesados. En las Tablas 1.4 y 1.5 se pueden observar las modificaciones a través del tiempo de las normativas Bin y EPA respectivamente, pudiendo observar una disminución en el límite de emisiones que puede producir cada tipo de vehículo [10].

TABLA 1.4: Normativa Bin de emisiones para vehículos de pasajeros.

Etapa	Límite de emisiones (g/mi)			
	NOx	CO/10	HCHO	PM(solo diesel)
Bin 10	0.60	0.420	0.1560	0.080
Bin 9	0.30	0.420	0.090	0.060
Bin 8	0.20	0.420	0.1250	0.020
Bin 7	0.150	0.420	0.090	0.020
Bin 6	0.10	0.420	0.090	0.010
Bin 5	0.070	0.420	0.090	0.010
Bin 4	0.040	0.210	0.070	0.010
Bin 3	0.030	0.210	0.0550	0.010
Bin 2	0.020	0.210	0.010	0.010
Bin 1	0	0	0	0

TABLA 1.5: Normativa EPA de emisiones para vehículos pesados.

Etapa	Año de implementación	Límite de emisiones (g/kW-h)				Combustible (ppm)
		NOx	CO	HC	PM	
EPA 91	1991	6.7	15.5	15.5	0.1	2500.0
EPA 94	1994	5	15.5	1.3	0.1	500.0
EPA 98	1998	4	15.5	1.3	0.1	500.0
EPA 04	2004	2.5	15.5	1.3	0.1	500.0
EPA 07	2007	0.2	15.5	1.3	0.01	15.0
EPA 10	2010	0.2	15.5	1.3	0.01	15.0
EPA 13	2013	0.2	15.5	1.3	0.01	15.0
EPA 17	2017	0.2	15.5	1.3	0.01	15.0

En el análisis sobre control de emisiones a partir de las normas EPA y Euro antes mencionadas, se observa que en los vehículos de carga pesada operados con diésel la norma Euro señala niveles más bajos en lo que respecta a material particulado, mientras que la norma EPA señala niveles más bajos en lo referente a óxidos de nitrógeno.

De igual manera, dentro del territorio nacional existen normas que ayudan a disminuir las emisiones contaminantes expulsadas hacia la atmosfera. La NOM-044-SEMARNAT-2017 regula los límites máximos de emisiones para el CO (monóxido de carbono), NOx (óxidos de nitrógeno), material particulado y amoníaco [11]. Esto es aplicable para todos los vehículos que utilicen diésel, incluyendo los que ya se encuentren en circulación. De manera similar, otra de las normativas asociadas a la reducción de emisiones es la NOM-016-CRE-2016. Su objetivo es definir la calidad de los productos petrolíferos durante su producción [12].

Una solución a esta problemática es sustituir el diésel mineral con biodiésel, el cual se obtiene de diferentes fuentes como aceites vegetales y grasas animales, es de costo más económico y también reduce el costo que implicaría el tratamiento de los residuos de las materias primas si no se emplearan para elaborar combustibles. Sus propiedades son semejantes a las del diésel y además, ayudan a reducir las emisiones contaminantes [13].

El aceite de ricino es una fuente natural interesante para la obtención de biodiésel. Se extrae de la semilla de higuierilla, que se cultiva en regiones tropicales y subtropicales del país, y es de crecimiento rápido. Además, puede crecer en condiciones de clima adverso y suelos que podrían considerarse no aptos para cultivo. Asimismo, la semilla de esta planta no es comestible, por lo que no existiría competencia alguna con la industria alimentaria [14]. El aceite de ricino posee una viscosidad alta, siendo esto un problema al intentar utilizarlo en estado puro en motores Diesel. Es por ello, que se plantea la utilización de altas presiones de inyección para poder compensar los efectos negativos de la viscosidad en el proceso de inyección diésel.

CAPÍTULO 2

ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO SOBRE EL PROCESO DE INYECCIÓN Y COMBUSTIÓN

En este capítulo se abordan los conceptos relacionados al sistema de inyección diésel common-rail, inyectores diésel, el proceso de atomización, y parámetros macroscópicos del chorro diésel.

2.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

En este sistema el combustible a alta presión viaja desde el rail hasta los inyectores. Para ello, una bomba de alta presión es empleada para incrementar la presión del combustible depositado en el rail. El combustible que llega a la bomba de alta presión lo suministra una bomba de baja presión, como se muestra en la Figura 2.1.

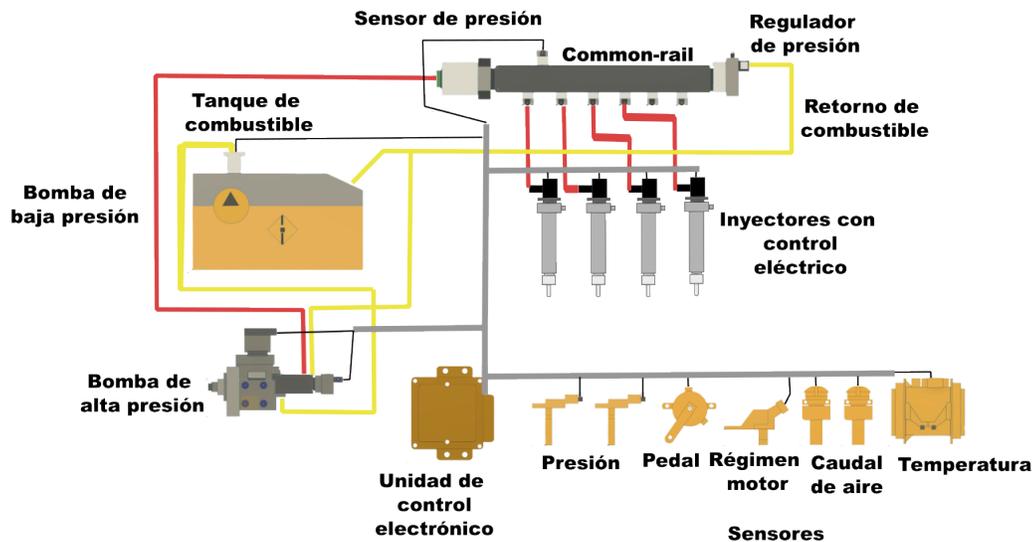


FIGURA 2.1: Sistema de inyección diésel common-rail.

Un elemento de este sistema es la unidad de control electrónico (ECU, por sus siglas en inglés *Electronic Control Unit*), la cual tiene la función de controlar la cantidad correcta de combustible que se inyecta en el interior de la cámara de combustión mediante cada uno de los inyectores, lo cual provoca que el motor Diesel pueda funcionar correctamente. Asimismo, la presión de inyección es controlada a partir de la apertura y el cierre del regulador de presión, el cual compara el valor registrado por un sensor ubicado en el common-rail, y el valor registrado en la unidad de control electrónico. La cantidad de combustible inyectada se mide a partir de los parámetros listados a continuación.

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

De igual manera, la ECU se encarga de enviar las señales de control a los inyectores, indicando su cierre o apertura según sea el caso. La cantidad de combustible suministrado en el interior de la cámara de combustión está determinado por el tiempo en el que transcurre la inyección, la capacidad de descarga que presentan los orificios de la tobera, y la presión a la cual es inyectada el combustible [15].

2.1.1 COMPONENTES Y DESCRIPCIÓN

2.1.1.1 INYECTOR DIÉSEL TIPO PIEZOELÉCTRICO Y SOLENOIDE

Actualmente, el sistema de inyección diésel common-rail puede utilizar dos distintos tipos de inyectores para su funcionamiento, pudiendo ser de tipo piezoeléctrico o de tipo solenoide, mostrados en las Figuras 2.2 y 2.3, respectivamente.

Una de las características del inyector diésel tipo piezoeléctrico es que requiere una menor cantidad de corriente para su funcionamiento en comparación con los inyectores diésel tipo solenoides. El inyector diésel tipo piezoeléctrico es considerado como un elemento del sistema de inyección de última generación, esto debido a que tiene un tiempo de accionamiento menor, reduciendo de manera notoria el retraso hidráulico que se encuentra entre el pulso de activación del inyector y el comienzo de la inyección provocado por los fenómenos fluidodinámicos de fuerzas y momentos, causantes del movimiento de los fluidos, además de su flexibilidad y estabilidad al momento de emplear estrategias de inyección múltiple.

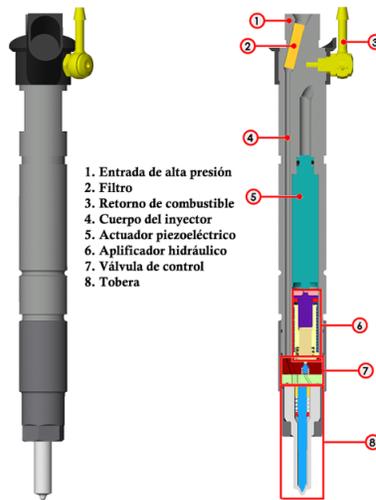


FIGURA 2.2: Componentes de un inyector diésel tipo piezoeléctrico (Adaptado de Martínez et al. [1]).

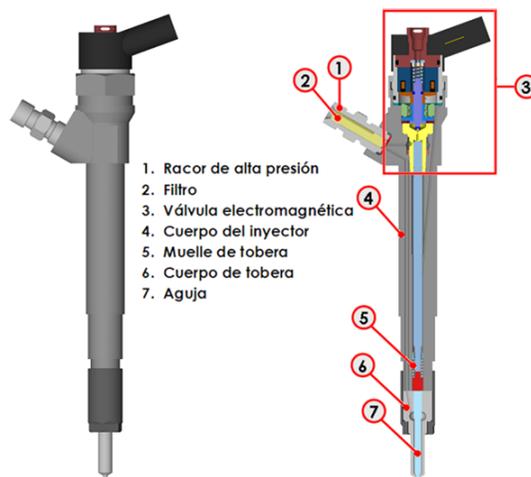


FIGURA 2.3: Componentes de un inyector diésel tipo solenoide (Adaptado de Martínez et al. [1]).

La válvula electromagnética que se describe a continuación en la Figura 2.4 es una servoválvula, la cual contiene dos orificios, los cuales son la entrada y la salida del volumen de control, representados como (Z) y (A), respectivamente. Estos se encontrarán abiertos o cerrados, lo cual depende de si el inyector realizará el proceso de inyección o si se le está haciendo llegar el combustible nuevamente, posterior a que se ha realizado la inyección.

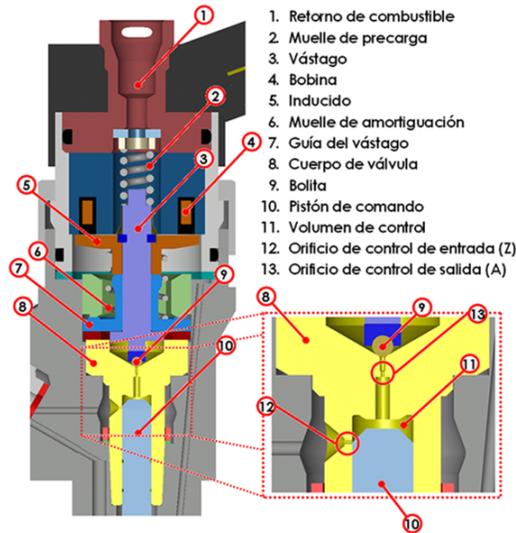


FIGURA 2.4: Componentes de accionamiento de un inyector diésel tipo solenoide (Adaptado de Martínez et al. [1]).

El combustible es abastecido con una elevada presión hasta el inyector desde el common-rail y al encontrarse dentro del inyector el combustible toma dos caminos. Uno lleva el combustible hacia la tobera del inyector y el otro a la región del volumen de control mediante la entrada Z, que se encuentra aguas arriba del pistón de comando, donde se almacena el combustible dentro del inyector. Es posible observar que cuando el solenoide no se encuentra activo, el vástago está en reposo, con una esfera que cierra el orificio (A). En este estado, tanto la sección donde se encuentra el volumen de control, como aquella donde asienta la aguja de la tobera tienen la misma presión, siendo esta la presión a la que se encuentra el common-rail, pero debido a que el área de la sección superior es mayor que la inferior, la aguja bloquea los orificios de la tobera, evitando la inyección [15].

2.1.2 CHORRO DE INYECCIÓN

2.1.2.1 ATOMIZACIÓN Y MEZCLA DE COMUSTIBLE

A través de la inyección del combustible en el interior de la cámara de combustión, el combustible es expulsado en fase líquida por medio de la tobera del inyector en gotas muy pequeñas, facilitando su evaporación, siendo este el fenómeno de la atomización. Cuando se presenta el fenómeno de la inyección, el combustible es afectado por fuerzas que intentan producir modificaciones en su estructura. Cuando la intensidad de las fuerzas externas supera a las mismas fuerzas de cohesión, se genera como consecuencia oscilaciones en la zona de superficie del chorro, las cuales se incrementan poco a poco hasta llegar al punto de quiebre del mismo, generando un proceso conocido como atomización primaria.

Sin embargo, para el caso de generarse gotas de mayor tamaño, se presenta un desequilibrio entre las fuerzas de disrupción y cohesión, es decir, aquellas fuerzas que separan o unen a las moléculas del líquido respectivamente, produciendo una segunda ruptura o separación de las mismas hasta alcanzar el tamaño adecuado que permita la estabilización, proceso al cual se le denomina como atomización secundaria [15].

Una vez inyectado el combustible dentro de la cámara de combustiónl ocurre el proceso de mezcla, el cual es relevante debido a que un buen proceso de mezcla puede reducir la generación de emisiones contaminantes y contribuye al funcionamiento óptimo del motor. El estudio de los procesos de atomización de combustible permite la comprensión del proceso de mezcla aire-combustible, el cual depende de la presión a la cual es inyectado el combustible, la densidad y viscosidad del combustible, así como la presión y temperatura de la cámara de combustión.

2.1.2.2 RÉGIMEN DE ATOMIZACIÓN (RAYLEIGH E INTERACCIÓN AERODINÁMICA)

Cada uno de los regímenes está sujeto a la velocidad con la que se genera la inyección del chorro de combustible, estos pueden ser:

Régimen de Raleigh: Es característico en bajas velocidades de inyección, aproximadamente de 10 m/s. Aquí se producen deformaciones axisimétricas generadas por las perturbaciones que se encuentran en la parte superficial del chorro, y la tensión superficial. El aumento de las deformaciones generan gotas de igual diámetro.

Primer régimen inducido por interacción aerodinámica: Es producido a partir de que el proceso de inyección alcanza velocidades superiores a los 10 m/s, como resultado, comienzan a generarse oscilaciones en el chorro de combustible y se modifica a una forma helicoidal debido a fuerzas aerodinámicas.

Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica: Debido al incremento de la velocidad a la cual se produce el evento de inyección, se generan pequeñas fluctuaciones en la vena intacta, las cuales se incrementan hasta generar gotas de un tamaño reducido, las cuales se liberan de esta vena intacta.

Régimen de atomización: Se presenta a partir de un aumento en la presión a la cual se inyecta con separaciones de las gotas de combustible en la cercanía de los orificios situados en la tobera. Se presentan los fenómenos de cavitación y turbulencia, causados por la presencia de altas velocidades [16].

2.1.3 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

Los parámetros macroscópicos del chorro, tales como penetración, área y ángulo del chorro de combustible son empleados para caracterizar el proceso de mezcla aire-combustible que se presenta durante el proceso de combustión. Debido a ello, en el presente estudio se analizarán los parámetros macroscópicos del chorro, mostrados en la Figura 2.5.

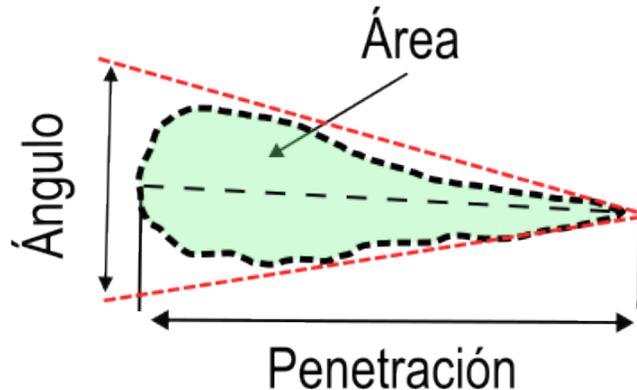


FIGURA 2.5: Parámetros macroscópicos del chorro.

Penetración: Se define como el recorrido del chorro desde la sección de salida de la tobera hasta el frente del chorro. Este parámetro se ve modificado por la presión con la que se inyecta el combustible, la contrapresión, diámetro de los orificios de la tobera, el coeficiente de descarga, densidad del combustible, cámara de combustión, ángulo del chorro y tiempo en que se efectúa la apertura del inyector.

Área: Hace referencia a la zona de cobertura del contorno del chorro inyectado, lo cual se ve afectado a partir de las condiciones de inyección. Este parámetro representa una mejoría en el proceso de mezcla aire-combustible, debido a que provoca un incremento en la zona de contacto entre el combustible y el aire [17].

Ángulo: Este parámetro se define como la apertura de dos semirrectas formadas a partir de las líneas tangenciales delimitadas por las zonas laterales del chorro, ubicado desde la tobera del inyector hasta la mitad de su distancia de penetración total. Este parámetro está influenciado por las condiciones de inyección del combustible, geometría de la tobera, propiedades termodinámicas en el interior de la cámara de combustión, así

como propiedades físicas del combustible, tales como la densidad, viscosidad y tensión superficial [18, 19].

2.1.4 ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN

Estrategia de inyección simple: Consiste en una única inyección de combustible durante un periodo de tiempo determinado.

Estrategia de inyección piloto: Esta estrategia consiste en dos eventos de inyección, el primero de ellos es una masa pequeña de combustible que ingresa al cilindro, seguida de una inyección con la masa principal del combustible.

Estrategia de post inyección: Consiste en dos eventos de inyección, donde en el primero de ellos se inyecta la masa principal de combustible, seguida de la inyección de una masa pequeña que ingresa al cilindro.

Estrategia de inyección dividida: La masa de combustible que ingresa al cilindro es seccionada en dos o tres eventos de inyección de igual magnitud [20].

A continuación, en la Figura 2.5 se muestran esquemáticamente las evoluciones temporales del caudal másico correspondientes a la inyección simple, la inyección piloto, la post-inyección, y la inyección dividida.

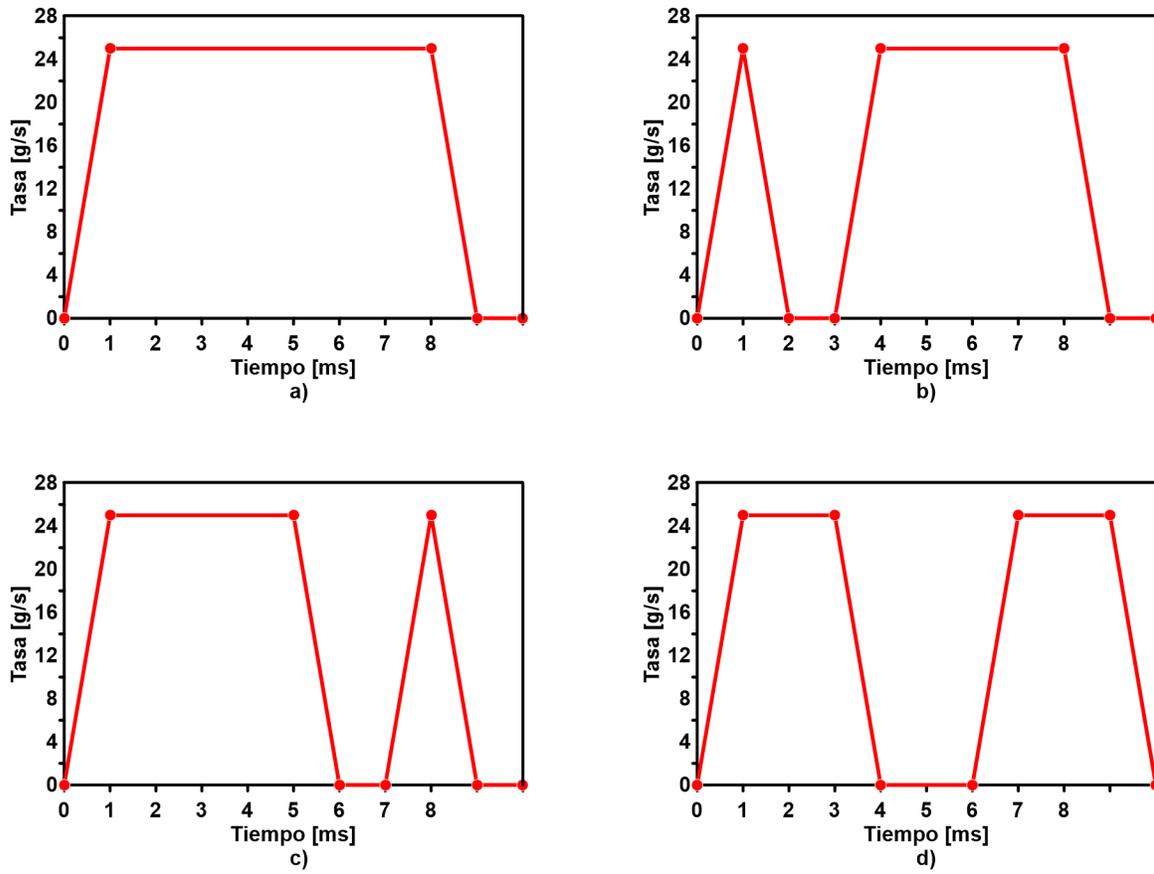


FIGURA 2.6: Representación esquemática de las estrategias de inyección: a) Inyección simple, b) Inyección piloto, c) Post inyección, d) Inyección dividida.

2.2 INFLUENCIA DEL BIODIÉSEL EN LAS CARACTERÍSTICAS DE COMBUSTIÓN

2.2.1 PRESIÓN DEL CILINDRO

Es la presión que se genera con la quema del combustible dentro de la cámara de combustión.

Qi et al. [21], evaluaron, entre otros aspectos, la presión del cilindro en un motor Diesel CRDI de cuatro tiempos, turboalimentado con “intercooler”, de seis cilindros con un diámetro de 100 mm y una carrera de 132 mm, con una cilindrada de 7.8 litros y una relación de compresión de 17.5, así como una presión de inyección máxima de 160 MPa empleando un inyector solenoide. Para ello, compararon el comportamiento de 2 mezclas de aceite de Tung, diésel y etanol (DT30E20 y DT30E40) y las compararon con diésel mineral. Encontraron que ambas mezclas producían una mayor presión del cilindro que el diésel mineral en condiciones de carga más bajas, siendo la mezcla DT30E40 la que presentó una mayor presión en el cilindro debido a su mayor retardo de encendido y una mejor atomización.

2.2.2 TASA DE LIBERACIÓN DE CALOR

Cantidad de energía térmica que se libera por unidad de tiempo como consecuencia del proceso de combustión.

Dubey et al. [22], estudiaron, entre otros aspectos, la tasa de liberación de calor para mezclas de biodiésel de *Jatropha* y aceite de trementina en proporciones de 100 %, 90 %, 70 % y 50 % así como diésel mineral en un motor de relación de compresión variable, de un solo cilindro, de aspiración natural de cuatro tiempos. Encontraron que todas las mezclas de biocombustibles y el diésel mineral siguen tendencias similares para cada una de las relaciones de compresión estudiadas (15.5, 17, 18.5 y 20). Esto se debe a las propiedades individuales de los combustibles de las mezclas, debido a que el aceite de trementina contiene un mayor poder calorífico y una menor viscosidad, así como un alto número de octano, lo cual provoca una mejor atomización y mezcla, y el biodiésel de *Jatropha*, el cual tiene una mayor viscosidad y bajo poder calorífico. De igual manera, una mayor relación de compresión trae como consecuencia una mayor temperatura en la cámara de combustión, por lo tanto, una mayor tasa de liberación de calor.

2.2.3 RETARDO DE ENCENDIDO

Tiempo que transcurre entre el momento en que se realiza la inyección y el inicio de la combustión. Este proceso es generado por procesos físicos como la atomización, la evaporación y la mezcla del combustible con el aire y procesos químicos como las reacciones previas a la combustión.

Dhamodaran et al. [23], estudiaron las características de emisión, combustión y rendimiento de mezclas en proporciones de 20 % de biodiésel de salvado de arroz, aceite de neem y semilla de algodón y 80 % diésel mineral en un motor monocilíndrico de cuatro tiempos de inyección directa de encendido por compresión, a una velocidad de 1500 rpm. En lo referente al retardo de ignición, descubrieron que la mezcla de biodiésel de salvado de arroz presentó el menor retardo de encendido. El retardo de encendido disminuyó como consecuencia del incremento de la carga del motor, esto debido al calor generado en ciclos generados anteriormente, la dilución de gases de escape y la temperatura de la cámara de combustión, además del incremento de la temperatura del cilindro y la tasa de vaporización del combustible.

2.2.4 DURACIÓN DE LA COMBUSTIÓN

Es el tiempo en el que transcurre el proceso de combustión en un motor. Esta se encuentra afectada por parámetros como el tipo de motor, el combustible, las condiciones de la cámara de combustión y los parámetros de inyección del combustible. El incremento en la duración de la combustión reduce la intensidad de la combustión y crea una distribución más uniforme de la energía que liberada durante el proceso de expansión [24].

Behçet et al. [25], estudiaron el rendimiento y las emisiones en mezclas de biocombustibles producidos a partir de desechos de pescado y aceite de cocina usado, en proporciones de 25 % biodiesel y 75 % diésel mineral en un motor Diesel, comparando ambas mezclas con diésel mineral. Descubrieron, entre otros aspectos, que la duración de la combustión

incrementa conforme aumenta la carga del motor, debido a que a cargas más altas se tiene una mayor inyección de combustible.

De igual manera, Khoa et al. [26], estudiaron los efectos de la duración de combustión empleando un motor de motocicleta de cuatro tiempos, dos cilindros en V y ocho válvulas refrigerado por aire. Descubrieron, entre otros aspectos, que la duración de combustión puede alargar el proceso de combustión hasta que el pistón se encuentre en el punto muerto inferior o en el tiempo de escape, perjudicando el tiempo de admisión posterior y el combustible del cilindro. Asimismo, una duración de combustión reducida produce una menor transformación de energía química del combustible en energía térmica. Sin embargo, si la duración de combustión es larga, genera una mayor pérdida de energía térmica, debido al incremento en la pérdida de calor.

2.3 INFLUENCIA DEL BIODIÉSEL EN EL RENDIMIENTO DEL MOTOR

2.3.1 EFICIENCIA TÉRMICA DEL FRENO

Medida que indica la eficiencia de un motor para convertir la energía térmica obtenida a partir de la combustión en trabajo mecánico útil.

Kumar et al. [27], estudiaron entre otros tópicos, la eficiencia térmica del freno empleando una mezcla B20 de biodiésel de mahua y comparándola con diésel mineral puro. Encontraron que la mezcla B20 presentó una mayor eficiencia térmica del freno en comparación con el diésel mineral, esto fue debido al mayor contenido de oxígeno en la mezcla, el cual acelera la combustión con una mayor liberación de calor. También observaron que esto podía incrementarse si se mejoraba la atomización del combustible, al emplear un diámetro menor en el orificio del inyector, promoviendo una mejor pulverización del combustible.

2.3.2 CONSUMO ESPECÍFICO DE COMBUSTIBLE PARA FRENOS

Medida que indica la cantidad de combustible necesaria para generar una determinada potencia de frenado.

Ghazikhani et al. [28], estudiaron el impacto de la recirculación de los gases de escape en el consumo específico de combustible de frenos (BSFC por sus siglas en inglés) en motores diésel de inyección directa. Emplearon un motor Perkins modelo 4.108 con cuatro cilindros, de aspiración natural, con una relación de compresión 22:1 y una velocidad máxima de 4500 rpm. Descubrieron, entre otros aspectos, que el BSFC aumenta al aumentar la recirculación de gases de escape, así como también al incrementar la carga del motor.

2.3.3 TEMPERATURA DE LOS GASES DE ESCAPE

Temperatura de los gases que resultan de la combustión, los cuales salen desde el cilindro a través del sistema de escape.

Singh et al. [29], evaluaron las características de la combustión, rendimiento y emisiones de un motor Diesel empleando mezclas de combustible. Se empleó biodiésel de aamla y aceite de eucalipto en mezclas AB100, AB90EU10, AB80EU20, AB70EU30, AB60EU40, AB50EU50 y comparadas con diésel mineral, empleando un motor monocilíndrico de cuatro tiempos, de inyección directa, marca Kirloskar.

Encontraron, entre otros aspectos, que la combustión se efectúa de mejor manera con una baja temperatura en los gases de escape, mejorando el rendimiento del motor. La temperatura de los gases de escape se incrementa conforme aumenta la carga del motor.

Las mezclas con un menor número de cetano muestran una mayor temperatura de los gases de escape en comparación con el diésel mineral, debido a una combustión acelerada y, por lo tanto, una mayor liberación de calor. Las mezclas con menor poder calorífico muestran una menor temperatura de los gases de escape, debido a la menor liberación de energía durante el proceso de combustión.

2.3.4 PAR MOTOR

Fuerza de rotación generada en el eje de un motor.

Gautam et al. [30], analizaron el rendimiento de un motor Diesel empleando mezclas B10, B20 y B30 de biodiésel de sebo, comparándolas con diésel mineral. Emplearon un motor monocilíndrico de cuatro tiempos marca Kirloskar, refrigerado por agua. Observaron, entre otros aspectos, que el par motor se incrementa conforme aumenta la carga del motor debido al aumento de la potencia de salida. Se obtuvieron valores de par motor superiores para el diésel mineral en comparación con todas las mezclas estudiadas, esto es debido al menor poder calorífico que presenta el biodiésel [31].

2.3.5 POTENCIA DE FRENADO

Cantidad de trabajo que realizan los frenos de un vehículo para poder detenerlo en una distancia determinada.

Khoobakht et al. [32], estudiaron el desempeño de un motor Diesel de inyección directa, con cuatro cilindros modelo OM 314 marca Tabriz, empleando mezclas de biodiesel-etanol-diesel. Encontraron, entre otros aspectos, un aumento en la potencia de frenado del motor al incrementar la carga del motor, debido al aumento en la temperatura de la cámara de combustión, lo que ocasionó una combustión más completa en comparación a las cargas más bajas. Se observó que un incremento del biodiésel en la mezcla disminuyó la

potencia de frenado, esto debido al menor poder calorífico y mayor viscosidad del biodiésel. De igual manera, la potencia de freno del motor se redujo con la adición de etanol, esto debido a su bajo índice de cetano, lo que conllevó a un retraso en el encendido del motor y a una combustión incompleta.

2.4 BIODIÉSEL Y SU IMPACTO EN LAS EMISIONES

2.4.1 HUMO

Sustancia formada por un hidrógeno y ocho partes de carbono.

Asokan et al. [33], estudiaron el rendimiento y las emisiones de mezclas binarias de aceite de cártamo en proporciones de B20, B30, B40 y B100, comparando su comportamiento con el diésel mineral. Para ello, emplearon un motor monocilíndrico de cuatro tiempos, con una velocidad constante de 1500 rpm y relación de compresión de 17.5:1. Encontraron, entre otros aspectos, que la emisión de humo para todas las mezclas eran menores en comparación con la emitida por el diésel mineral. Esto debido a una mayor temperatura de reacción, lo que genera una mayor velocidad de llama, incrementando la tasa de oxidación.

2.4.2 MATERIAL PARTICULADO (PM)

Partículas sólidas y líquidas, productos de una combustión incompleta.

Nabi et al. [34], estudiaron las emisiones del diésel puro y mezclas diésel-butanol en proporciones B10, B20 y B30, para ello emplearon un motor diésel common-rail turboalimentado de 6 cilindros y una relación de compresión de 17.3:1. Encontraron, entre otros aspectos, que las emisiones de material particulado en ambas mezclas son menores que las del diésel puro, esto debido a la mayor cantidad de oxígeno que aporta el biodiésel y

su nula cantidad de aromáticos, lo que evita la aparición de hollín, reduciendo el material particulado.

2.4.3 DIÓXIDO DE CARBONO (CO_2)

Gas inodoro e incoloro compuesto de dos átomos de oxígeno y un átomo de carbono.

Kodate et al. [35], investigaron las emisiones generadas por un biodiésel de semilla de Dhupa precalentado en mezclas B30, B50 y B100, así como diésel mineral como referencia a temperaturas de 35, 45, 55, 65, 75, 85 y 95 °C. Para ello, emplearon un motor diésel TV1 Kirloskar, monocilíndrico de cuatro tiempos. Encontraron, entre otros aspectos, un incremento en las emisiones de CO_2 conforme se aumentó la proporción de biodiésel en las mezclas, esto debido al mayor contenido de oxígeno del biodiésel, lo que promueve la oxidación del CO en CO_2 durante el proceso de combustión. Debido al precalentamiento de combustible se obtuvo una reducción en la viscosidad del combustible, mejorando el proceso de atomización. Es por ello, y debido a lo mencionado anteriormente, que el combustible B100 obtuvo una emisión máxima de CO_2 a una temperatura de 95 °C.

2.4.4 MONÓXIDO DE CARBONO (CO)

Gas tóxico producido por una combustión incompleta de combustibles con contenido de carbono.

Uyumaz et al. [36], estudiaron las emisiones generadas por mezclas de combustible diésel y biodiésel de aceite de amapola en proporciones B10 y B20, así como diésel puro como referencia. Para ello emplearon un motor diésel monocilíndrico de cuatro tiempos, de aspiración natural y con una relación de compresión de 18:1. Encontraron, entre otros aspectos, un incremento de CO al aumentar la carga del motor debido a una menor concentración de oxígeno en la cámara de combustión con cargas elevadas, lo cual evita

la oxidación de las moléculas de combustible. De igual manera, se observó una reducción en la emisión de CO conforme se incrementó la proporción de biodiésel en la mezcla, esto debido a su mayor contenido de oxígeno en comparación con el diésel mineral.

2.4.5 HIDROCARBUROS NO QUEMADOS (UHC)

Compuestos que se liberan a la atmósfera posterior al proceso de combustión, generados por una quema incompleta de hidrocarburos. Son una mezcla de varios compuestos, como el metano, etano, propano, benceno y butano.

Raman et al. [37], estudiaron las emisiones producidas en un motor diésel, empleando mezclas de biodiésel de aceite de mahua y diésel con alto contenido de azufre (B5, B10, B15 y B20), así como mezclas de biodiésel de aceite de mahua, diésel con alto contenido de azufre y éter dietílico (AD-10 y AD20). Emplearon un motor bicilíndrico marca Kirloskar, refrigerado por agua, con una relación de compresión de 17.5:1. Encontraron, entre otros aspectos, un incremento en las emisiones de UHC conforme se incrementó la carga del motor. La mezcla AD20 presentó la menor cantidad de emisiones de UHC para todas las condiciones de carga del motor, esto puede deberse a su menor viscosidad, densidad y un mejor proceso de mezcla. El aumento de éter dietílico promueve la reducción de UHC, esto debido a que mejora el proceso de combustión debido a un mayor índice de cetano y al mayor contenido de oxígeno del biodiésel de aceite de mahua.

2.4.6 ÓXIDOS DE NITRÓGENO (NOx)

Compuesto químico formado a alta temperatura por una reacción de nitrógeno en el aire con oxígeno.

Badawy et al. [38], analizaron las emisiones producidas por un biodiésel de *Jatropha* con aditivos de nano tubos de carbono en comparación con el diésel mineral. Para ello se

empleó un motor diésel DEUTZ F1L511 monocilíndrico de 4 tiempos, refrigerado por aire y con un sistema de inyección directa common-rail. Encontraron, entre otros aspectos, que las emisiones de NOx para el biodiésel se reducen al agregar los nano tubos de carbono, siendo inferiores a las del diésel mineral. Esto debido a la mejoría en la transferencia de calor que provoca la adición de los nano tubos de carbono, lo que reduce la temperatura del cilindro y disminuye la formación de NOx térmico. De igual manera, los nanotubos disipan de mejor manera el calor generado dentro de la cámara de combustión, lo que reduce las temperaturas y minimiza la formación de NOx, esto debido a que a mayor temperatura, el aire se oxida al reaccionar con el oxígeno con mayor facilidad.

2.5 PROPIEDADES FISICOQUÍMICAS DEL BIODIÉSEL Y SUS MEZCLAS

Actualmente, debido a las limitaciones de combustibles fósiles que se presentan, se ha optado por buscar alternativas a éstos, donde las características de los biodiésel son una alternativa para su sustitución. Para que un biodiésel pueda ser considerado apto para emplearlo en motores de encendido por compresión debe cumplir con determinadas normativas impuestas por cada país en relación a las propiedades físicoquímicas del combustible. Ejemplo de ello son las normas EN14214 en EU, ASTM D6751 en USA, IS 15067 en India, JASO M360 en Japón, SANS 1935 en Sudáfrica y la ANP 42 en Brasil [39].

Diversos estudios afirman que no se requieren modificaciones en los motores Diésel para que se puedan utilizar mezclas binarias diésel-biodiésel en una proporción de hasta 20% de biodiésel en motores de combustión interna [39]. Sin embargo, además de las normativas es importante analizar las propiedades físicoquímicas, tales como la densidad, viscosidad, punto de inflamabilidad, poder calorífico, estabilidad a la oxidación y número de cetano del combustible para poder asegurar la calidad del mismo; las cuales se describen a continuación.

La densidad hace referencia a la masa que tiene un cuerpo o sustancia en relación al volumen que ocupa, la cual varía dependiendo la presión y la temperatura a la cual se encuentre dicha sustancia. Esta repercute en la eficiencia del motor, el proceso en el que se desarrolla la combustión, y está relacionada con el número de cetano y la viscosidad. En general, las densidades de los biocombustibles son ligeramente mayores a las del diésel comercial, y son directamente proporcionales a la cantidad de biodiésel en la mezcla.

La viscosidad es la resistencia a fluir propia de una sustancia. Esta propiedad determina el comportamiento en que se desarrolla el proceso de inyección. Una elevada viscosidad provoca una mala atomización y vaporización del combustible, lo cual genera un incremento en las emisiones de escape.

El punto de inflamabilidad, es la medida de inflamabilidad de un combustible, la cual se produce debido a su composición química, para lo cual en un biodiésel es mayor en comparación al diésel mineral. Es por ello, que el biodiésel puede considerarse óptimo para su almacenamiento, manipulación, y transporte.

El poder calorífico, es la energía que se libera cuando se quema un combustible. Un mayor poder calorífico se traduce en una mejor liberación de calor durante el proceso de combustión, mejorando el rendimiento del motor. Sin embargo, el poder calorífico del diésel mineral es mayor al del biodiésel, ya que estos últimos poseen una mayor cantidad de oxígeno.

La estabilidad a la oxidación, se define como la capacidad del biodiésel para mantener su composición interna sin degradarse al ser almacenado por largos periodos de tiempo. Este parámetro se modifica por factores como la presencia de aire, calor, peróxidos, luz y composición de ácidos grasos. En general, los biodiéseles son menos resistentes a la oxidación, y por lo tanto, a la generación de productos de la oxidación, tales como la formación de gomas y cedimentos, la acidificación y, la pérdida de poder calorífico.

El número de cetano, determina el tiempo de ignición en el interior de la cámara de combustión, delimita la calidad de ignición y generalmente está asociado al biodiésel [40, 41].

Si un biodiésel cumple con los parámetros adecuados en relación a las características mencionadas anteriormente, es posible utilizarlo y aprovechar de esta manera las características que aporta, tales como su mayor contenido de oxígeno, número de cetano y punto de inflamación más elevados y la reducción de las emisiones de PM, UHC y CO [42, 43].

2.6 VÍAS PARA REDUCIR LA VISCOSIDAD DE UN COMBUSTIBLE

Para reducir los elevados niveles de viscosidad del biodiésel se utilizan diversas técnicas, algunas de ellas son el precalentamiento, la adición de aditivos y la inyección del biocombustible a elevados niveles de presión de inyección.

2.6.1 PRECALENTAMIENTO

Diversos autores han empleado el precalentamiento de mezclas de combustible diésel-biodiésel para mejorar la atomización. Anis et al. [44], analizaron el comportamiento que producía el precalentamiento del combustible sobre el proceso de inyección de mezclas B10, B20, B30, B50 y B100 de biodiésel de aceite de cocina, tomando el diésel como referencia. Se emplearon temperaturas de 30, 40, 50, 60 y 70 °C con un inyector mono-orificio. Observaron un incremento en el área y el ángulo al aumentar la temperatura de precalentamiento de las mezclas, una reducción en el ángulo del chorro en mezclas con mayor contenido de biodiésel. Se obtuvieron relaciones óptimas de temperatura en base a la viscosidad y densidad óptimas que debería alcanzar cada mezcla al ser comparadas con el diésel.

De igual manera, Kumar et al. [45], analizaron el efecto del precalentamiento de mezclas derivadas de aceite de ricino en las prestaciones de un motor Diesel. Emplearon un inyector de 6 orificios con una presión de 24 MPa y una temperatura de 70 °C a la

entrada del motor. Descubrieron que el precalentamiento de las mezclas mejoró el proceso de mezcla al reducir la viscosidad del biodiésel, teniendo como consecuencia una mejora en el proceso de atomización de combustible, y reducción de emisiones.

2.6.2 ADITIVOS

Por otro lado, otros autores han estudiado el efecto que tienen los aditivos sobre los combustibles. Senthur et al. [46], emplearon aditivos de n-butanol y Butilhidroxilo Tolueno (BHT) en mezclas de aceite de palma y diésel en proporciones con 20, 30 y 40 % de biodiésel precalentadas a 60 °C a través del calor generado en los gases de escape en un motor mono-cilíndrico de 4 tiempos. Evaluaron aspectos como el consumo de combustible específico del freno, eficiencia térmica del frenado, tasa de liberación de calor, emisiones, presión del cilindro y, la temperatura en los gases de escape. Encontraron que los aditivos mejoran el rendimiento y las emisiones de las mezclas en comparación con el diésel mineral.

De igual manera, en estudios relacionados a la implementación de aditivos, Sharma et al. [47], estudiaron mezclas de biodiésel producido a partir de aceite usado de cocina, diésel mineral y butanol mezclado con aditivos a partir de nanopartículas de grafeno y grafito. Se añadieron 50 y 100 ppm de cada aditivo en las diferentes mezclas, y se evaluaron en un motor Diesel de tres cilindros empleando diversas cargas. Entre otros hallazgos, observaron que se generó una mayor eficiencia térmica de frenado en el combustible que contenía aditivos, así como una reducción de emisiones de NOx.

2.6.3 PRESIÓN DE INYECCIÓN

Finalmente, a través de la literatura consultada, se investigó los efectos que tienen las altas presiones de inyección en las características macroscópicas del combustible. Diversos estudios demuestran los cambios que sufren los parámetros macroscópicos de un combustible al someterlo a elevadas presiones de inyección. El trabajo de Zhong et al. [2]

en mezclas de combustible que van desde B10, B20, B30 y B50 reporta que la penetración se ve incrementada al aumentar la presión a la cual se inyecta el combustible, asimismo, la densidad produce un mayor efecto en la longitud líquida.

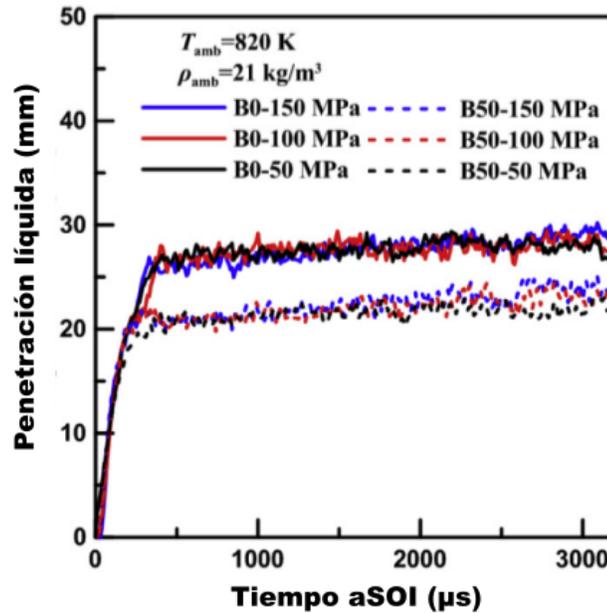


FIGURA 2.7: Efecto de la presión de inyección sobre la penetración del chorro (Adaptado de Zhong et al. [2]).

Por otro lado, Bohl et al. [18], en su investigación de los parámetros macroscópicos del biodiésel de última generación en un inyector de 8 orificios a 80 °C empleando niveles de presión de 60 y 180 MPa, observó que los combustibles con viscosidades más elevadas poseen ángulos de cono reducidos. Los valores para el ángulo y la penetración aumentaron ligeramente con el incremento de la presión a la cual se inyecta el combustible. De igual manera Lee et al. [3], en su análisis de las características de la inyección para biodiésel producido a partir de Karanja en estado puro y en mezclas del 40 y 60% empleando presiones de 50, 100 y 150 MPa en un inyector de 6 orificios con un diámetro de orificio de 0.128 mm. Encontraron una penetración más prolongada a elevadas presiones de inyección.

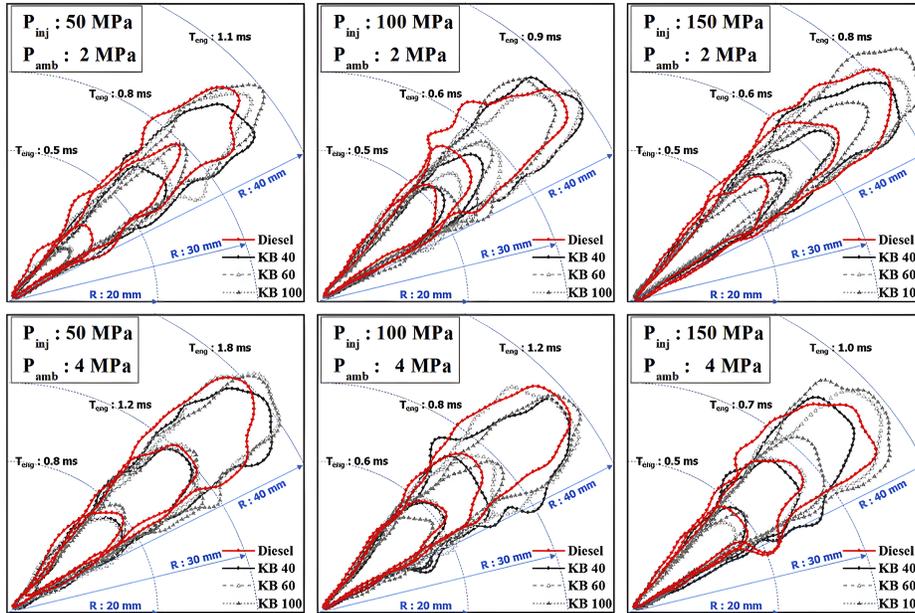


FIGURA 2.8: Efecto de la presión de inyección sobre la penetración del chorro (Adaptado de Lee et al. [3]).

De manera similar Corral et al. [4], al estudiar los efectos de mezclas con una fracción del 5, 10 y 20 % de etanol y una fracción de 10, 20, 30 y 40 % de biodiesel en volumen en los parámetros macroscópicos del chorro en un sistema de inyección diésel common-rail, y empleando los niveles de presión de inyección de 100 MPa y 130 MPa. Observaron un incremento en el ángulo de cono, aunque no se presentaron cambios significativos en lo que respecta a la penetración.

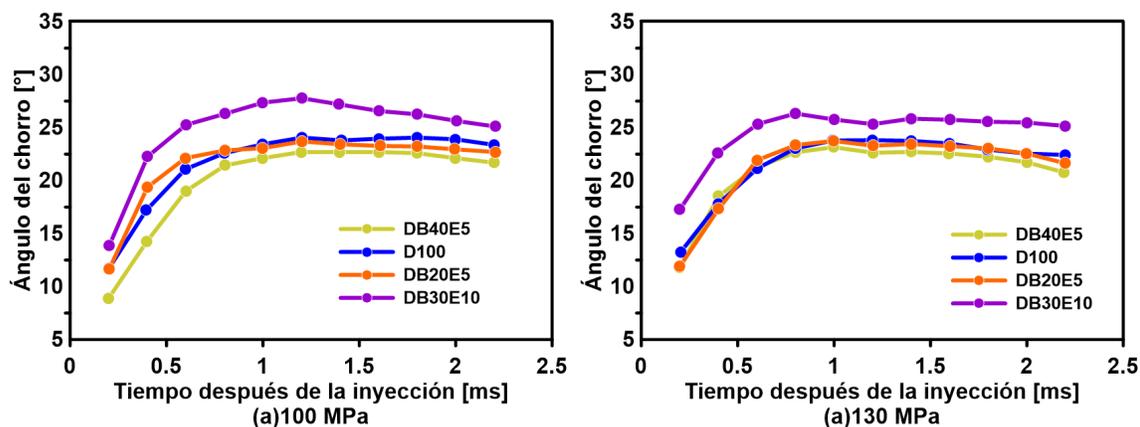


FIGURA 2.9: Efecto de la presión de inyección sobre el ángulo del chorro (Adaptado de Corral et al. [4]).

Por lo tanto, debido a que en la literatura no se encuentra información sobre los parámetros macroscópicos del biodiésel de aceite de ricino, se plantea utilizar elevados niveles de presión de inyección para poder compensar los efectos negativos de la viscosidad de este biodiésel en una mezcla de 20% biodiésel con 80% diésel mineral. Esto con la finalidad de que sus parámetros macroscópicos de penetración, ángulo y área puedan ser equiparables al diésel mineral.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

Se presenta de manera sintetizada la revisión de la bibliografía consultada, a partir de la cual se realizó la formulación de la hipótesis para posteriormente establecer cada uno de los objetivos. Para el cumplimiento de estos últimos, se estableció la metodología general que se describe a continuación.

3.1 SÍNTESIS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Con el objetivo de encontrar fuentes alternativas de combustibles que puedan reducir los efectos adversos que provocan las emisiones que desprenden durante su utilización, se plantea el análisis de un biodiésel elaborado a partir del aceite de ricino. Para poder utilizarlo en motores de encendido provocado es necesario realizar su evaluación previa mediante diversas propiedades. En este estudio se analizaron los parámetros macroscópicos del chorro.

Previamente se realizó el análisis de literatura relacionada con los parámetros macroscópicos de este combustible y otros biocombustibles empleando elevados niveles de presión de inyección. Diversos autores han encontrado que la penetración aumenta a medida que se incrementa la presión, así como observar que la densidad tiene un mayor efecto en la longitud líquida del combustible.

Asimismo, se ha observado que los combustibles con viscosidades más altas llegan a tener ángulos de cono reducidos, provocando también una disminución en el área de distribución de la mezcla aire combustible, lo que da como resultado una fase de combustión premezclada más larga.

Otros autores afirman que para una presión de combustible más elevada, se observan penetraciones más prolongadas para un biodiésel y sus mezclas.

En cuanto al estudio de una mezcla B20 de biodiésel derivado de aceite de ricino se esperarían resultados similares a los reportados en la literatura obtenidos para otros biocombustibles. Se plantea este estudio debido a que la información encontrada sobre este combustible se enfoca en su evaluación mediante estudios de eficiencia mecánica y de manera química, por lo que se desconocen las propiedades de sus parámetros macroscópicos, así como su análisis empleando elevados niveles de presión de inyección.

Por lo tanto, a partir de la literatura recabada se puede destacar la importancia del estudio de un combustible alternativo y las tendencias que tienen los efectos de estos ante elevados niveles de presión de inyección. Destacando la relevancia del estudio de las mezclas de un biocombustible a base de aceite de ricino para su aplicación en motores de encendido provocado a elevados niveles de presión de inyección referenciándolo con el diésel comercial.

3.2 HIPÓTESIS

A partir del análisis realizado de la literatura se plantea la siguiente hipótesis para esta investigación:

Los niveles elevados de viscosidad, densidad y tensión superficial de un biodiésel derivado de aceite de ricino afectan su atomización, provocando un mal proceso de mezcla. Se ha observado que un aumento de la presión de inyección modifica el proceso de atomización, por lo que se plantea que al incrementar la presión de inyección de una mezcla B20 de aceite de ricino ésta pueda tener un comportamiento similar al diésel mineral.

3.3 OBJETIVOS

3.3.1 OBJETIVO GENERAL

Estudiar el comportamiento de una mezcla binaria de un biodiésel derivado de aceite de ricino con diésel convencional mediante la caracterización de su proceso de mezcla.

3.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Con la finalidad de cumplir con el objetivo general propuesto, se presentan los siguientes objetivos específicos:

1. Preparación de la mezcla binaria diésel-biodiésel de aceite de ricino.
2. Determinar las propiedades fisicoquímicas de la mezcla de estudio, como son la viscosidad, densidad y tensión superficial, así como también las del diésel convencional.
3. Caracterizar los parámetros macroscópicos de los combustibles de estudio de manera experimental empleando una cámara de visualización a volumen constante, además de una cámara de alta velocidad. Seguidamente, las imágenes obtenidas del chorro líquido, serán procesadas empleando un algoritmo desarrollado en el software MATLAB, con la finalidad de determinar los parámetros macroscópicos del chorro.

3.4 METODOLOGÍA GENERAL UTILIZADA

■ Preparación de las mezclas de estudio

Se define la proporción de diésel-biodiésel de aceite de ricino en la mezcla objeto de estudio, siendo ésta B20. Se lleva a cabo un proceso de filtrado para cada una de ellas, con el objetivo de eliminar partículas que pudieran afectar al sistema de inyección diésel common-rail.

■ Evaluación de las propiedades fisicoquímicas

Se determinan las propiedades de viscosidad, densidad y tensión superficial de los combustibles objeto de estudio. Cada una de estas propiedades interviene en los parámetros de estudio.

■ Verificación del correcto funcionamiento de las instalaciones experimentales

Se verifica el correcto funcionamiento de la cámara de visualización a volumen constante utilizada previo a efectuar los ensayos experimentales, verificando el estado de los sensores y actuadores que intervienen en el equipo experimental, así como los equipos de monitoreo del estado de la instalación.

- **Definición de la matriz experimental**

Para la determinación de los parámetros macroscópicos del chorro, la presión a la cual se inyecta el combustible y el tiempo de energización se definieron teniendo en cuenta la literatura consultada de trabajos similares, así como de estudios realizados previamente por ingenieros del mismo laboratorio.

- **Ejecución de proceso experimental**

Se analizan de manera experimental los parámetros macroscópicos para cada combustible objeto de estudio, obteniendo imágenes de cada uno de los fenómenos de estudio, las cuales son procesadas mediante un código desarrollado en MATLAB.

- **Análisis de resultados**

Se presentan los resultados del estudio de manera gráfica, obteniendo datos referentes a penetración, ángulo y área del chorro.

CAPÍTULO 4

METODOLOGÍA

A continuación se presenta y describe la configuración experimental empleada para la visualización del chorro de combustible. Asimismo, se determinaron las condiciones de operación utilizadas durante cada ensayo experimental. Finalmente, se expone el procedimiento para el procesamiento de las imágenes del chorro líquido.

4.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL

El sistema de inyección diésel common-rail empleado en el presente estudio está dividido en tres principales sistemas: sistema hidráulico, sistema de control y sistema de adquisición de imágenes. Asimismo, el sistema hidráulico se encuentra conformado por dos circuitos, uno de alta y otro de baja presión, respectivamente, una cámara de visualización a volumen constante, el sistema de iluminación y de inyección. Por otro lado, el sistema de control está encargado de monitorear y enviar las señales de presión y tiempos de energización de los eventos de inyección.

Finalmente, para la captura de imágenes de los chorros de combustible objeto de estudio, se emplea la técnica de iluminación directa por dispersión Mie, la cual se detallará mas adelante en este documento. El diagrama del montaje experimental se presenta a continuación en la Figura 4.1.

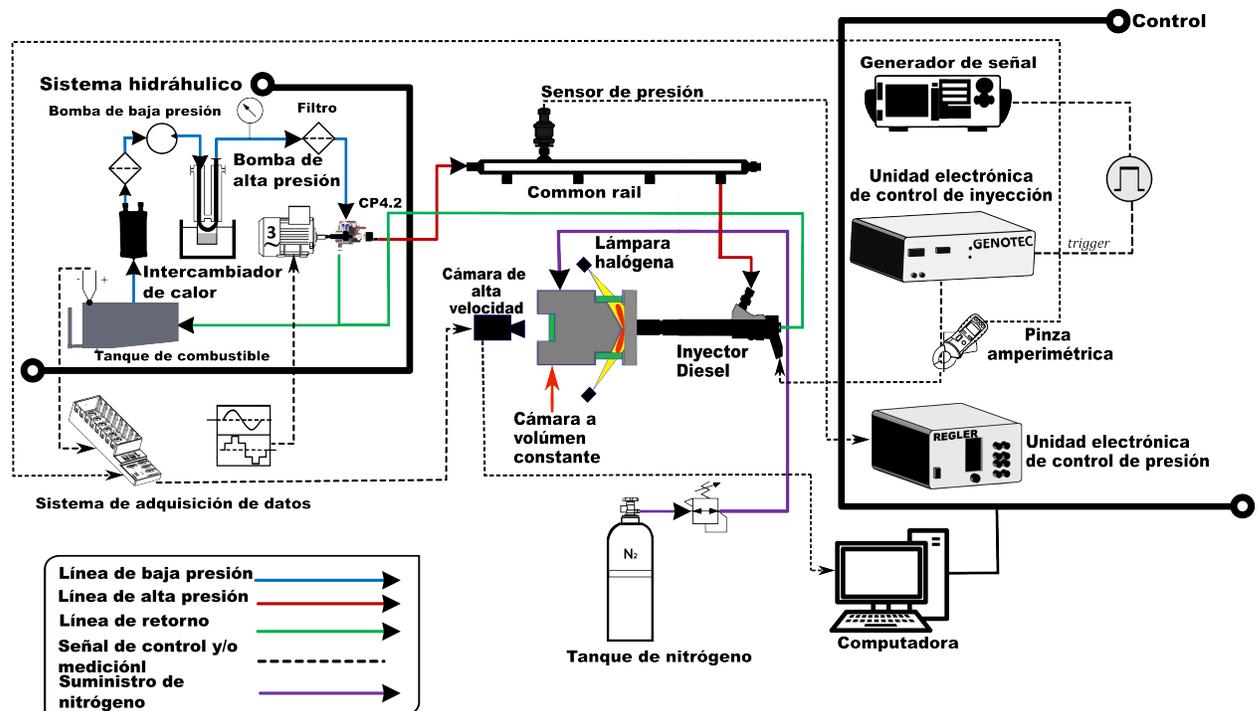
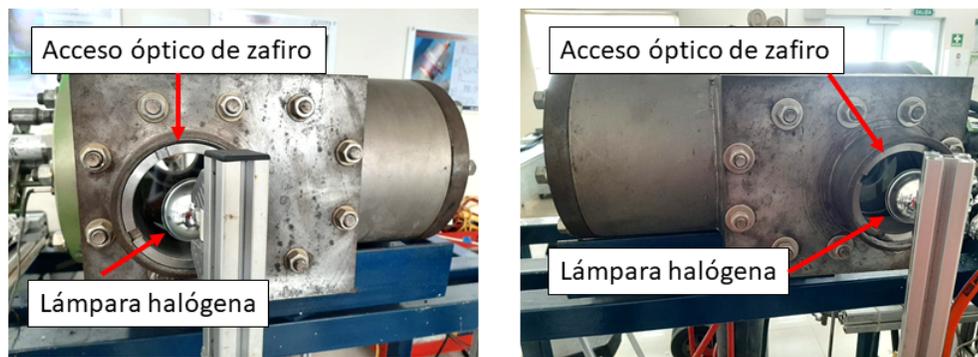


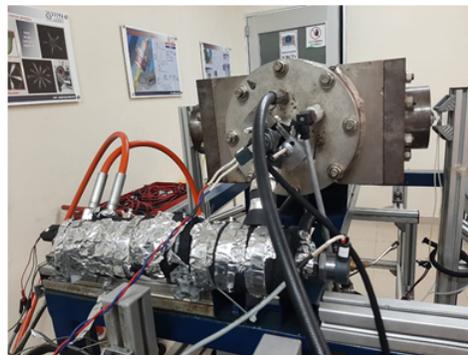
FIGURA 4.1: Diagrama del montaje experimental empleado para la visualización del chorro líquido (Adaptado de Rodríguez et al. [5]).

4.1.1 MAQUETA DE VISUALIZACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

A continuación, en la Figura 4.2 se ilustra la maqueta de visualización a volumen constante, la cual cuenta con tres accesos ópticos de zafiro, dos de ellos ubicados en los laterales de la maqueta, y el otro en la parte trasera de la misma. Los accesos laterales se utilizan para iluminar el evento de inyección empleando lámparas de halógeno de 100 W, con ello se analiza la inyección de combustible utilizando la técnica óptica de iluminación directa por dispersión Mie. Esta cámara de visualización tiene como objetivo simular las condiciones que se presentan internamente en la cámara de combustión de un motor Diesel, utilizando nitrógeno para reproducir las condiciones de contrapresión.



a) Vistas laterales



b) Vista trasera



c) Vista frontal

FIGURA 4.2: Cámara de visualización a volumen constante.

4.1.2 SISTEMA HIDRÁULICO DE BAJA PRESIÓN

4.1.2.1 ALMACENAMIENTO Y FILTRADO DE COMBUSTIBLE

El sistema se encuentra constituido por un tanque de combustible que se muestra en la Figura 4.3, el cual tiene una capacidad aproximada de 20 litros y está ubicado al costado del banco de pruebas. Dispone de una válvula manual conectada a un purgador, éste libera el aire que pudiera estar contenido al interior del sistema. Esto con el propósito de evitar un mal funcionamiento en la bomba de alta presión, debido a que su diseño sólo le permite mover líquidos. El proceso de purga se realiza cada vez que se enciende el sistema, ya que el aire que se encuentra almacenado en el interior del tanque de combustible podría ingresar a las líneas de suministro.

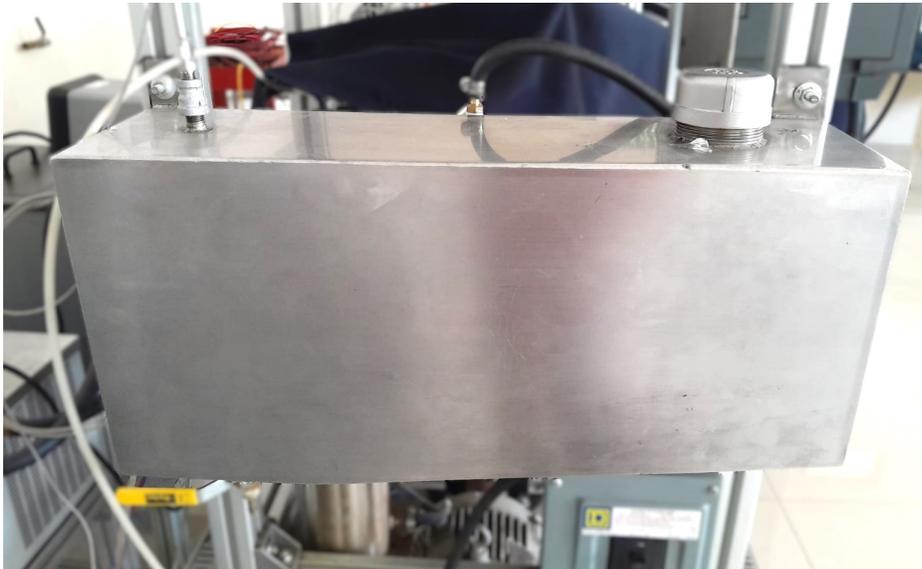


FIGURA 4.3: Tanque de combustible.

En la Figura 4.4, se muestra el sistema de filtrado, el cual está compuesto de dos filtros de cartucho, ubicados en las entradas de las bombas de alta y baja presión, respectivamente. Este sistema tiene como objetivo evitar la entrada de partículas sólidas al sistema de inyección diésel common-rail.

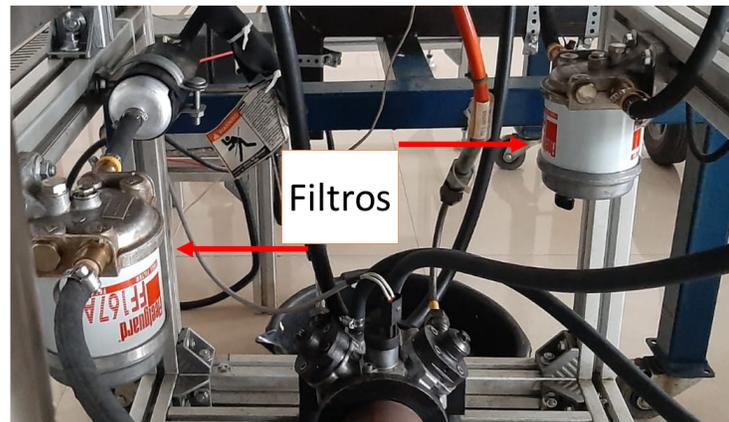


FIGURA 4.4: Filtros de cartucho para combustible.

Una vez filtrado el combustible, éste circula a través de las líneas de combustible hasta el sistema de alta presión empleando una bomba de baja presión, mostrada en la Figura 4.5, la cual opera empleando un voltaje de CC de 12 V y una corriente que no excede los 3 A, produciendo una presión máxima de 0.4 MPa.



FIGURA 4.5: Bomba de combustible de baja presión.

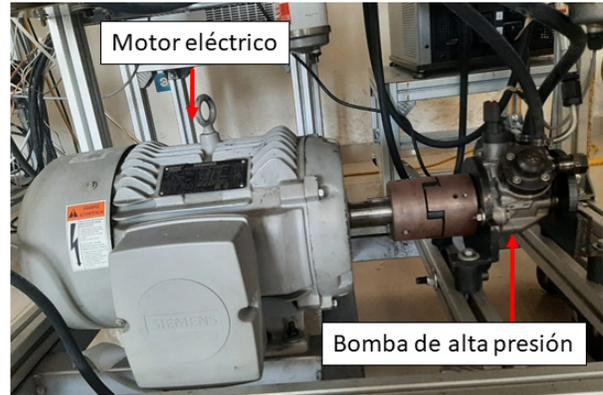
4.1.3 SISTEMA HIDRÁULICO DE ALTA PRESIÓN

Se compone de un motor eléctrico marca SIEMENS modelo GP199, el cual proporciona la velocidad de rotación requerida para accionar la bomba de alta presión modelo

CP4.2, ésta trabaja en un rango de presión de inyección de 23 a 270 MPa. La velocidad del motor eléctrico es controlada mediante un inversor marca SIEMENS modelo micromaster 420. Tanto el variador de frecuencia como el conjunto motor eléctrico-bomba, se muestran a continuación en la Figura 4.6.



a) Variador de frecuencia



b) Motor eléctrico y bomba de alta presión

FIGURA 4.6: Componentes del sistema hidráulico de alta presión.

4.1.4 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

Una vez que el combustible llega hasta el rail, se dirige hasta un inyector diésel tipo solenoide instalado en el interior de la cámara de visualización a volumen constante. Este sistema está compuesto por un rail fabricado en acero, con el objetivo de contener el combustible a una alta presión. Está equipado con un sensor de presión de la marca Bosh; el cual permite conocer la presión exacta a la cual se está trabajando, y una válvula reguladora de presión; la cual permite ajustar la presión contenida en el rail suministrando combustible o enviando el resto a la línea de retorno ubicada en el rail. Tanto la válvula reguladora de presión como el sensor encargado de monitorear la presión se encuentran situados cada uno en un extremo del rail. Asimismo, el rail cuenta con un total de ocho conexiones, en las cuales se conectan las mangueras de entrada de combustible, y los inyectores. En la Figura 4.7, se ilustran cada uno de los elementos descritos anteriormente.

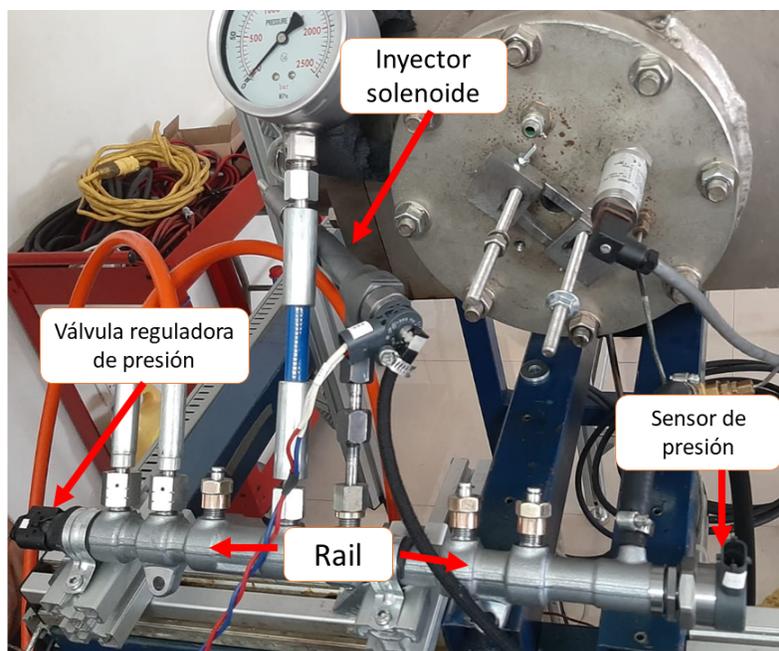


FIGURA 4.7: Componentes del sistema de inyección diésel common-rail.

4.1.5 SISTEMA DE ENFRIAMIENTO

Para reducir la temperatura a la cual se encuentra el combustible en la instalación experimental, se cuentan con dos conjuntos de intercambiadores de calor acoplados cada uno a un baño térmico. Los intercambiadores se encuentran situados en la línea de retorno del sistema common-rail, y en la salida de la bomba de baja presión. Los baños térmicos acoplados a cada uno de los conjuntos de intercambiadores de calor son de la marca PolyScience, los cuales disponen de 6 y 15 litros de refrigerante máximo cada uno. Esto con el objetivo de mantener una temperatura aproximada del combustible en el interior del tanque a 40 °C. Cada uno de los componentes encargados de mantener la temperatura óptima del equipo se muestran a continuación en las Figuras 4.8, 4.9, y 4.10.

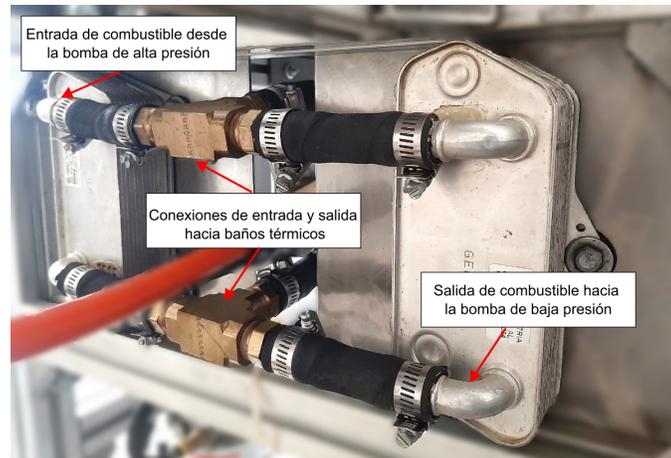


FIGURA 4.8: Conjunto de intercambiadores de calor 1.

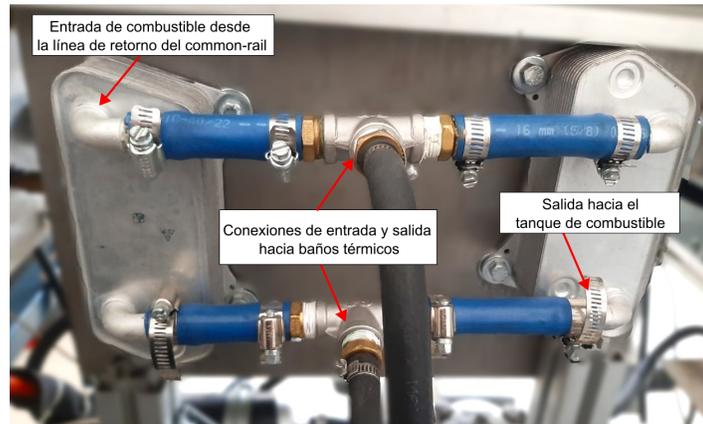


FIGURA 4.9: Conjunto de intercambiadores de calor 2.



FIGURA 4.10: Baños térmicos.

4.1.6 SISTEMA DE CONTROL

La instalación experimental cuenta con sistemas de control para la inyección y la regulación de presión. Se tiene un sistema de control para el proceso de inyección, el cual está encargado de regular la presión, frecuencia, duración y estrategia de inyección. Este equipo opera a través de un generador de onda cuadrada, con características de 2.5 V de amplitud y frecuencia de 2 Hz, cada uno de estos dos equipos se muestran en la Figura 4.11. Otro sistema de control regula la presión a la cual se produce el evento de inyección. Mediante el software de control de este equipo se establece la presión requerida y el nivel de apertura de la válvula de flujo de combustible, así como los datos de la curva característica generada por el sensor de presión ubicado en el rail.



FIGURA 4.11: Equipos de control a) Unidad de control de inyección Genotec, b) Generador de onda cuadrada.

4.1.7 SISTEMA DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES

El sistema utilizado para adquirir las imágenes del chorro líquido cuenta con elementos como una cámara de alta velocidad, y lámparas de halógeno. Sin embargo, se emplea una técnica de iluminación particular, la técnica óptica de iluminación directa por dispersión Mie. Más detalles sobre el sistema de adquisición de imágenes se dan a continuación.

4.1.7.1 CÁMARA DE ALTA VELOCIDAD

El modelo CMOS Motion PRO X4 de alta velocidad capaz de grabar y capturar hasta 7,000 fotogramas por segundo, equipado con una lente Nikon de 60 mm, fue utilizada para adquirir las imágenes durante el proceso de inyección. En la Figura 4.12, se muestra una imagen de la cámara de alta velocidad empleada en el presente estudio.



FIGURA 4.12: Cámara de alta velocidad.

4.1.7.2 TÉCNICA ÓPTICA DE ILUMINACIÓN DIRECTA POR DISPERSIÓN MIE

Para describir el proceso de mezcla y poder visualizar los parámetros macroscópicos del chorro, se utilizó la técnica óptica de iluminación directa por dispersión Mie. Esta técnica funciona a partir de la obtención de imágenes de la inyección del chorro de combustible mediante la utilización de una cámara de alta velocidad a través de la iluminación directa del chorro [48]. La señal enviada para la adquisición de imágenes se realizó mediante la lectura de la señal que es enviada a la bobina del inyector captada a través de una pinza amperimétrica. La señal es enviada al equipo de cómputo, el cual activa la cámara de alta velocidad y adquiere las imágenes del evento de inyección.

A continuación, en la Figura 4.13 se muestra el arreglo experimental empleando esta técnica.

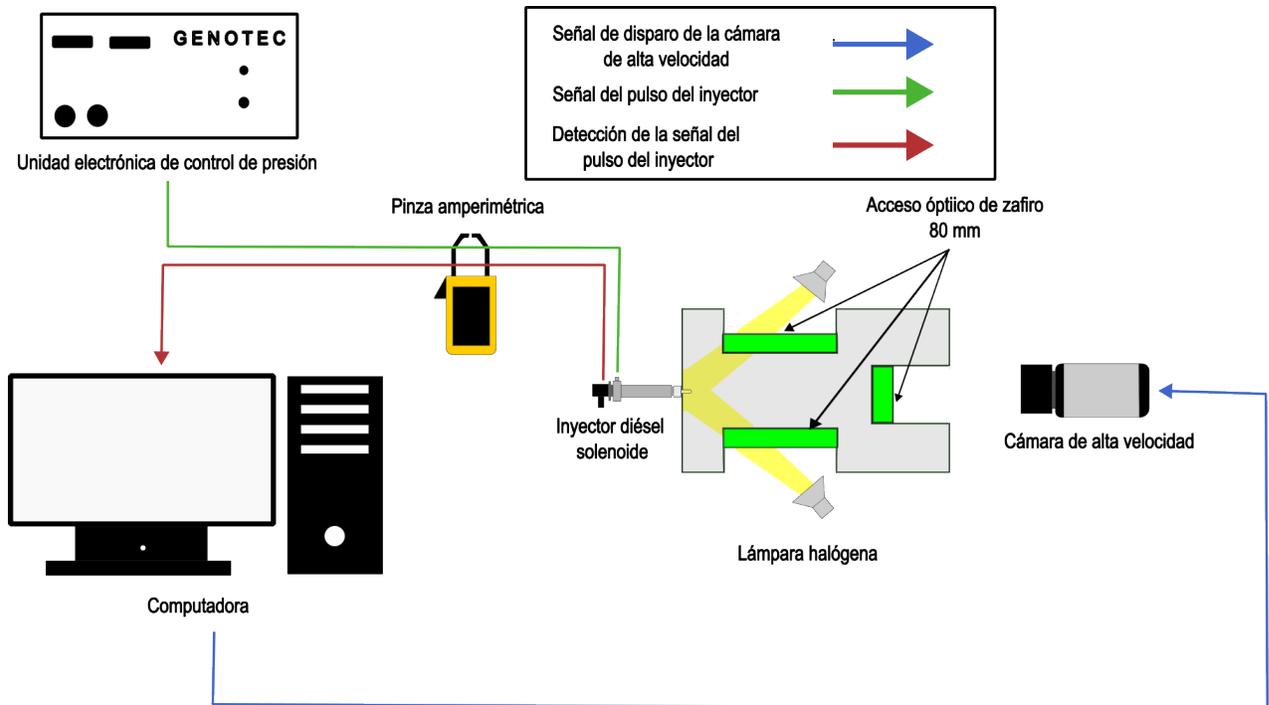


FIGURA 4.13: Técnica óptica de iluminación directa por dispersión Mie.

4.1.8 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES

4.1.8.1 RESOLUCIÓN ESPACIAL

Antes de realizar los experimentos correspondientes al estudio del proceso de mezcla, es necesario obtener el valor de la resolución espacial en unidades de píxel/mm, debido a que este es un parámetro de conversión necesario para tener las dimensiones reales de los parámetros macroscópicos del chorro. Para ello, se coloca una hoja milimetrada en la posición donde se encuentra la salida del orificio de la tobera, luego se obtiene una imagen y así se adquieren las coordenadas en dos puntos, los cuales son $(X1, Y1)$ y $(X2, Y2)$, tal como se muestra en la Figura 4.14.

Es necesario verificar que ambos puntos se ubiquen a la misma altura, es decir, que el valor de $Y1$ y $Y2$ sean iguales. Debido a que esto no siempre se logra, la corrección se efectúa calculando la longitud que existe entre ambos puntos empleando el teorema

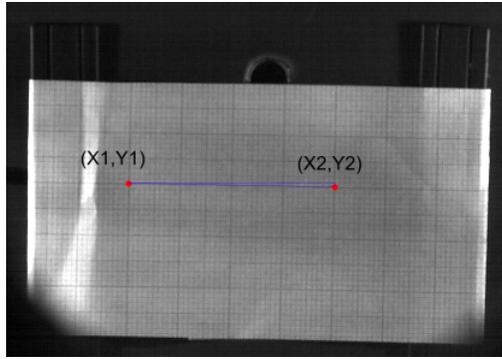


FIGURA 4.14: Determinación píxel/mm.

de Pitágoras ($a^2 + b^2 = h^2$), obteniendo así la longitud en píxeles. A partir de este dato, la distancia se medirá en milímetros para finalmente dividir la longitud en píxeles por la longitud real en milímetros. Para el presente estudio, se obtuvo una relación espacial de 43 píxeles/mm.

4.1.8.2 ANÁLISIS DE IMÁGENES

Las imágenes obtenidas a partir del estudio del proceso de mezcla se descargan en un equipo de cómputo para su análisis empleando un código desarrollado en el software MATLAB. Éste se divide en cuatro secciones principales listadas a continuación.

- **Sección 1:** Definir el fondo de cada una de las imágenes, esto posibilita la diferenciación entre el chorro de combustible inyectado, y el fondo de la cámara de visualización.
- **Sección 2:** Se elimina el fondo, de modo que sea posible un análisis del chorro de combustible en la sección de interés.
- **Sección 3:** Se obtiene un código binario de la imagen, es decir, se asignan los valores 1 y 0, donde 1 es blanco y 0 es negro, esto se observa a detalle en la Figura 4.15. Este paso simplifica la definición del contorno de cada uno de los chorros de combustible, tal como se muestra en la Figura 4.16.



FIGURA 4.15: Binarización del chorro de combustible.

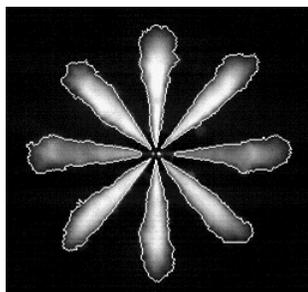


FIGURA 4.16: Detección del contorno del chorro de combustible.

- **Sección 4:** Se obtienen los parámetros macroscópicos de los combustibles estudiados. Un archivo de Excel es obtenido mediante la ejecución del código de MATLAB, el cual muestra los datos de procesamiento, como el número de imágenes, tiempo, ángulo del orificio, penetración, área y ángulo de cono.

Para más información sobre el algoritmo de procesamiento de imágenes, puede consultarse el artículo de Rubio et al. [49].

4.1.9 MATRIZ EXPERIMENTAL

Previo al estudio de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, se analizaron las propiedades fisicoquímicas de cada uno de los combustibles de estudio.

Para el estudio de la viscosidad y densidad de los combustibles se empleó un viscosímetro/densímetro modelo SVM 3001 marca Anton Paar. Para conocer la tensión superficial se empleó un tensiómetro modelo DCAT 15 de la marca Dataphysics. El punto de inflamación se obtuvo empleando un medidor de copa cerrada automático modelo PMA-5 de la marca Pensky-Martens. El poder calorífico fue obtenido haciendo uso de una bomba calorimétrica marca Parr.

En la Tabla 4.1 se describen las propiedades fisicoquímicas de la mezcla B20, y del diésel mineral utilizado como referencia.

TABLA 4.1: Propiedades fisicoquímicas del diésel y de la mezcla B20.

Propiedad	Combustibles		Metodología utilizada
	D100	BH20	
Viscosidad cinemática @40°C (mm ² /s)	2.6571	3.5404	ASTM D7042
Densidad @15°C (g/cm ³)	0.83762	0.85731	ASTM D7042
Punto de inflamación (Flash point) (°C)	66	71	ASTM D93C
Punto de escurrimiento (Pour point) (°C)	-21	-11	ASTM D97
Punto de nube (Cloud point) (°C)	-25	-6	ASTM D2500
Punto de obstrucción en frío (Cold filter plugging) (°C)	-14	-10	ASTM D6371
Tensión superficial @25°C (mN/m)	27.17	28.08	Método de anillo de Du Noüy
Tensión superficial @40°C (mN/m)	28.57	28.09	Método de anillo de Du Noüy
Poder calorífico superior (MJ/Kg)	45.47	43.06	ASTM D240
Prueba de corrosión	1a	1a	ASTM D130

Para el estudio de los parámetros macroscópicos del chorro, se utilizarán estrategias de inyección simple y piloto. Esto debido a que la inyección simple permite un mayor control de la inyección y mejor visualización en el comportamiento del combustible inyectado, aportando un primer acercamiento al comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro. Asimismo, la estrategia de inyección piloto fue seleccionada con el objetivo de comparar el comportamiento de los combustibles y verificar si éste era igual que al emplear una estrategia de inyección simple. Ya que esto permitiría obtener las ventajas añadidas que presenta la implementación de una estrategia de inyección, tales como un

mejor comportamiento en la eficiencia del motor, y la reducción de emisiones.

Adicionalmente, al emplearse elevados niveles de presión de inyección, se eligieron aquellos para los cuales ya se tenía una caracterización hidráulica del inyector tipo solenoide a utilizar, es decir, el análisis del rendimiento del inyector solenoide en relación con el flujo de combustible y la presión de inyección. De esta manera, se determinaron los tiempos de energización correspondientes para cada estrategia de inyección, además de tomar en cuenta aquellos tiempos que fueran característicos en la operación de un motor Diesel en condiciones reales de operación, y aquellos en los cuales se tuviera una cantidad suficiente de imágenes adquiridas por la cámara de alta velocidad para poder ser analizadas posteriormente. El criterio mencionado anteriormente fue aplicado de igual manera para la selección del *dwell time* (DT por sus siglas en inglés) correspondiente a la estrategia de inyección piloto. Esto debido a que al utilizar elevados niveles de presión de inyección se requería un *dwell time* que permitiera captar una cantidad suficiente de imágenes para el estudio.

Para la contrapresión se utilizan 5 MPa, debido a que una mayor presión interna de la cámara de visualización durante un tiempo prolongado generaría que los accesos ópticos de la misma alcancen su límite de resistencia mecánica, pudiendo generar un agrietamiento o rotura.

El término tiempo de energización (TE) hace referencia al tiempo en el cual permanece activado el inyector, es decir, el tiempo que toma iniciar y terminar el evento de inyección. Por otro lado, al hablar de estrategias de inyección múltiples, el término “*dwell time*” se refiere al tiempo que pasa entre el final de una inyección y el inicio de la siguiente [50].

Los valores de presión para este estudio fueron seleccionados a partir de la caracterización hidráulica del inyector utilizado y las características de la instalación experimental. Esto debido a que se requerían los tiempos de energización correspondientes a cada una de las presiones y estrategias de inyección empleados. De igual manera, las presiones de inyección seleccionadas son características de un motor Diesel.

Por ello, se presentan las Tablas 4.2 y 4.3 con cada una de las matrices experimentales.

TABLA 4.2: Matriz experimental para la estrategia de inyección simple.

Estrategia de inyección simple			
Combustible	P_{rail} (MPa)	P_{back} (MPa)	TE (ms)
Diesel/ B20	140	5	0.8/ 1
	160		
	180		

TABLA 4.3: Matriz experimental para la estrategia de inyección piloto.

Estrategia de inyección piloto					
Combustible	P_{rail}	P_{back} (MPa)	1a iny.	DT	2a iny.
Diésel/B20	1400	5	0.715	2	0.998
	1400	5		2.25	
	1400	5		2.5	

Estrategia de inyección piloto					
Combustible	P_{rail}	P_{back} (MPa)	1a iny.	DT	2a iny.
Diésel/B20	1600	5	0.676	2	0.929
	1600	5		2.25	
	1600	5		2.5	

Estrategia de inyección piloto					
Combustible	P_{rail}	P_{back} (MPa)	1a iny.	DT	2a iny.
Diésel/B20	1800	5	0.639	2	0.878
	1800	5		2.25	
	1800	5		2.5	

CAPÍTULO 5

ANÁLISIS DEL PROCESO DE MEZCLA

El presente capítulo muestra los resultados de los estudios anteriormente mencionados, describiendo en primera instancia lo referente a los parámetros macroscópicos de la mezcla B20 y los del diésel empleando elevados niveles de presión de inyección en la estrategia de inyección simple, y en la estrategia de inyección piloto.

5.1 ANÁLISIS DE LA INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

En esta sección se describirá el efecto de la presión sobre los parámetros de penetración, área y ángulo del chorro para la mezcla B20 en comparación con el diésel mineral, empleando estrategias de inyección simple y piloto. Asimismo, se describen las condiciones de operación empleadas durante el proceso experimental.

5.1.1 ESTRATEGIA DE INYECCIÓN SIMPLE

En esta subsección se estudiará el comportamiento de la mezcla B20 en comparación con el diésel de referencia empleando los niveles de presión de inyección de 140 MPa, 160 MPa, y 180 MPa. Previamente se comparó el cambio de los parámetros macroscópicos del chorro para cada uno de los combustibles de estudio empleando diferentes tiempos de energización, tal como se muestra en el Anexo A1. A partir de este análisis, se pueden observar las tendencias de los parámetros macroscópicos de estudio que siguen ambos combustibles, los cuales no se ven influenciados por los tiempos de energización utilizados, lo cual concuerda con el estudio de Agarwal et al [51], quienes analizaron el efecto de la presión de inyección y el tiempo de energización sobre las características de la inyección. Encontraron, entre otros aspectos, que los cambios en la penetración y el área del chorro de combustible en mezclas B10, B20 de biodiésel de Karanja y diésel mineral se debían mayormente a la influencia de la presión de inyección y no al tiempo de energización. De esta manera, se seleccionó el tiempo de energización de 1 ms, el cual es un tiempo de energización característico de un motor Diesel.

De igual manera, se observaron los cambios producidos con la variación de la presión de inyección en los parámetros macroscópicos del chorro. Se puede observar que un incre-

mento en el nivel de presión de inyección provoca un aumento de la penetración y ángulo del chorro. Debido a este incremento, el área del chorro también se ve incrementada por la influencia de estos parámetros, ya que depende de ellos. Para más detalles sobre el efecto de la variación de presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro, puede consultarse el Anexo A2.

A continuación, en las Figuras 5.1, 5.2 y 5.3 se muestra el comportamiento de la penetración del chorro de cada uno de los combustibles de estudio al emplear los niveles de presión de inyección de 140, 160 y 180 MPa. Asimismo, se muestran los valores de la penetración de la mezcla B20 normalizados con respecto a los del diésel.

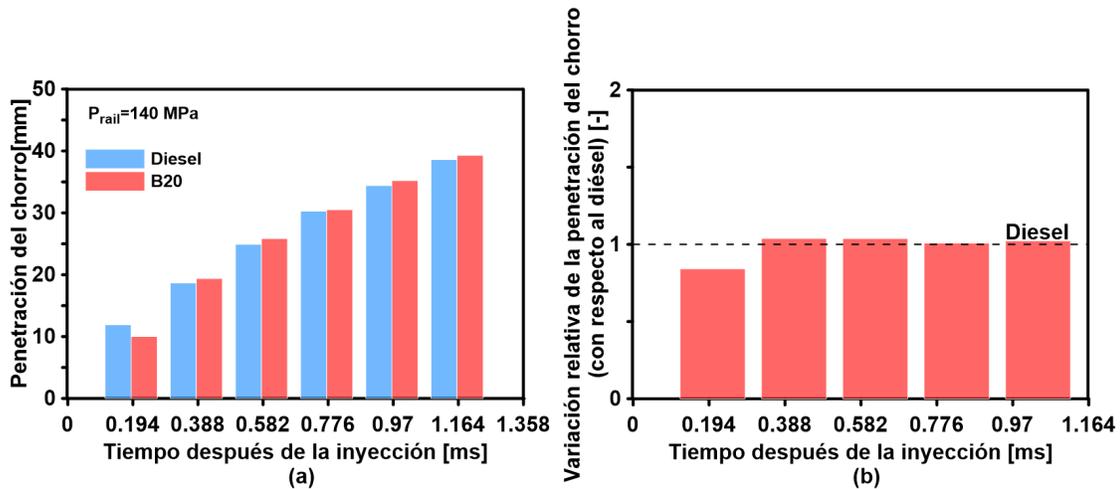


FIGURA 5.1: Comportamiento de la penetración del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando 1 ms de tiempo de energización, y 140 MPa de presión de inyección. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

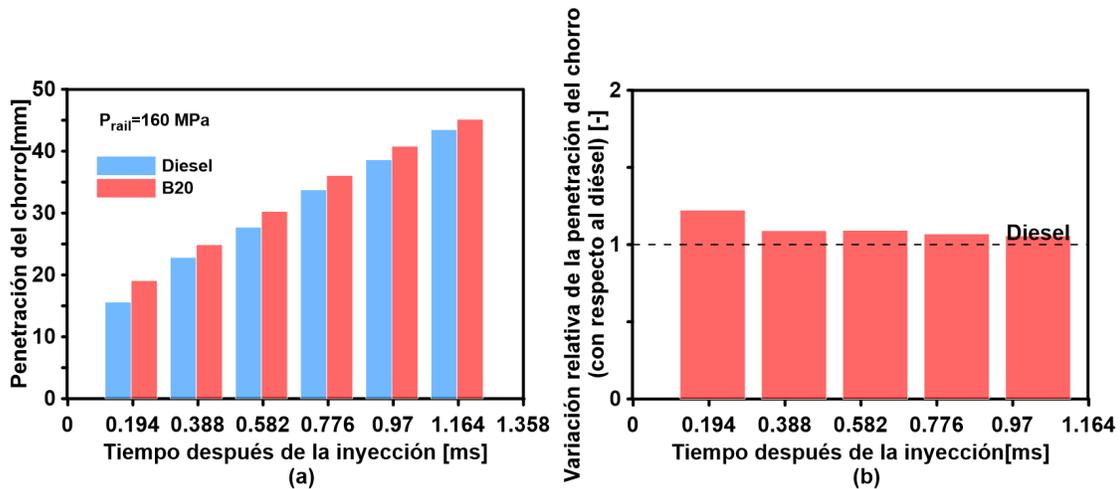


FIGURA 5.2: Comportamiento de la penetración del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando 1 ms de tiempo de energización, y 160 MPa de presión de inyección. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

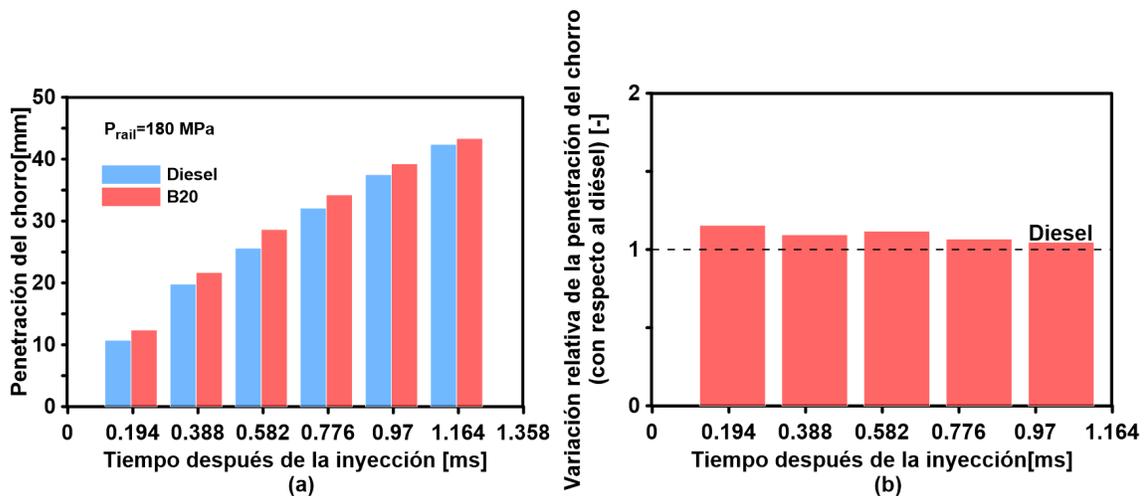


FIGURA 5.3: Comportamiento de la penetración del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando 1 ms de tiempo de energización, y 180 MPa de presión de inyección. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

A partir de las figuras mostradas anteriormente, se puede observar que los valores de penetración para la mezcla B20 son mayores a los del diésel mineral en un promedio general para todos los tiempos después del inicio de la inyección del 1% para una presión de 140 MPa y, del 8% para las presiones de 160 y 180 MPa. Esto se observa en todos los tiempos de energización y en todas las presiones estudiadas. Este comportamiento

puede ser atribuido a la mayor densidad y tensión superficial de la mezcla B20. De igual manera, el incremento de la penetración se relaciona con la presión a la cual es inyectado el combustible, esto debido a que la penetración aumenta al incrementar la presión de inyección en ambos combustibles.

El comportamiento obtenido concuerda con los resultados de Hawi et al. [52] en su estudio sobre el efecto de la presión de inyección sobre las características del chorro, empleando diésel mineral, tetradecano y oleato de metilo. Encontrando, entre otros aspectos, que un combustible con menor densidad genera una menor distancia de penetración al momento de inyectarse, así como también que una presión de inyección más elevada da como resultado una mayor penetración del chorro. Este comportamiento se presenta también en el estudio de Du et al [53], en su estudio de los parámetros macroscópicos del chorro empleando una cámara de visualización a volumen constante al estudiar combustible GCI RON 77 y combustible con certificación E10 (RON 91). Descubrieron, entre otros aspectos, que la longitud de la penetración del chorro depende directamente del nivel de presión de inyección del combustible, obteniendo una mayor penetración en un menor tiempo para el nivel más alto de presión de inyección.

A continuación, en las Figuras 5.4, 5.5 y 5.6 se muestran los comportamientos del ángulo del chorro diésel y la mezcla B20 al emplear los niveles de presión de inyección de 140, 160 y 180 MPa. Asimismo, como en el caso anterior, se muestran los valores del ángulo de la mezcla B20 normalizados con respecto a los valores del diésel.

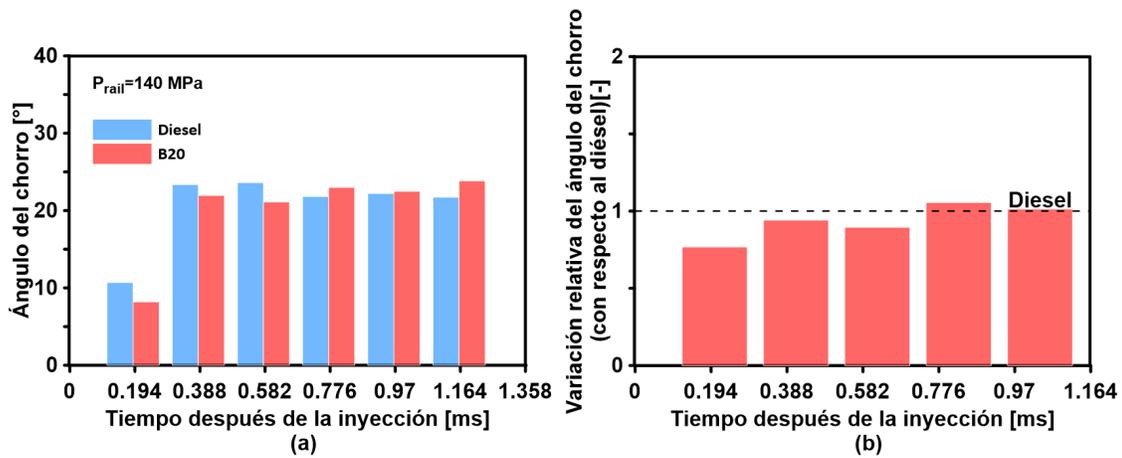


FIGURA 5.4: Comportamiento del ángulo del chorro diésel y la mezcla B20, cuando 1 ms de tiempo de energización, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa fueron empleados. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

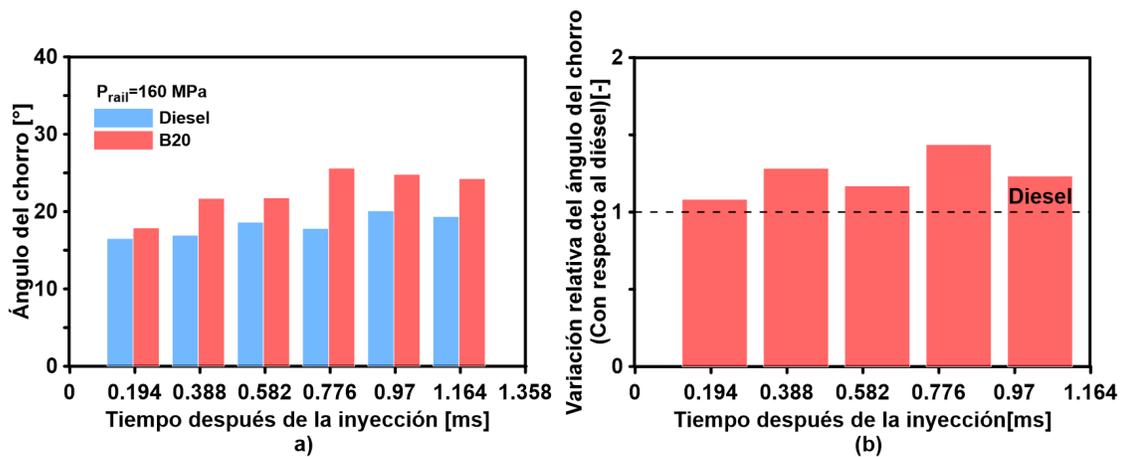


FIGURA 5.5: Comportamiento del ángulo del chorro diésel y la mezcla B20, cuando 1 ms de tiempo de energización, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa fueron empleados. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

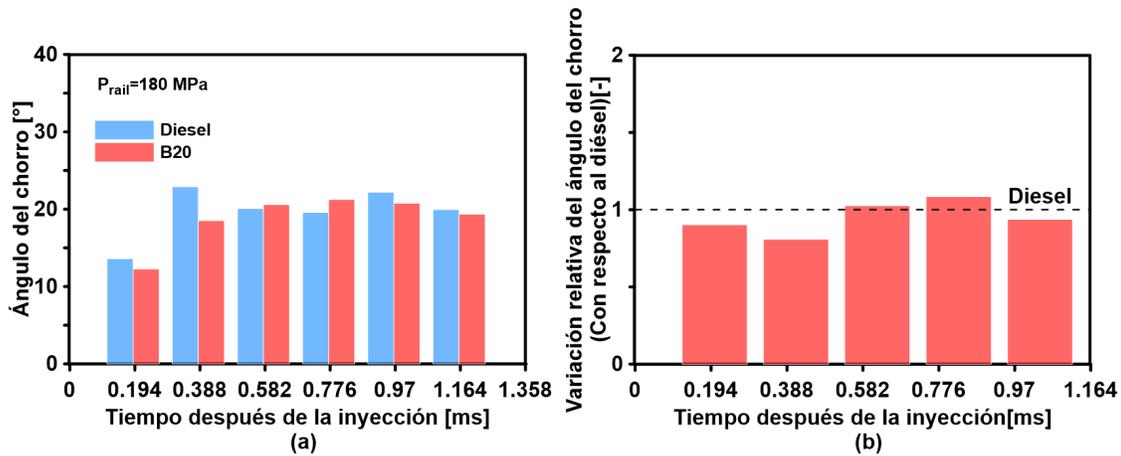


FIGURA 5.6: Comportamiento del ángulo del chorro diésel y la mezcla B20, cuando 1 ms de tiempo de energización, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa fueron empleados. a) Evolución temporal, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

A partir de las figuras mostradas anteriormente, es posible observar que los valores del ángulo de la mezcla B20 son equiparables a los del diésel mineral a medida que aumenta el tiempo de energización. Esto se observa a los iso-tiempos a partir de 0.582 ms aSOI, y en todos los niveles de presión de inyección estudiados. Este comportamiento se puede atribuir al elevado valor de densidad de la mezcla B20, el cual provoca una reducción en el ángulo de cono.

De la misma manera, es posible observar un decremento en el ángulo de cono como consecuencia del aumento en el nivel de presión de inyección. Esto debido a que una mayor presión de inyección promueve la pulverización del chorro de combustible, generando un ángulo de cono cada vez menor a medida que la presión se incrementa, así como una elevada viscosidad y tensión superficial de la mezcla B20 en comparación con el diésel mineral. Esto concuerda con el estudio de Chaudhari et al [54], quienes estudiaron las características de atomización de tres diferentes combustibles: biodiésel de neem, mezcla de biodiésel-etanol (BDE50) y diésel mineral como referencia. Encontraron, entre otros aspectos, que al aumentar la presión de inyección en cada combustible, se producía una reducción en el ángulo de cono. Asimismo, el biodiésel de neem tuvo el ángulo de cono más reducido en comparación a la mezcla BDE50 y el diésel mineral, esto debido a su mayor viscosidad y tensión superficial.

En las Figuras 5.7, 5.8 y 5.9 se muestran las evoluciones temporales del área del chorro diésel, y el de la mezcla B20 al emplear niveles de presión de 140, 160 y 180 MPa. Asimismo, como en el caso anterior, se muestran los valores del área de la mezcla B20 normalizados con respecto a los del diésel.

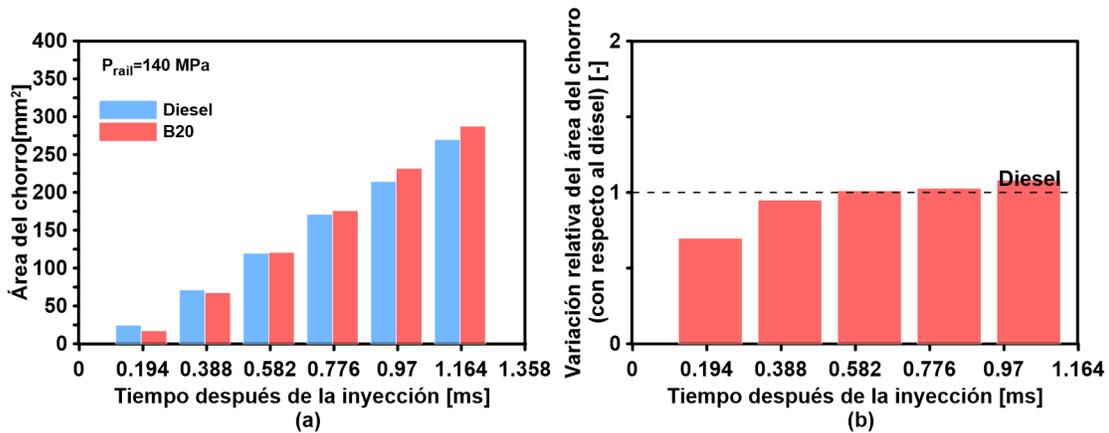


FIGURA 5.7: Comportamiento del área del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando un tiempo de energización de 1 ms y un nivel de presión de inyección de 140 MPa de presión de inyección. a) Comparación mediante isotiempos, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

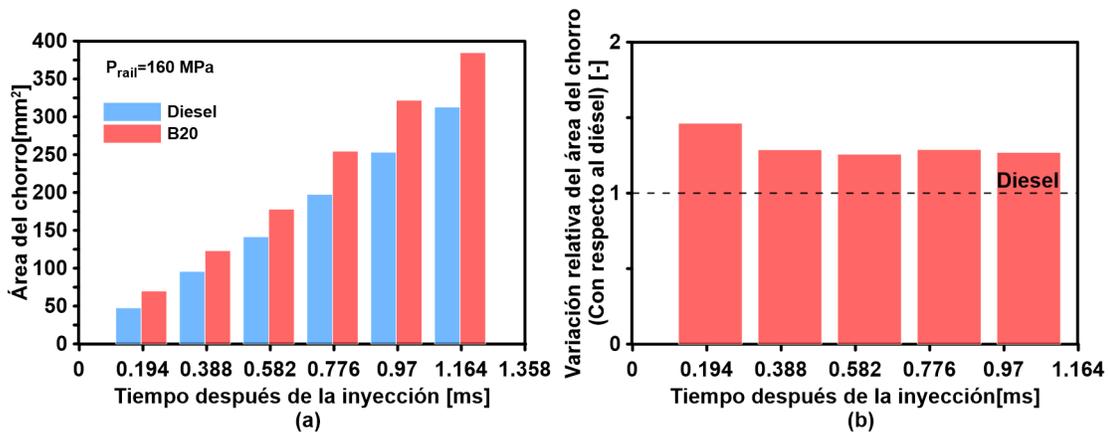


FIGURA 5.8: Comportamiento del área del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando un tiempo de energización de 1 ms de tiempo de energización y un nivel de presión de inyección de 160 MPa. a) Comparación mediante isotiempos, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

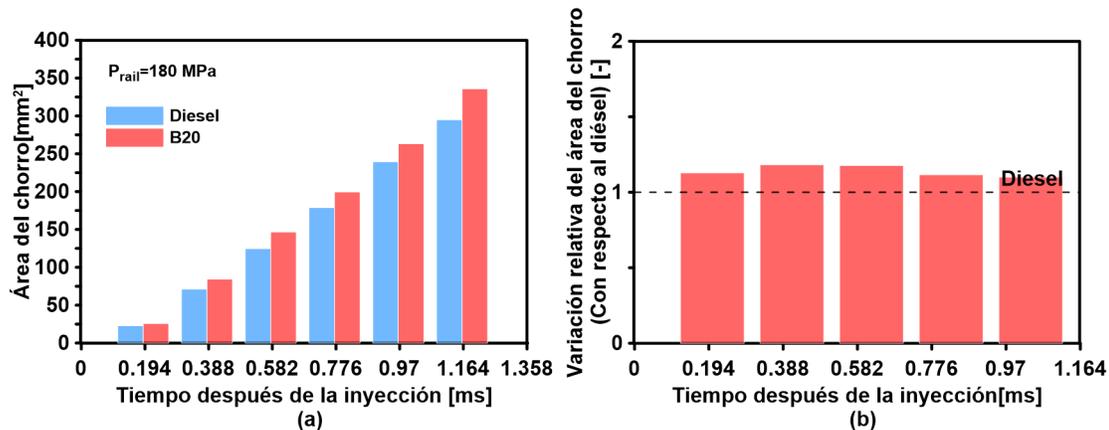


FIGURA 5.9: Comportamiento del área del chorro diésel y la mezcla B20 en función del tiempo empleando un tiempo de energización de 1 ms y un nivel de presión de inyección de 180 MPa. a) Comparación mediante isotiempos, b) Valores de la penetración normalizados con respecto a los valores del diésel.

A partir de las figuras mostradas anteriormente, se puede observar que a partir de 0.582 ms aSOI, tiempo en el cual el chorro comienza a estabilizarse, los valores del área para la mezcla B20 son equiparables a los del diésel mineral, lo cual se presenta en cada una de las presiones estudiadas. Esta diferencia en los valores del área entre ambos combustibles se le puede atribuir a los elevados niveles de densidad, viscosidad y tensión superficial de la mezcla B20.

De igual manera, al incrementar la presión se observa también un aumento en los valores del área para ambos combustibles. Esto se debe a que la aceleración del chorro de combustible promueve una mayor formación de gotas mas pequeñas, lo cual favorece el proceso de atomización. Este comportamiento también fue observado por Geng et al [55] en su estudio sobre el efecto de la presión de inyección sobre las características de inyección empleando un biodiésel de aceite de soya y diésel mineral. Encontraron, entre otros aspectos, que el incremento de la presión de inyección genera un aumento en el área del chorro de combustible, debido a que se produce un incremento en los parámetros de penetración y ángulo del chorro, parámetros de los cuales depende el área del chorro de combustible, esto como consecuencia de una mayor velocidad del chorro y una mayor atomización al emplear presiones más altas.

Con el fin de ampliar el análisis de los resultados descritos en las Tablas 5.1, 5.2 y 5.3 se muestran los valores de la penetración, área y ángulo del chorro diésel y la mezcla B20, obtenidos a 0.582 ms aSOI, y empleando los niveles de presión de inyección de 140 MPa, 160 MPa, y 180 MPa.

TABLA 5.1: Parámetros macroscópicos del chorro del diésel y de la mezcla B20, obtenidos a 0.582 ms aSOI, y al emplear el nivel de presión de inyección de 140 MPa.

Combustibles	Penetración (<i>mm</i>)	Área (<i>mm</i>²)	Ángulo (°)
Diesel	24.910	119.524	23.598
B20	25.840	120.822	21.109

TABLA 5.2: Parámetros macroscópicos del chorro del diésel y de la mezcla B20, obtenidos a 0.582 ms aSOI, y al emplear el nivel de presión de inyección de 160 MPa.

Combustibles	Penetración (<i>mm</i>)	Área (<i>mm</i>²)	Ángulo (°)
Diésel	27.698	141.481	18.614
B20	30.264	177.988	21.759

TABLA 5.3: Parámetros macroscópicos del chorro del diésel y de la mezcla B20, obtenidos a 0.582 ms aSOI, y al emplear el nivel de presión de inyección de 180 MPa.

Combustibles	Penetración (<i>mm</i>)	Área (<i>mm</i>²)	Ángulo (°)
Diésel	25.598	124.607	20.073
B20	28.619	146.619	20.591

Para una presión de inyección de 140 MPa se observó que la mezcla B20 obtuvo una penetración y un área mayores a las del diésel mineral, con un incremento del 4 % y 1 %, respectivamente. Sin embargo, el ángulo del chorro de la mezcla B20 es un 12 % menor que la del diésel mineral. Al emplear una presión de inyección de 160 MPa, se obtuvo una mayor penetración, área y ángulo en la mezcla B20, siendo del 8 %, 21 % y 30 %, respectivamente en comparación con el diésel mineral. Finalmente, al emplear una presión de inyección de 180 MPa, se obtuvo un incremento en cada uno de los parámetros macroscópicos en la mezcla B20 en comparación con el diésel mineral, siendo del 11 % para la penetración, del 15 % para el área y del 3 % para el ángulo.

Esto indica cual es el nivel de presión de inyección que debe emplearse con el bio-diésel de aceite de ricino, para poder equiparar sus parámetros macroscópicos con el diésel

mineral. Por otro lado, además de las estrategias de inyección simples es posible implementar estrategias de inyección múltiples, una de las cuales puede ser la inyección piloto. La trascendencia al emplear este tipo de estrategias radica en que reduce significativamente las emisiones de NOx, hollín, HC y CO en comparación con una inyección simple, así como también el aporte a una mayor eficiencia del motor [56]. Debido a esto es que además de la inyección simple, se plantea estudiar el comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla B20, empleando la estrategia de inyección piloto, verificando también si los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla B20 son equiparables al diésel mineral al emplear elevados niveles de presión de inyección.

5.1.2 ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO

Se determinaron los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla B20 y el diésel mineral, empleando una estrategia de inyección piloto, niveles de presión de inyección de 140 MPa, 160 MPa y 180 MPa, una contrapresión de 5MPa, y valores de dwell time de 2, 2.25 y 2.5 ms. Los resultados obtenidos para cada una de las presiones de inyección son los siguientes.

Presión de inyección de 140 MPa.

En las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12, se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro para los valores de dwell time de 2, 2.25 y 2.5 ms, respectivamente.

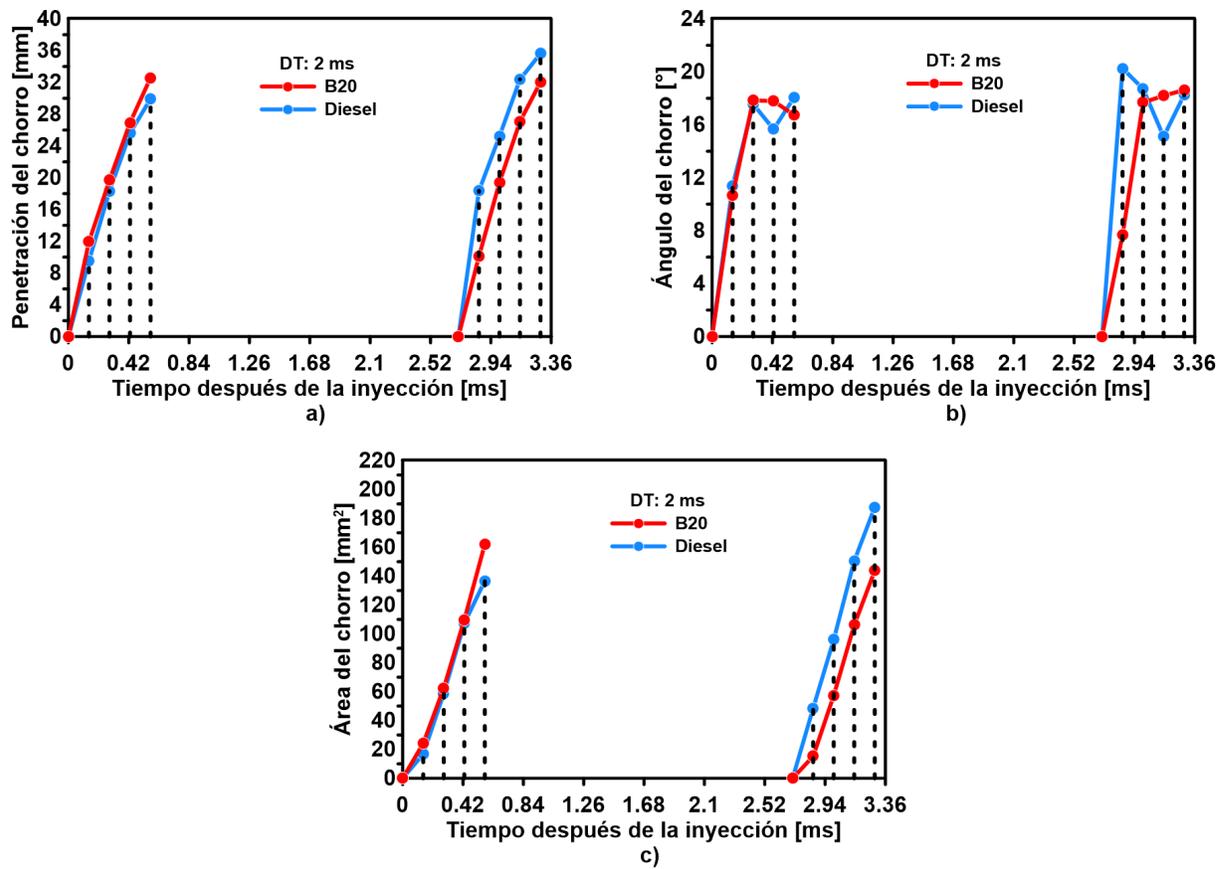


FIGURA 5.10: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y un valor de dwell time de 2 ms.

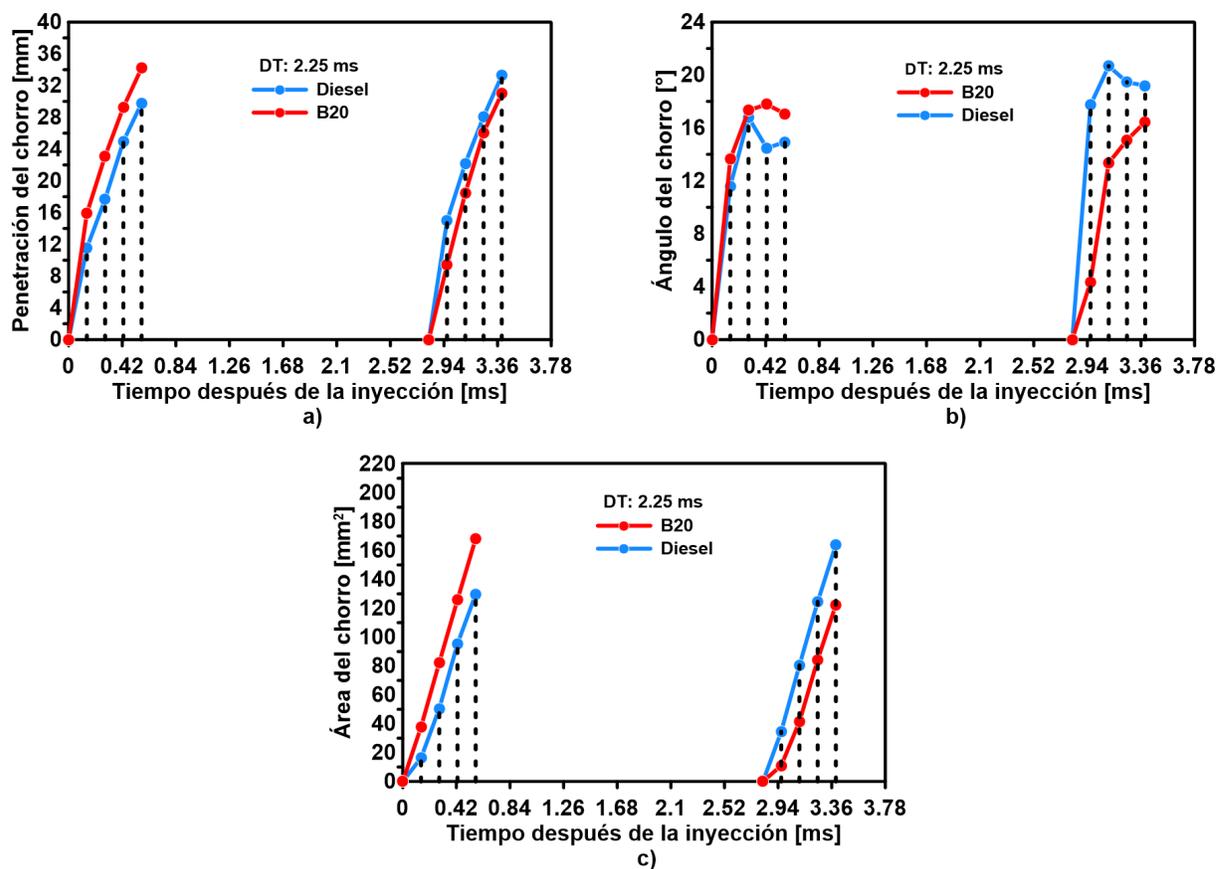


FIGURA 5.11: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y un valor de dwell time de 2.25 ms.

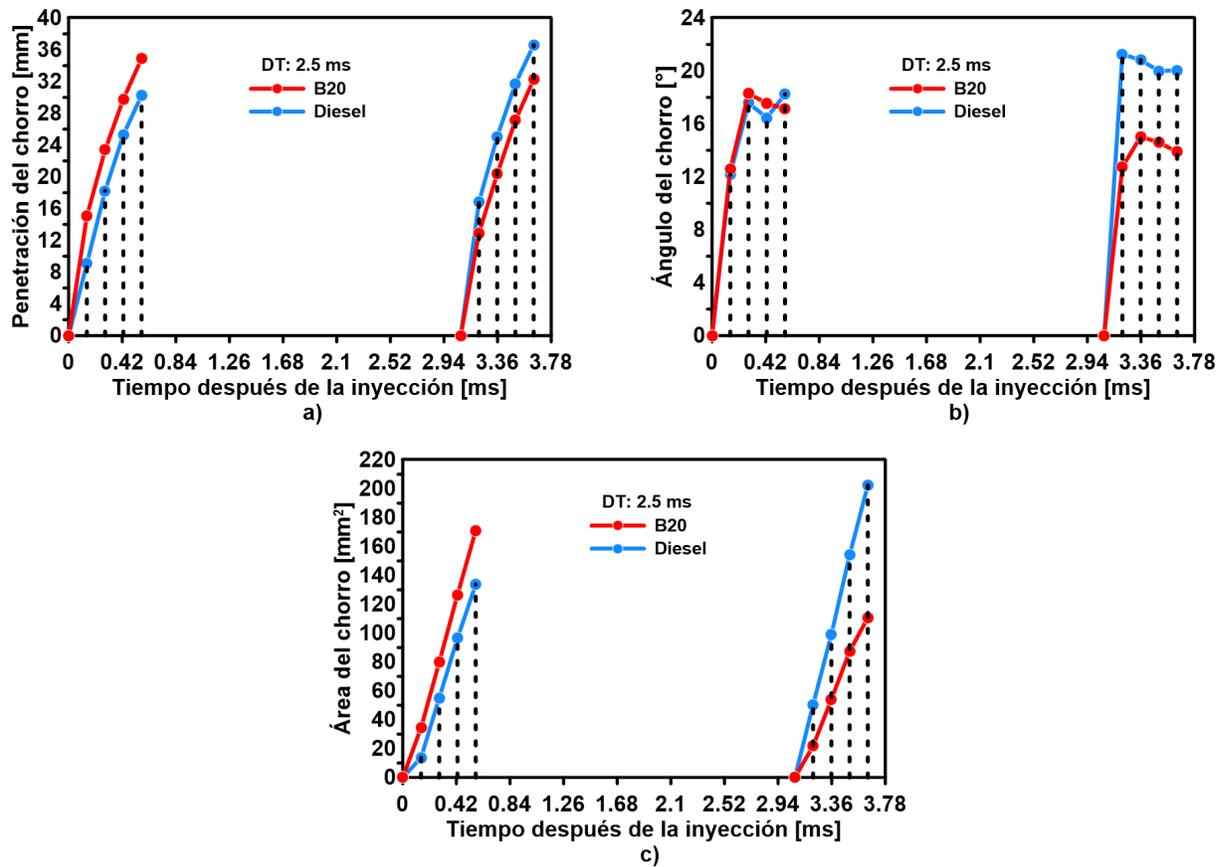


FIGURA 5.12: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y un valor de dwell time de 2.5 ms.

A partir de las Figuras 5.10a, 5.11a, y 5.12a, se puede observar que los valores de la penetración y área del chorro de la mezcla B20 son mayores a los del diésel durante el primer evento de inyección, y en cada uno de los tiempos después de iniciada la inyección. Este comportamiento puede deberse a la diferencia en los valores de viscosidad y densidad entre los combustibles estudiados; así mismo también fue observado por Payri et al. [57], cuando ellos analizaron de manera óptica el comportamiento del chorro diésel en estrategias de inyección múltiples. Descubrieron, entre otros aspectos, que la penetración disminuye conforme existe un aumento de densidad en el combustible.

Asimismo, los valores del ángulo de cono presentaron un comportamiento casi idéntico para la mezcla B20 en comparación con el diésel mineral en todos los tiempos después de iniciada la inyección durante el primer evento de inyección. Esto es causado por los valores de tensión superficial muy similares entre el diésel y la mezcla B20, siendo de 28.57 mN/m y 28.09 mN/m, respectivamente.

Los tiempos después del inicio de la inyección previamente señalados en las Figuras 5.10, 5.11 y 5.12, se representan en las Figuras 5.13, 5.14, 5.15, 5.16, 5.17, 5.18, 5.19, 5.20 y 5.21 con la finalidad de profundizar en el análisis de los combustibles objeto de estudio. Específicamente, en las Figuras 5.13, 5.14 y 5.15, se muestran las evoluciones temporales de la penetración del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms, respectivamente. En las Figuras 5.16, 5.17 y 5.18, se muestran las evoluciones temporales del área del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms, respectivamente. En las Figuras 5.19, 5.20 y 5.21, se muestran las evoluciones temporales del ángulo del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms.

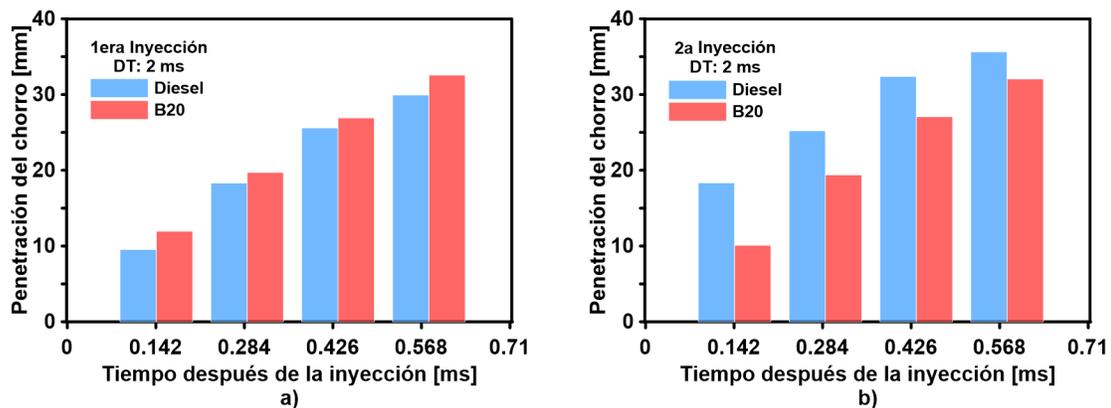


FIGURA 5.13: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa

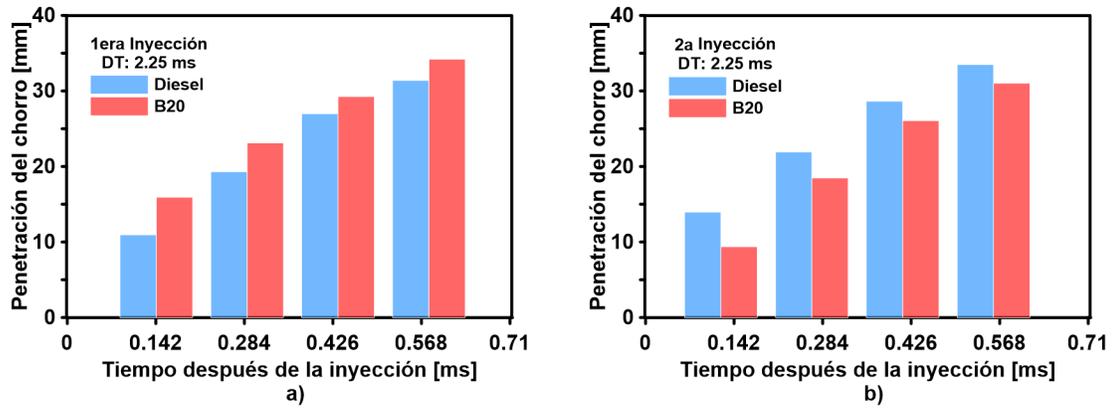


FIGURA 5.14: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa

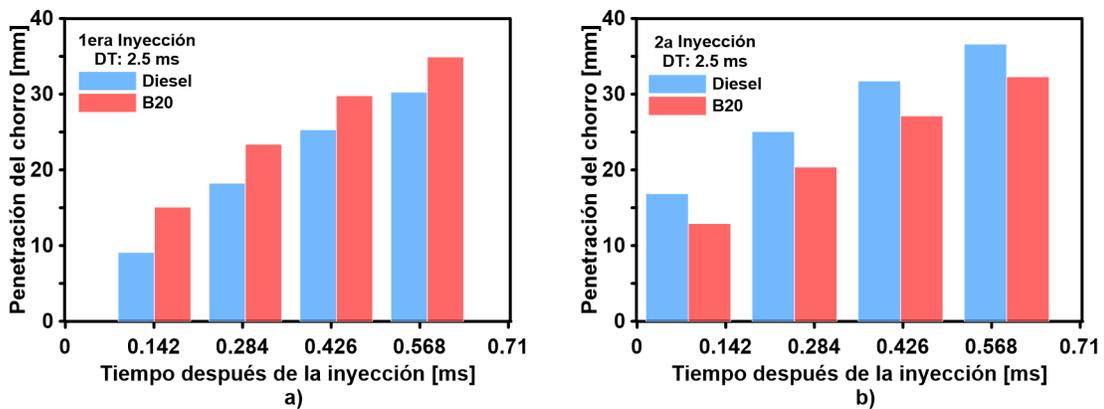


FIGURA 5.15: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa

A partir de las Figuras 5.13 a), 5.14 a) y 5.15 a), se puede observar que los valores de la penetración del chorro de la mezcla B20, son mayores a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, en aproximadamente 9%, 15%, y 15% para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, al emplear 0.56 ms aSOI.

A partir de las Figuras 5.13 b), 5.14 b) y 5.15 b), se observa que los valores de la penetración del chorro de la mezcla B20, son menores a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, en aproximadamente 10%, 15%, y 15% para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, al emplear 0.56 ms aSOI.

Lo anterior puede explicarse debido al cambio en las condiciones del gas al interior de la cámara de visualización, como consecuencia del primer evento de inyección. De igual manera, a la diferencia entre ambos combustibles en el flujo presente durante la inyección, debido al elevado nivel de viscosidad de la mezcla B20 en comparación al diésel mineral. Esto concuerda con lo estudiado por Jin et al. [58] al estudiar las características del chorro al emplear una estrategia de inyección dividida. Analizando, entre otros aspectos, la influencia de la interacción de la primera y segunda inyección de combustible en el interior de la cámara de combustión, incrementando el flujo de cantidad de movimiento del gas ambiente.

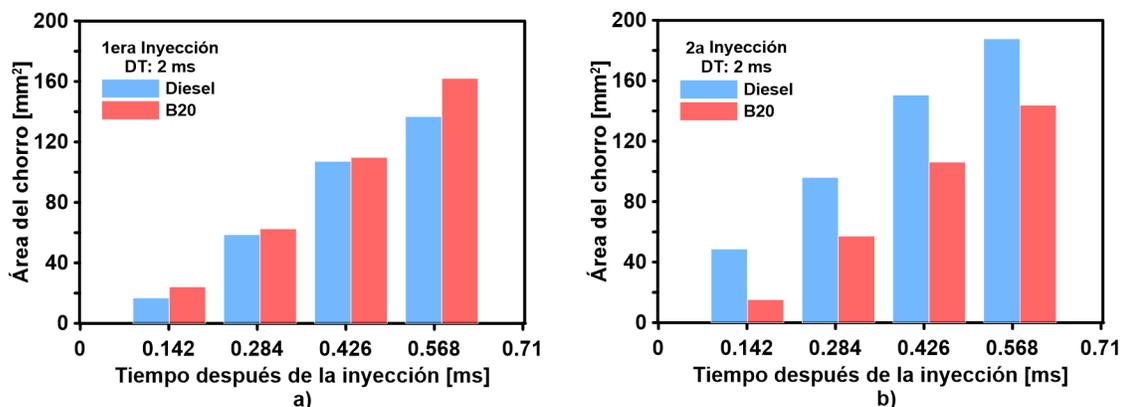


FIGURA 5.16: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

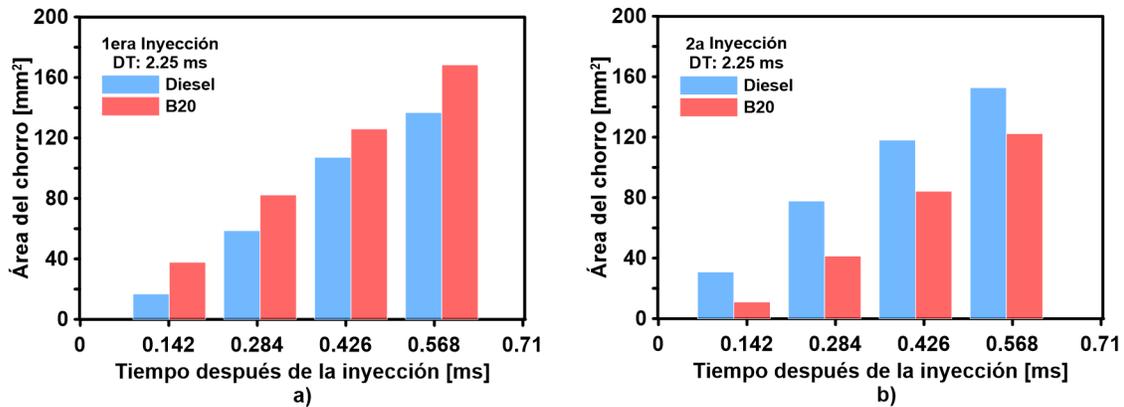


FIGURA 5.17: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

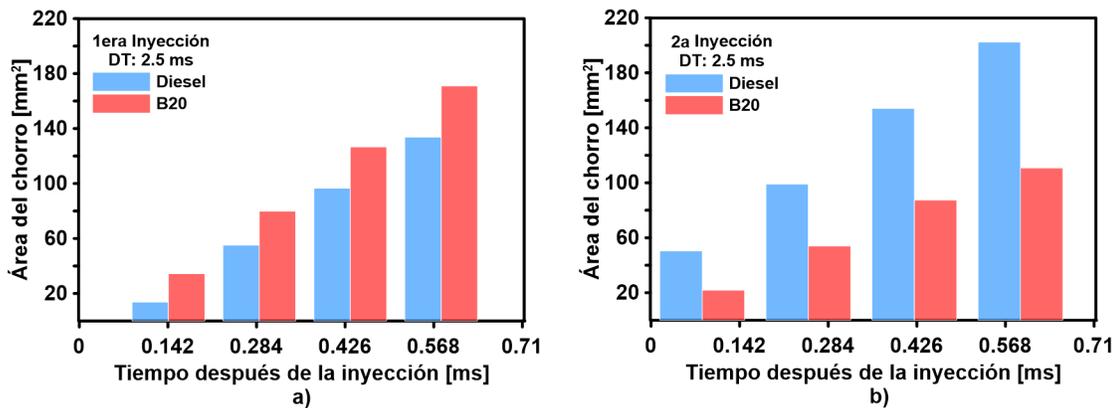


FIGURA 5.18: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

A partir de las Figuras 5.16 a), 5.17 a) y 5.18 a) se puede observar que los valores del área del chorro de las mezcla B20 son mayores a los del diésel en todos los tiempos despues del inicio de la inyección, en aproximadamente 18 %, 30 %, y 28 % para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, y para 0.56 ms aSOI.

A partir de las Figuras 5.16 b), 5.17 b) y 5.18 b) se observa que los valores del área del chorro de las mezcla B20 son menores a los del diésel en todos los tiempos despues del inicio de la inyección, en aproximadamente 23 %, 25 %, y 45 % para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, y para 0.56 ms aSOI.

Lo anterior puede explicarse debido al efecto del gas contenido al interior de la cámara de combustión, lo cual produce una reducción en la velocidad del chorro del segundo evento de inyección como consecuencia del combustible suministrado a la cámara durante el primer evento de inyección. De igual manera, el área del chorro tiene relación directa con los parámetros de penetración y ángulo del chorro, mostrados en las Figuras 5.13 a 5.15 y 5.19 a 5.21, respectivamente. Es por ello, que ambos parámetros al ser mayores para la mezcla B20 en comparación al diésel mineral, se obtiene un valor para el área del chorro igualmente mayor para la mezcla B20. Este comportamiento es debido a la mayor viscosidad y tensión superficial de la mezcla B20.

Esto es consistente con lo estudiado por De la Garza et al. [59], en donde analizaron las interacciones de aspersión en biocombustibles empleando una estrategia de inyección piloto. Encontrando, entre otros aspectos, que el área del chorro de combustible se ve afectada por las propiedades del combustible, en especial la mayor viscosidad y tensión superficial del biodiésel en comparación con el diésel mineral.

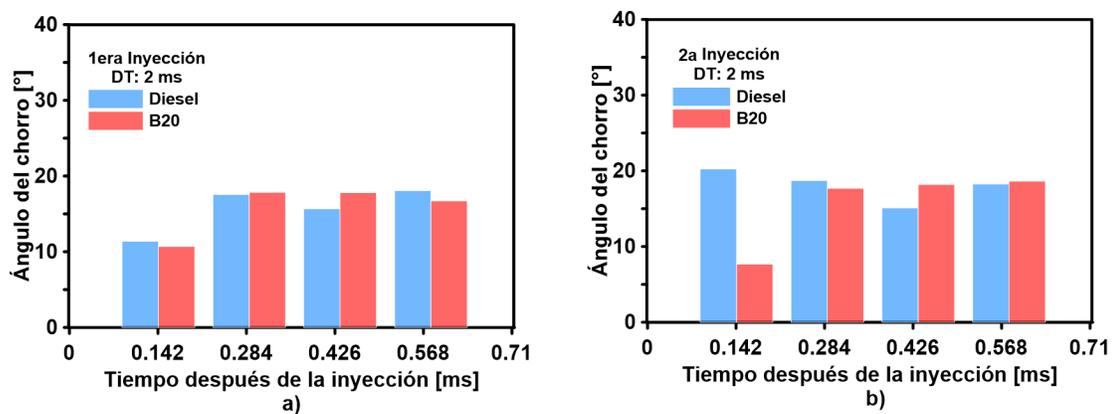


FIGURA 5.19: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

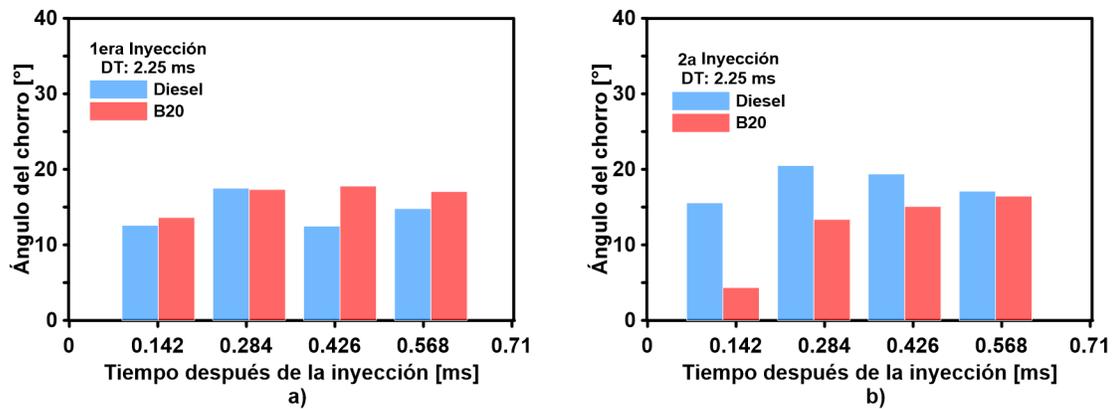


FIGURA 5.20: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

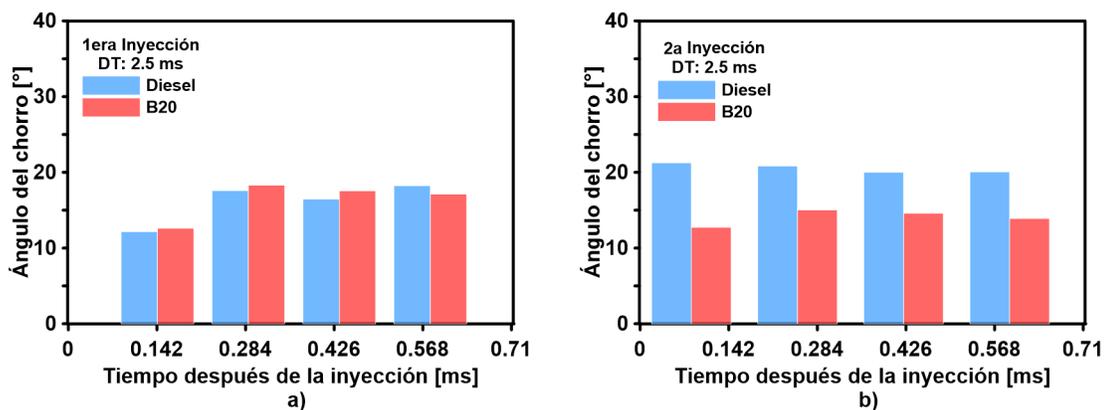


FIGURA 5.21: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

A partir de las Figuras 5.19 a), 5.20 a) y 5.21 a) se puede observar que los valores del ángulo del chorro del diésel son mayores a los de la mezcla B20 en todos los instantes de tiempo después del inicio de la inyección, en aproximadamente 7% y 6% para los valores de DT de 2 ms y 2.5 ms, respectivamente, y para el 0.56 ms aSOI. Por el contrario, para el valor del DT de 2.25 ms se tiene una disminución del 14%. La similitud en los valores del ángulo en ambos combustibles puede deberse a los valores de tensión superficial entre el diésel mineral y la mezcla B20, siendo de 28.57 y 28.09 mN/m, respectivamente.

Asimismo, a partir de las Figuras 5.19 b), 5.20 b) y 5.21 b) se observó que los valores del ángulo del chorro del diésel son mayores a los de la mezcla B20 en todos los instantes de tiempo después del inicio de la inyección, con un valor aproximado del 14 % y 31 % para los valores de DT de 2.25 y 2.5 ms, respectivamente, y para el 0.56 ms aSOI. Sin embargo, para el valor de DT de 2 ms se tiene una disminución del 2 %. Esto, puede deberse a los valores más elevados de viscosidad y densidad de la mezcla B20 en comparación al diésel mineral. Esto concuerda con lo estudiado por Desantes et al., quienes estudiaron los efectos de las mezclas de biodiésel en el proceso de inyección. Ellos encontraron, entre otros aspectos, que las diferencias entre el ángulo del chorro de los combustibles estudiados se debía al desarrollo de la atomización, la cual se ve afectada por los valores de densidad y tensión superficial que se reportó en cada mezcla de biodiésel [60].

Adicionalmente, se evaluó el efecto del primer evento de inyección sobre el segundo; para ello se normalizaron los valores de los parámetros macroscópicos del chorro durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección al emplear tanto el diésel como la mezcla B20; tal como se muestra en las Figuras 5.22, 5.23 y 5.24, para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente.

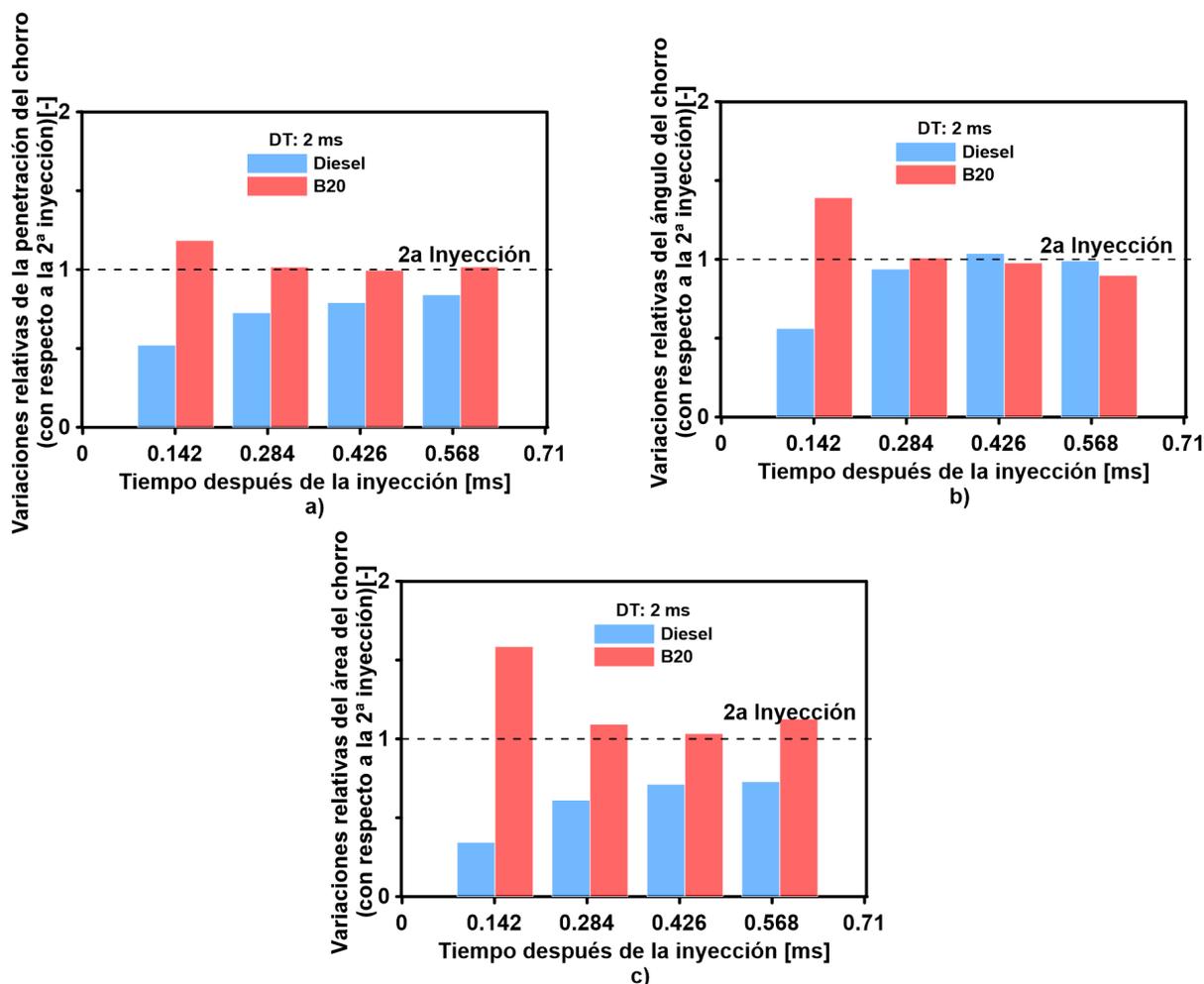


FIGURA 5.22: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

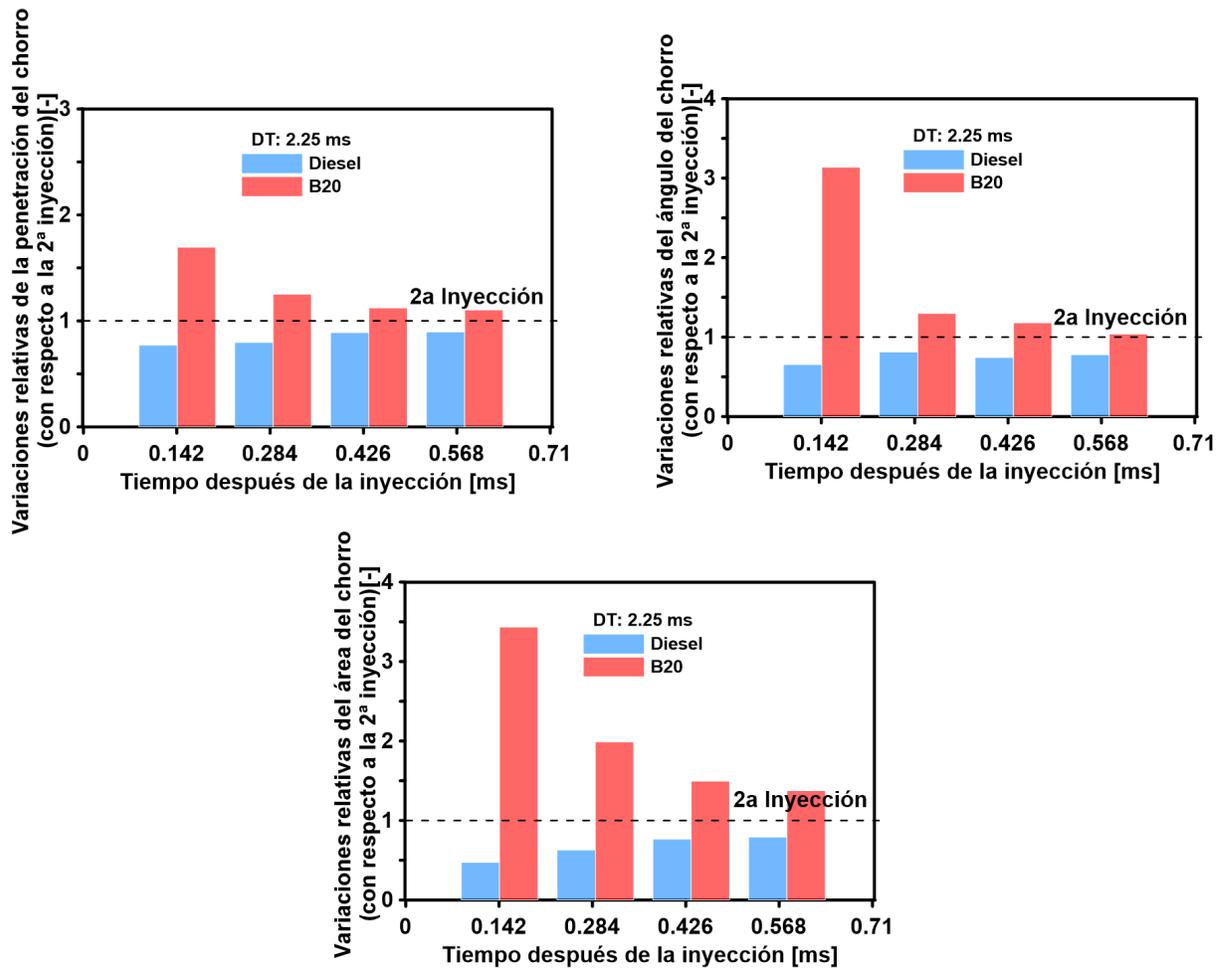


FIGURA 5.23: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

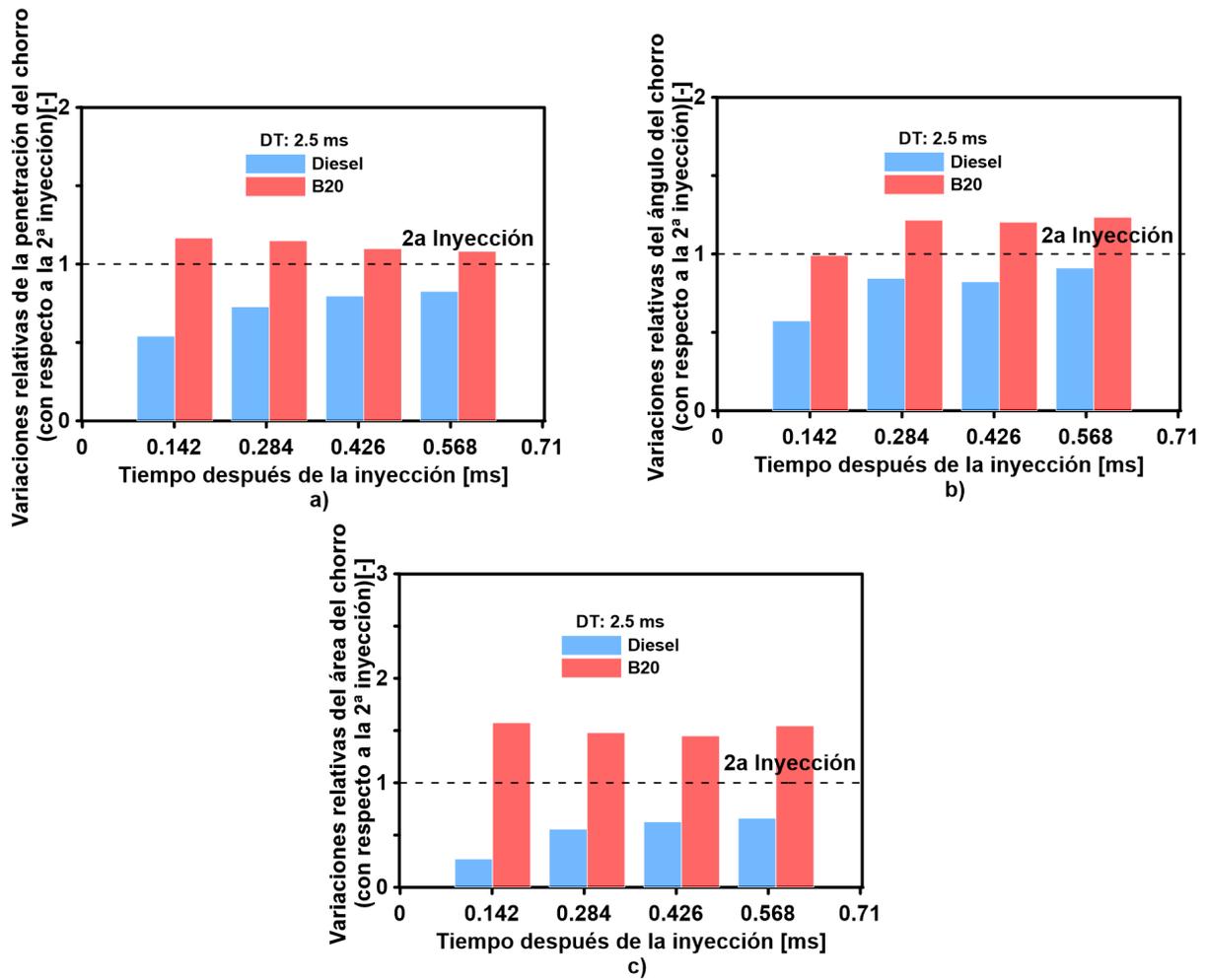


FIGURA 5.24: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 140 MPa.

El efecto de la primera inyección sobre la segunda para una estrategia de inyección múltiple radica en que la primera inyección ingresa a la cámara y el chorro se desintegra en pequeñas gotas. Esto genera distintas fuerzas o momentos en el ambiente dentro de la cámara. Se genera un arrastre de aire provocado por la superficie de las gotas de combustible, generando un intercambio de momentos entre la primera inyección y la segunda. Teniendo un bajo momento en la cámara, como producto del desarrollo de la primera inyección al momento de iniciada la segunda inyección. El combustible de alto momento, producto de la segunda inyección, sufre una desaceleración como consecuencia de la densidad del combustible de bajo momento presente en el ambiente, producto de la primera inyección. Asimismo, el combustible de bajo momento sufre un ligero aumento de momento, como producto del intercambio de momento proporcionado por la segunda inyección, moviéndose hacia la periferia de la cámara [61, 58].

Se puede observar que para cada uno de los dwell times empleados, a excepción del caso mostrado en la Figura 5.22 b), los valores de la penetración, área y ángulo para la mezcla B20 son superiores en cada uno de los casos para todos los instantes de tiempo. Por lo tanto, la primera inyección de la mezcla B20 no produce un efecto en la segunda inyección, por lo que no se presenta ninguna interacción entre el combustible y el gas ambiente al interior de la cámara. Esto puede deberse a la mayor viscosidad del combustible, lo que da como resultado un peor proceso de atomización en comparación con el diésel.

Asimismo, esto podría indicar que los dwell times empleados para este análisis no permiten que exista un efecto en la segunda inyección, teniendo un comportamiento análogo a lo estudiado por Hernández et al. [62], en su estudio sobre la influencia de las estrategias de post-inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro empleando inyectores diésel tipo piézoeléctrico y solenoide. Descubrió, entre otros aspectos, que al emplear un dwell time de 1 ms se presentaban interacciones entre la primera y la segunda inyección, caso contrario a lo que ocurrió al emplear un dwell time de 1.5 ms, por lo que concluyó que a un menor dwell time se presentan más interacciones entre ambos chorros, modificando sus parámetros macroscópicos.

Analizando las interacciones de la primera y segunda inyección de todos los combustibles y en todos los instantes de tiempo, por lo que puede concluirse que el primer evento de inyección no provoca ningún efecto en el proceso de mezcla del segundo evento de inyección. Lo anterior presenta un comportamiento análogo a lo descrito por Mena et al. [63] en su estudio sobre los parámetros macroscópicos del chorro al emplear una estrategia de inyección dividida en mezclas de biodiésel de aceite usado de cocina con diésel ultra bajo en azufre. En este estudio se realizó de igual manera la normalización de los datos obtenidos entre la primera y la segunda inyección, con el objetivo de observar si se presentaba un efecto de la primera inyección sobre la segunda, presentando un efecto cuando los valores para cada uno de los parámetros macroscópicos se encontraban por debajo de la línea segmentada marcada, que representaba un valor menor a la unidad.

Presión de inyección de 160 MPa.

En las Figuras 5.25, 5.26 y 5.27 se presentan las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro al emplear los valores de dwell time de 2, 2.25 y 2.5 ms, respectivamente.

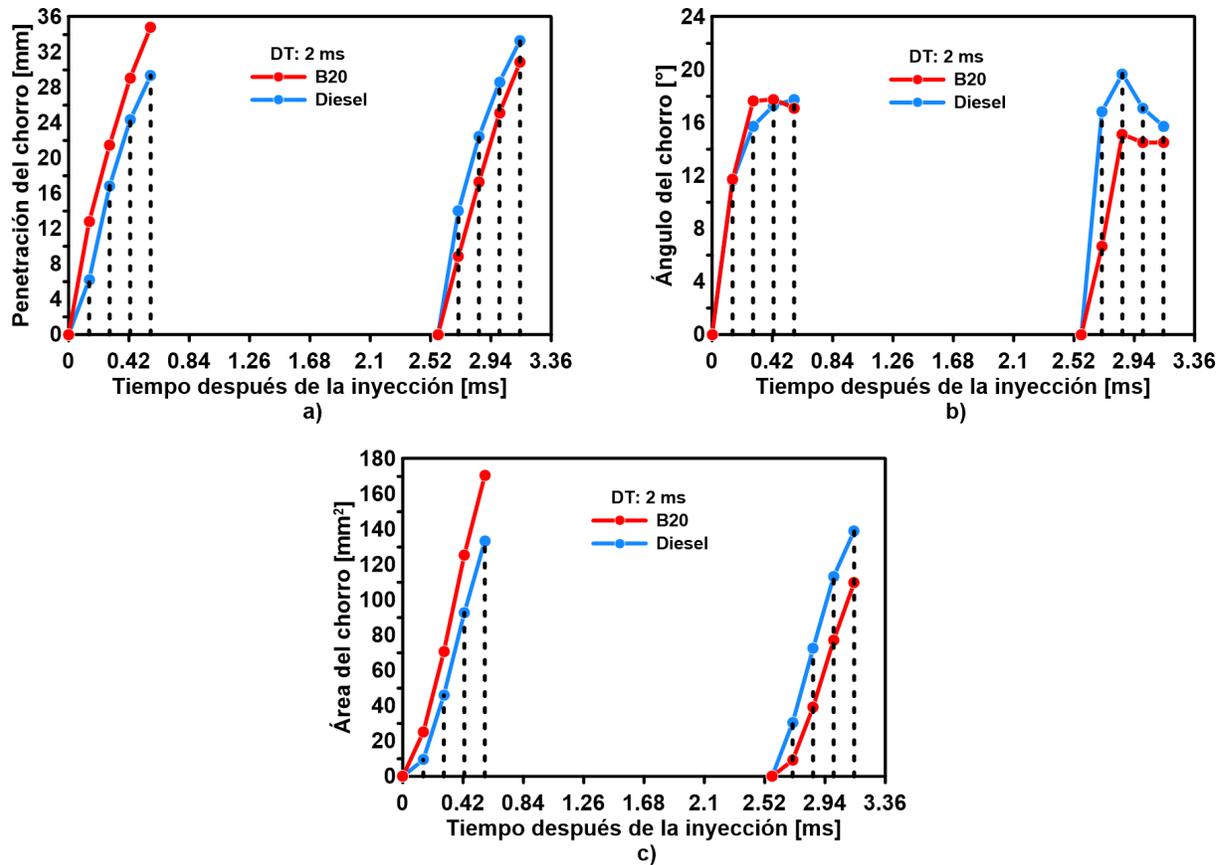


FIGURA 5.25: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y un valor de dwell time de 2 ms.

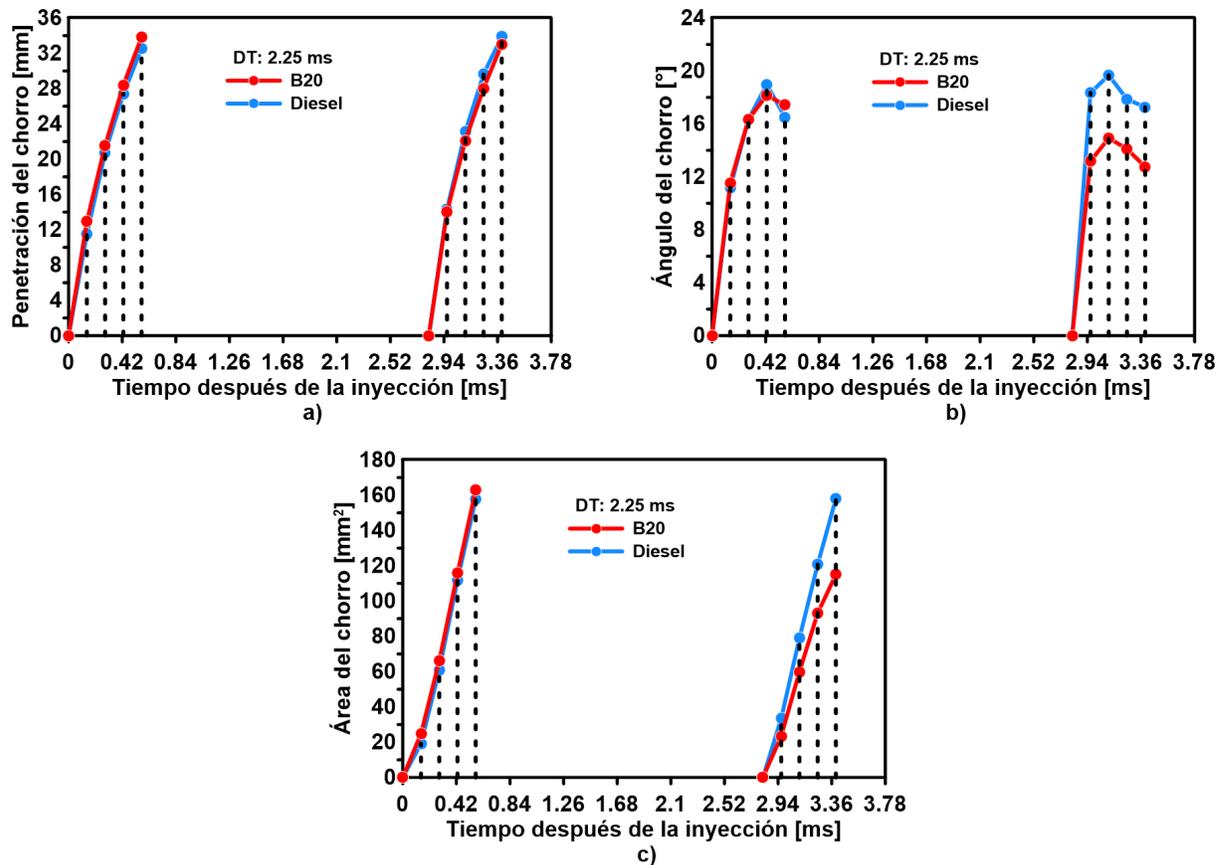


FIGURA 5.26: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y un valor de dwell time de 2.25 ms.

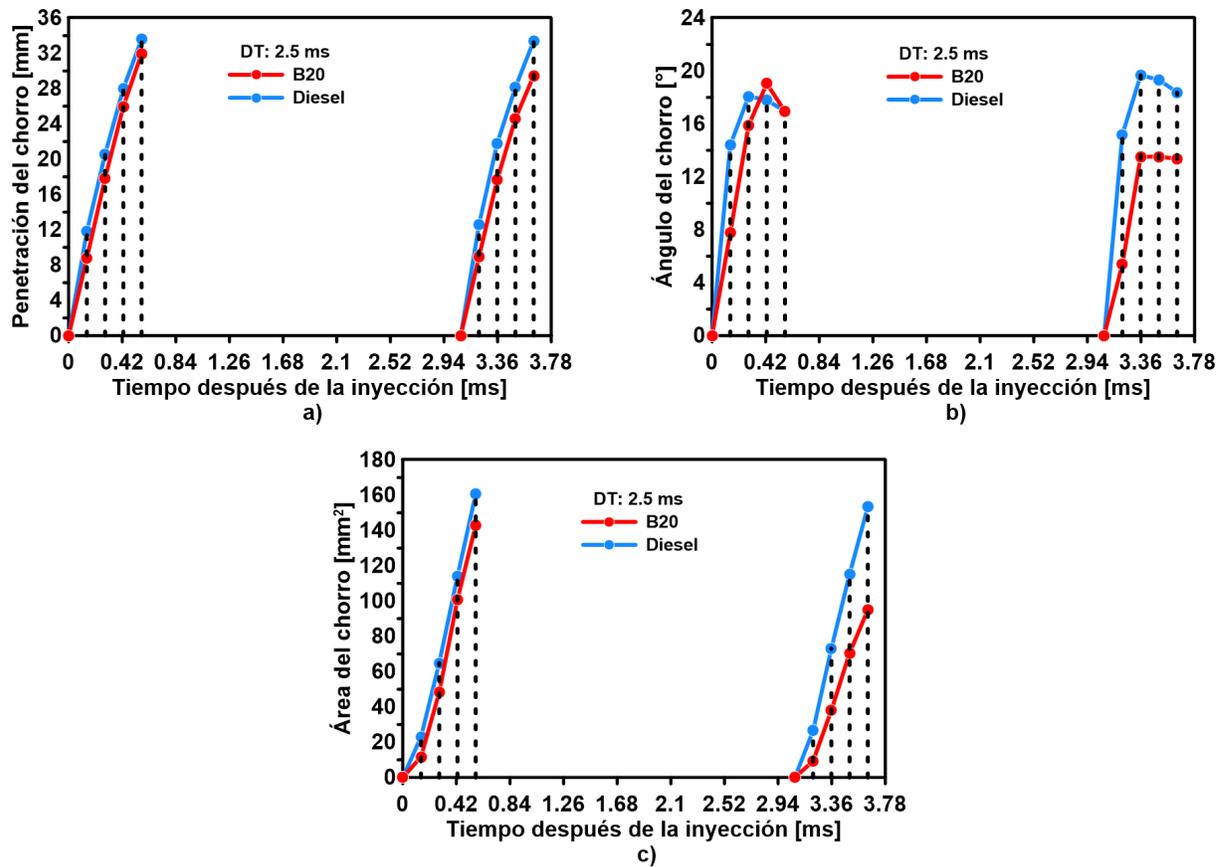


FIGURA 5.27: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y un valor de dwell time de 2.5 ms.

A partir de las Figuras 5.25, 5.26, y 5.27, se puede observar que los valores de la penetración y área del chorro de la mezcla B20 son mayores a los del diésel durante el primer evento de inyección, y en cada uno de los tiempos después de iniciada la inyección. Asimismo, los valores del ángulo no presentan variaciones significativas durante el primer evento de inyección. Este comportamiento puede deberse a la diferencia en los valores de viscosidad y densidad entre los combustibles estudiados, así como a los valores de tensión superficial, tal como se comentó anteriormente para el análisis empleando una presión de 140 MPa.

Con el objetivo de profundizar el análisis de la información mostrada previamente, en las figuras 5.28, 5.29 y 5.30 se muestran los valores de la penetración del chorro de la mezcla B20 y del diésel durante el primer y segundo evento de inyección, obtenidos a los tiempos aSOI señalados en las Figuras 5.25, 5.26 y 5.27, empleando los valores de valores de dwell time de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente.

Los tiempos después del inicio de la inyección previamente señalados en las Figuras 5.25, 5.26, y 5.27, se representan en las Figuras 5.28, 5.29, 5.30, 5.31, 5.32, 5.33, 5.34, 5.35 y 5.36 con el objetivo de profundizar en el análisis de los combustibles objeto de estudio. Específicamente, en las Figuras 5.28, 5.29 y 5.30 se muestran las evoluciones temporales de la penetración del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms, respectivamente. Asimismo, en las Figuras 5.31, 5.32 y 5.33, se muestran las evoluciones temporales del área del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms, respectivamente. Finalmente, en las Figuras 5.34, 5.35 y 5.36, se muestran las evoluciones temporales del ángulo del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms, respectivamente.

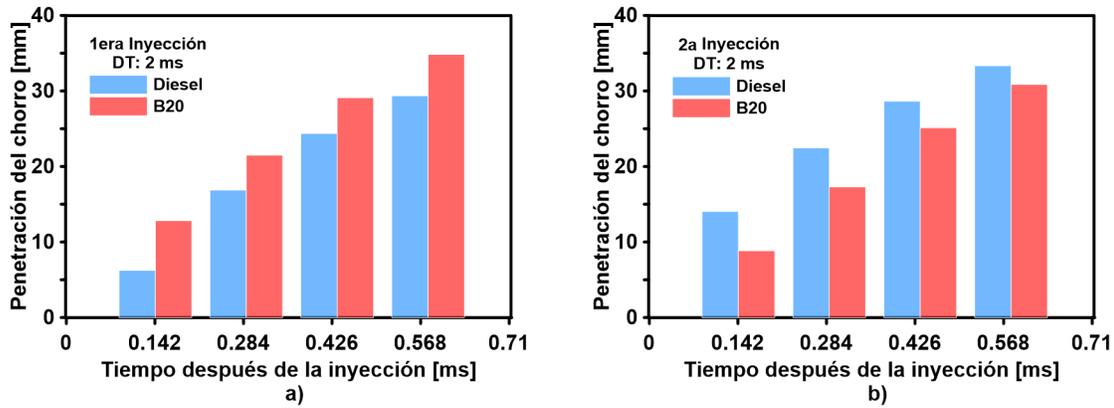


FIGURA 5.28: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

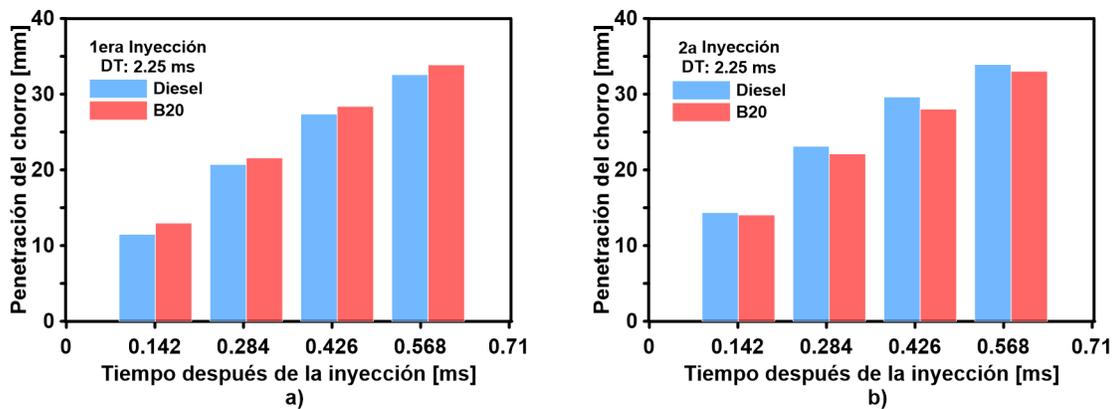


FIGURA 5.29: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

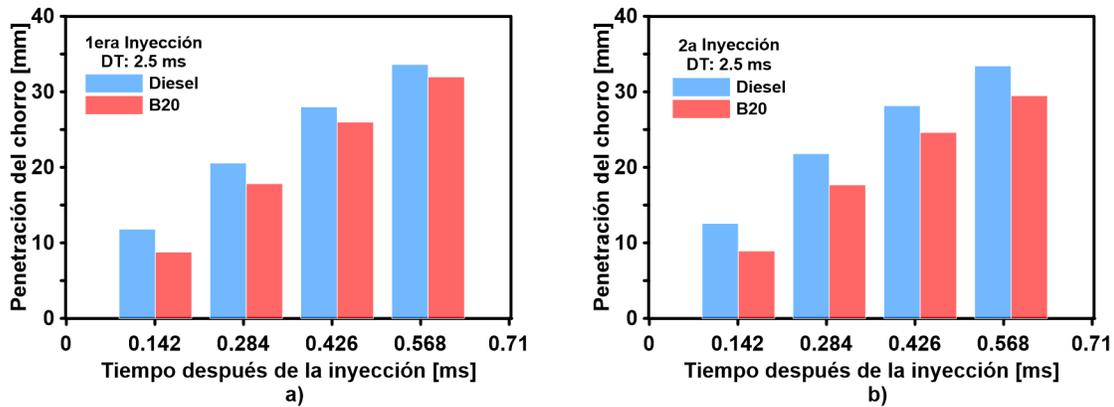


FIGURA 5.30: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

En las Figuras 5.28 a), 5.29 a) y 5.30 a), se observa que los valores de la penetración del chorro para la mezcla B20 son mayores en comparación a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, siendo de aproximadamente 19%, 4% y 5% para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, en el tiempo de 0.56 ms aSOI.

En las Figuras 5.28 b), 5.29 b) y 5.30 b), se observan los resultados para el segundo evento de inyección. Se observó que todos los valores de penetración son menores para B20 en comparación a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, teniendo un decremento del 7%, 3% y 12% para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, durante el tiempo de 0.56 ms aSOI.

Esto podría explicarse debido al efecto que se tiene a partir de la primera inyección en el gas ambiente de la cámara, así como a los valores de viscosidad más elevados de la mezcla B20 en comparación a los del diésel mineral, tal como se comentó anteriormente.

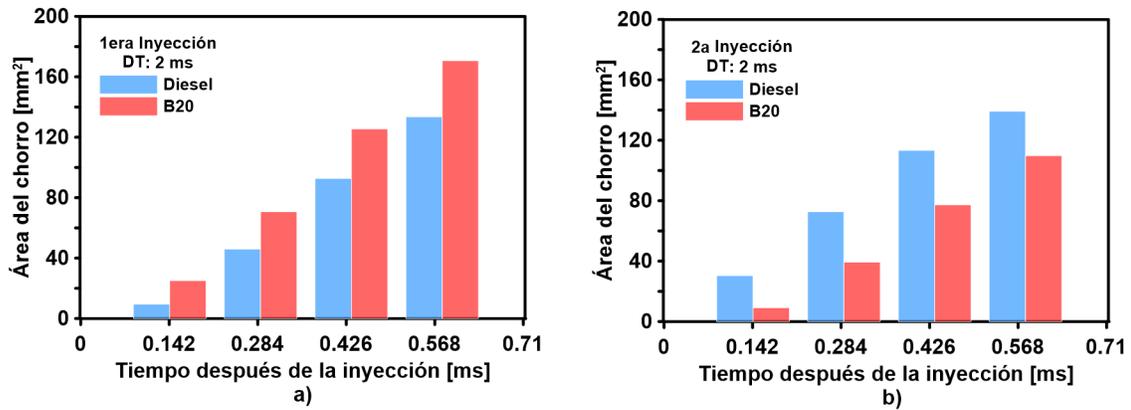


FIGURA 5.31: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

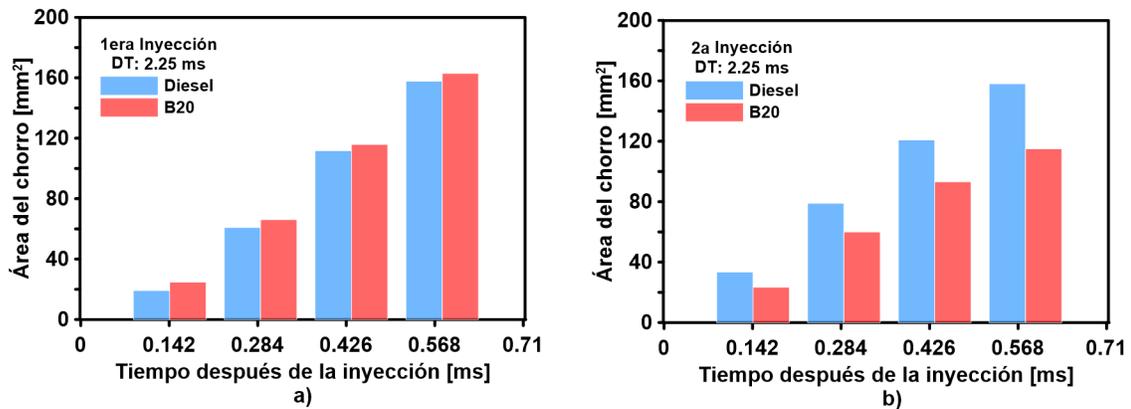


FIGURA 5.32: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

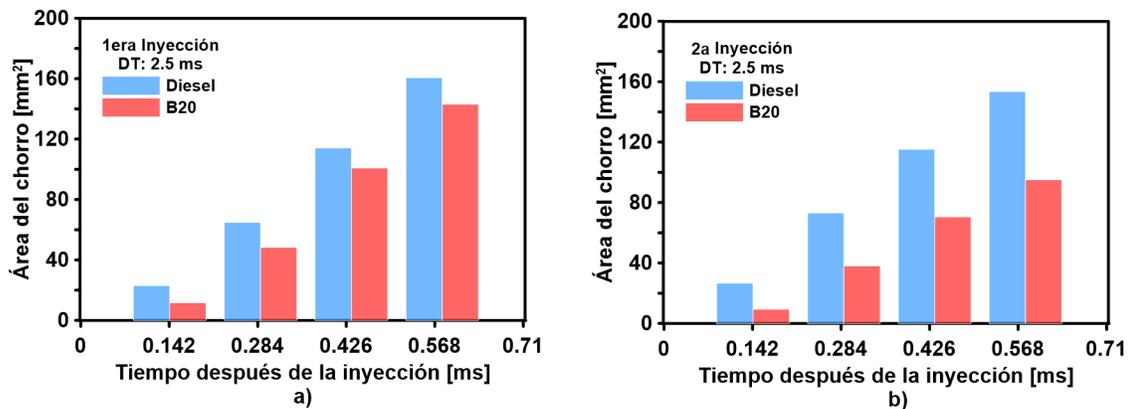


FIGURA 5.33: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

A partir de las Figuras 5.31 a), 5.32 a) y 5.33 a), se observa que los valores del área del chorro para el primer evento de inyección son mayores para la mezcla B20 en comparación a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, en aproximadamente 28 % y 3 % para los valores de DT de 2 ms y 2.25 ms, respectivamente. Sin embargo, para el valor de DT de 2.5 ms se obtuvo una disminución del 11 %, al llegar a 0.56 ms aSOI.

En las Figuras 5.31 b), 5.32 b) y 5.33 b) se observa que los valores del área del chorro de la mezcla B20 son menores a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, en aproximadamente 21 %, 27 %, y 38 % para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, y para el 0.56 ms aSOI.

Esto podría explicarse debido al efecto del gas ambiente y la disminución en la velocidad del chorro del segundo evento provocado por el primero, además de la relación que tienen la penetración y el ángulo con este parámetro en particular, debido a que tanto la penetración y el ángulo del diésel mineral son mayores que los de la mezcla B20 para la segunda inyección, en las cuales intervienen los parámetros de viscosidad y tensión superficial previamente mencionados.

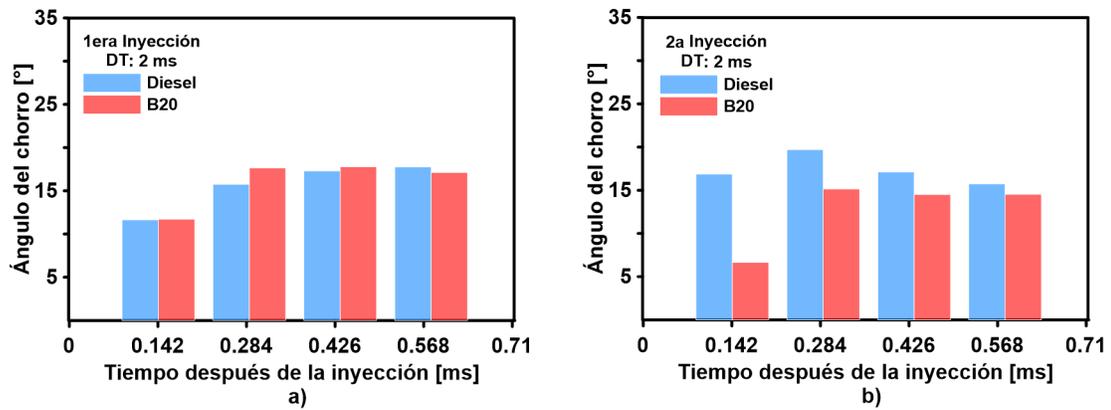


FIGURA 5.34: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

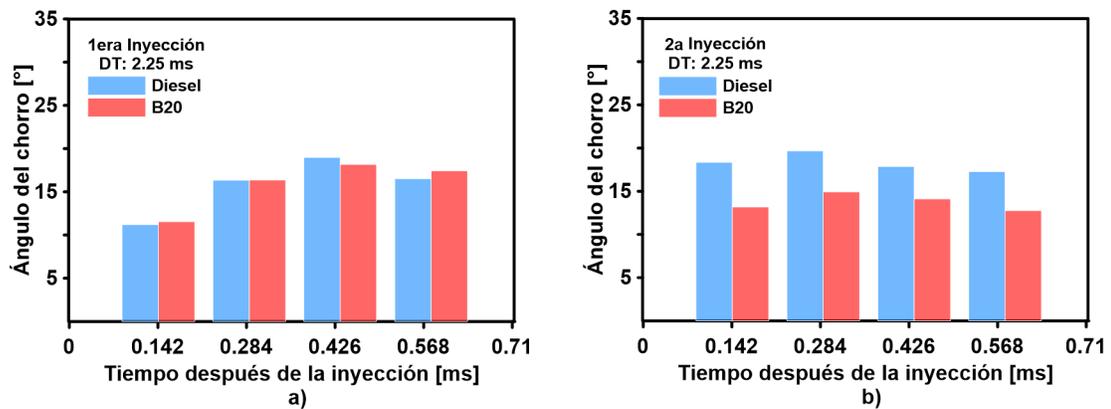


FIGURA 5.35: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

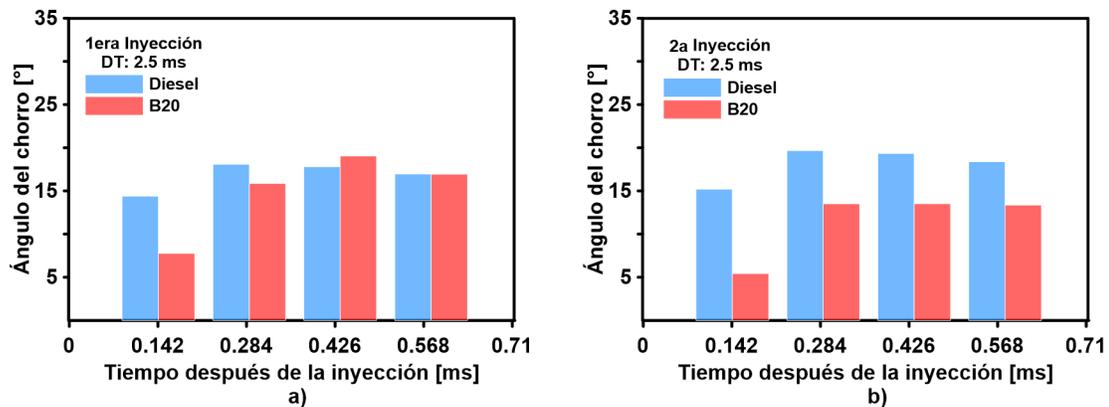


FIGURA 5.36: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

A partir de las Figuras 5.34 a), 5.35 a) y 5.36 a) se puede observar que los valores del ángulo del chorro del diésel son mayores a los de la mezcla B20 en un 4% al emplear un DT de 2 ms. Sin embargo, se observó una disminución del 6% para un DT de 2.25 ms. Asimismo, se observó una igualación en los valores de ambos combustibles al emplear un valor de DT de 2.5 ms, todos ellos para 0.56 ms aSOI.

A partir de las Figuras 5.34 b), 5.35 b) y 5.36 b) se puede observar que los valores del ángulo del chorro del diésel son mayores a los de la mezcla B20 en todos los instantes de tiempo después del inicio de la inyección, en aproximadamente 8%, 26% y 27% para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms y 2.5 ms, respectivamente, y para 0.56 ms aSOI.

Esto puede deberse a los valores de tensión superficial entre el diésel mineral y la mezcla B20, siendo de 28.57 y 28.09 mN/m, respectivamente. Así como a los valores de viscosidad y densidad mas elevados en la mezcla B20 en comparación con el diésel mineral.

Para complementar el presente estudio, se evaluó el efecto del primer evento de inyección sobre el segundo; para ello se normalizaron los valores de los parámetros macroscópicos del chorro durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, tanto para el diésel como para la mezcla B20; tal como se presenta en las Figuras 5.37, 5.38 y 5.39 para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente.

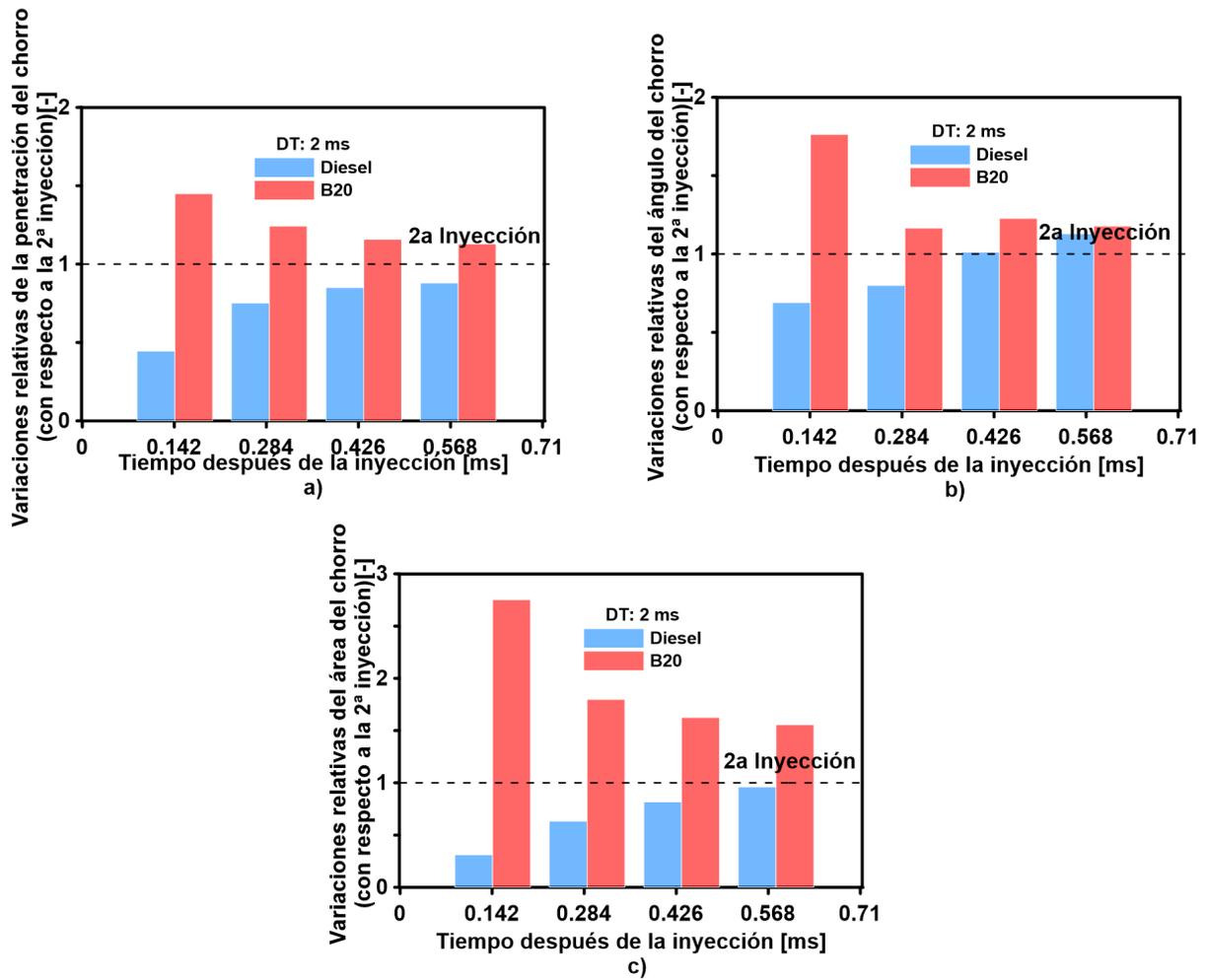


FIGURA 5.37: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

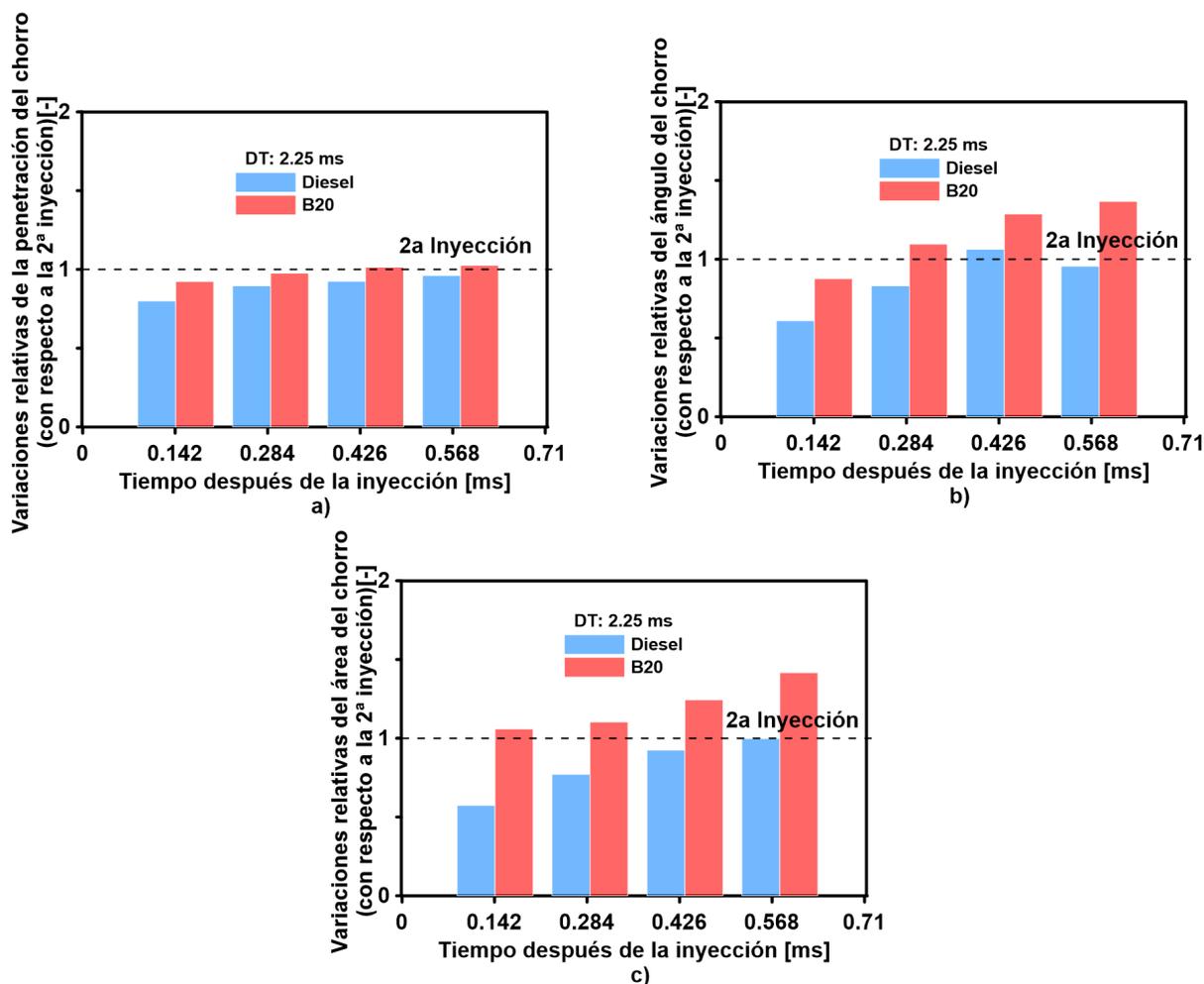


FIGURA 5.38: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

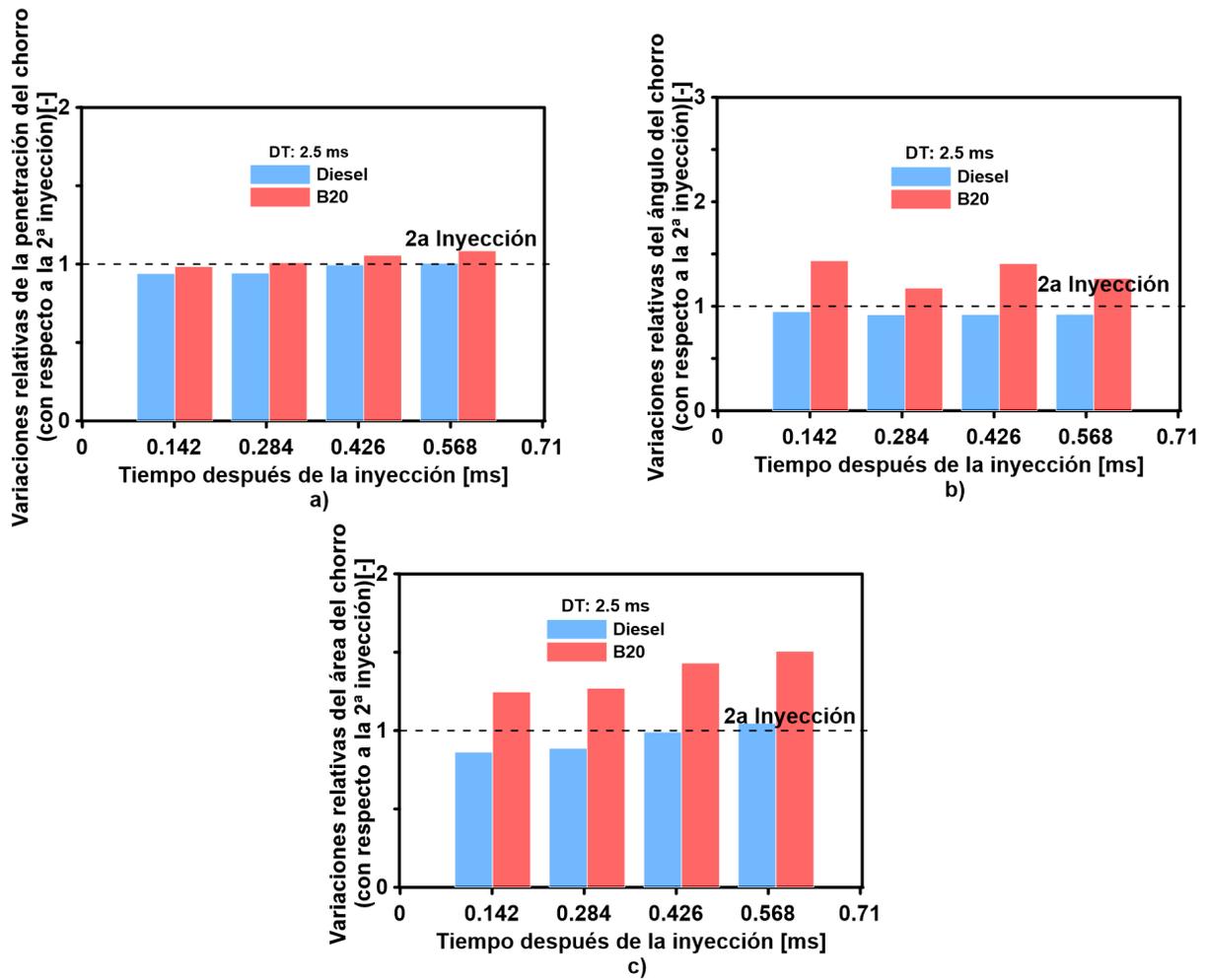


FIGURA 5.39: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) ángulo, y c) área durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 160 MPa.

Se puede observar que para cada uno de los dwell times empleados a medida que transcurre el tiempo posterior al inicio de la inyección, lo que indica un mayor desarrollo del chorro, cada uno de los combustibles presenta un valor igual o superior a la unidad, a excepción del caso de la Figura 5.37 a) y b). Debido a ello se concluye que el primer evento de inyección no produce un efecto en el segundo evento de inyección. Este comportamiento puede explicarse debido a la mayor viscosidad del combustible, lo que da como resultado un peor proceso de atomización en comparación con el diésel.

El comportamiento anteriormente mencionado, indica que los valores de dwell times empleados no permiten que exista un efecto de la primera inyección sobre la segunda inyección para la mezcla B20.

Presión de inyección de 180 MPa.

A continuación, en las Figuras 5.40, 5.41 y 5.42 se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro, cuando se emplearon los valores de dwell time de 2, 2.25, y 2.5 ms, respectivamente.

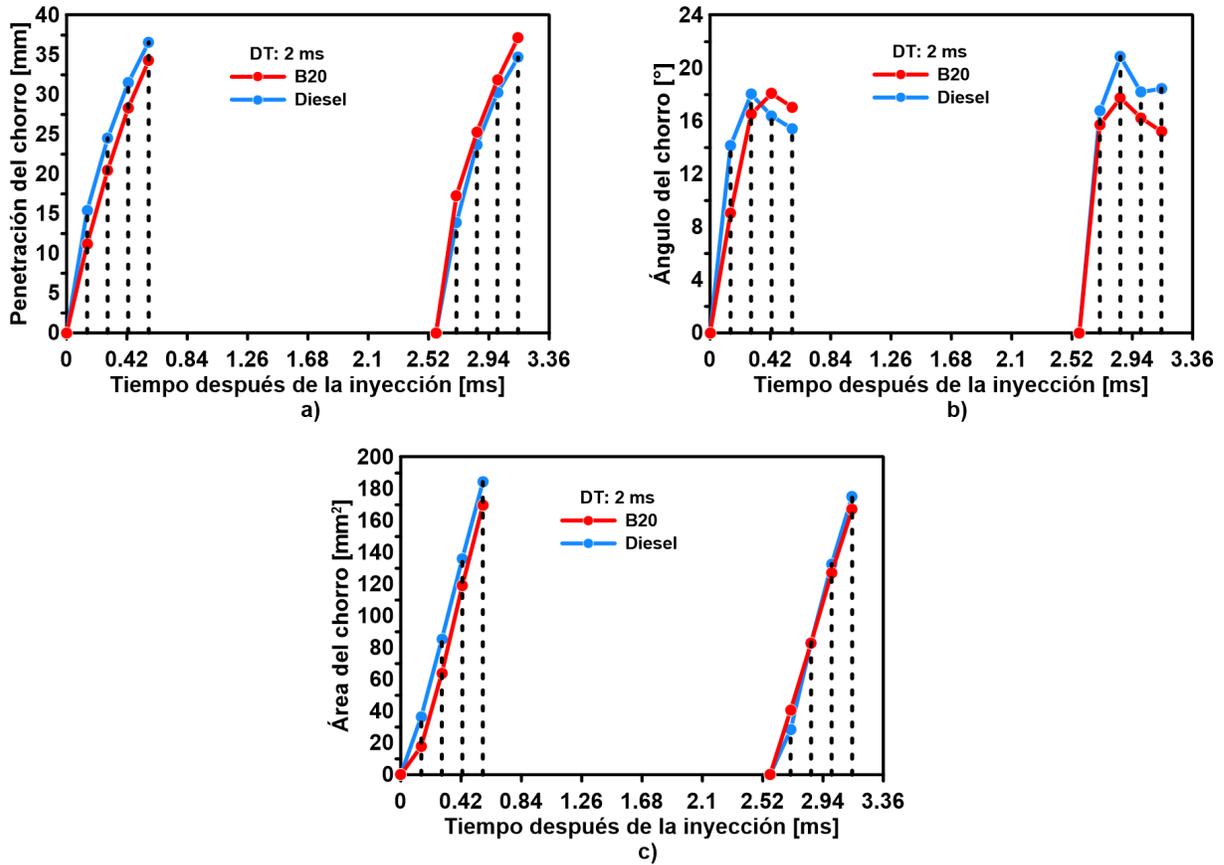


FIGURA 5.40: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y un valor de dwell time de 2 ms.

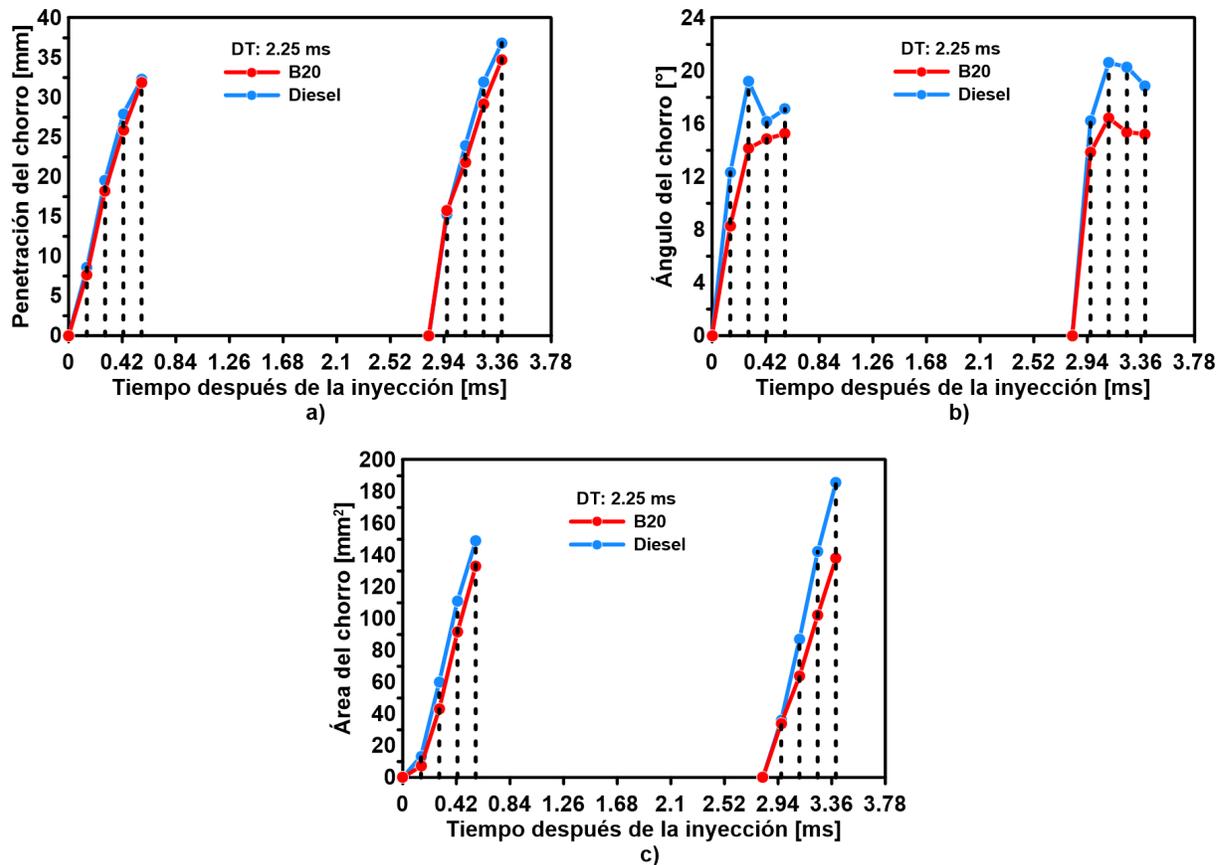


FIGURA 5.41: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y un valor de dwell time de 2.25 ms.

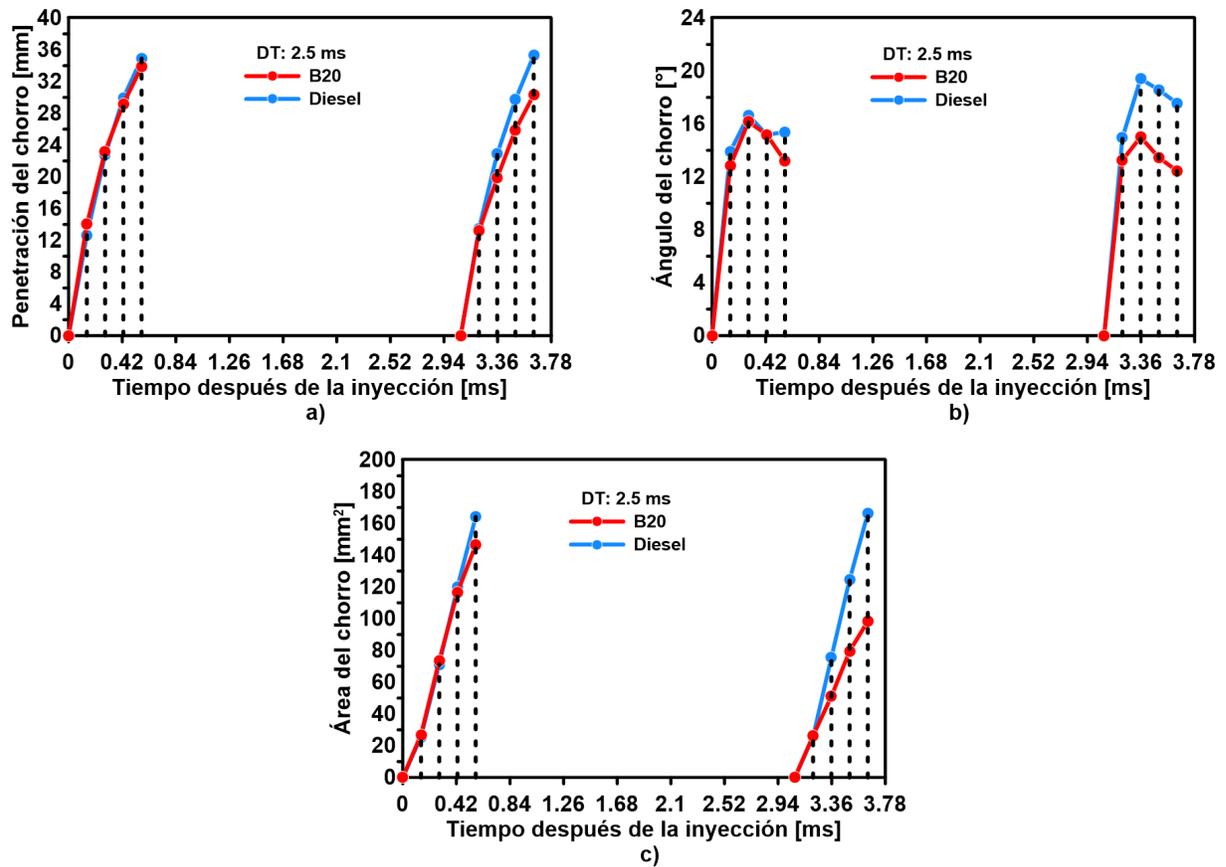


FIGURA 5.42: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla binaria B20, y del diésel: (a) penetración del chorro, (b) ángulo del chorro, y (c) área del chorro, obtenidos cuando se empleó un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y un valor de dwell time de 2.5 ms.

A partir de las Figuras 5.40 a), 5.41 a) y 5.42 a), se puede observar que los valores de la penetración y área del chorro de la mezcla B20 son mayores o iguales a los del diésel durante el primer evento de inyección, y en cada uno de los tiempos después de iniciada la inyección. Este comportamiento puede deberse a la diferencia en los valores de viscosidad y densidad entre los combustibles estudiados, tal como se ha mencionado con anterioridad. De igual manera, los valores del ángulo de cono presentaron un comportamiento con una variación muy poco considerable para la mezcla B20 en comparación con el diésel mineral en todos los tiempos después de iniciada la inyección durante el primer evento de inyección. Esto es generado como consecuencia de los valores de tensión superficial muy similares entre el diésel y la mezcla B20, siendo de 28.57 mN/m y 28.09 mN/m, respectivamente.

Los tiempos después del inicio de la inyección previamente señalados en las Figuras 5.40, 5.41 y 5.42, se representan en las Figuras 5.43, 5.44, 5.45, 5.46, 5.47, 5.48, 5.49, 5.50 y 5.51 con la finalidad de profundizar en el análisis de los combustibles objeto de estudio. Concretamente, en las Figuras 5.43, 5.44 y 5.45 se muestran las evoluciones temporales de la penetración del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms, respectivamente. En las Figuras 5.46, 5.47 y 5.48, se muestran las evoluciones temporales del área del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms, respectivamente. En las Figuras 5.49, 5.50 y 5.51, se muestran las evoluciones temporales del ángulo del chorro durante el primer y segundo evento de inyección, para los valores de DT de 2, 2.25, y 2.5 ms.

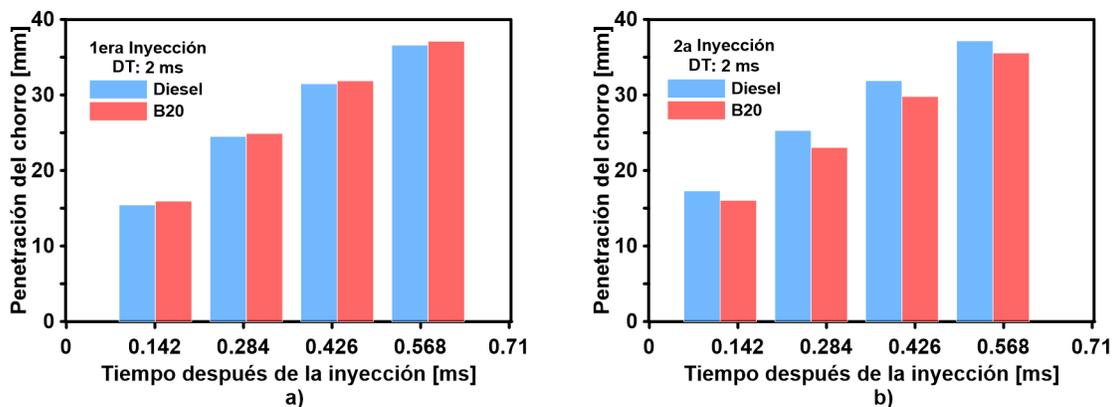


FIGURA 5.43: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

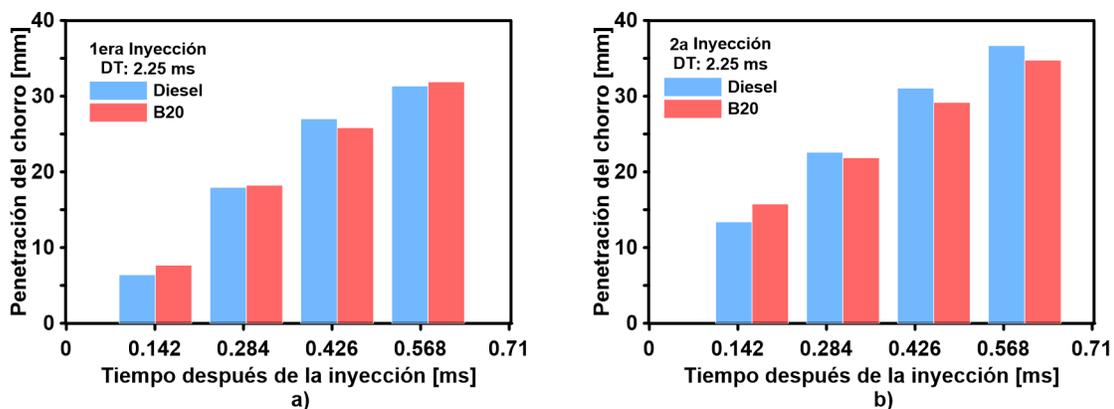


FIGURA 5.44: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

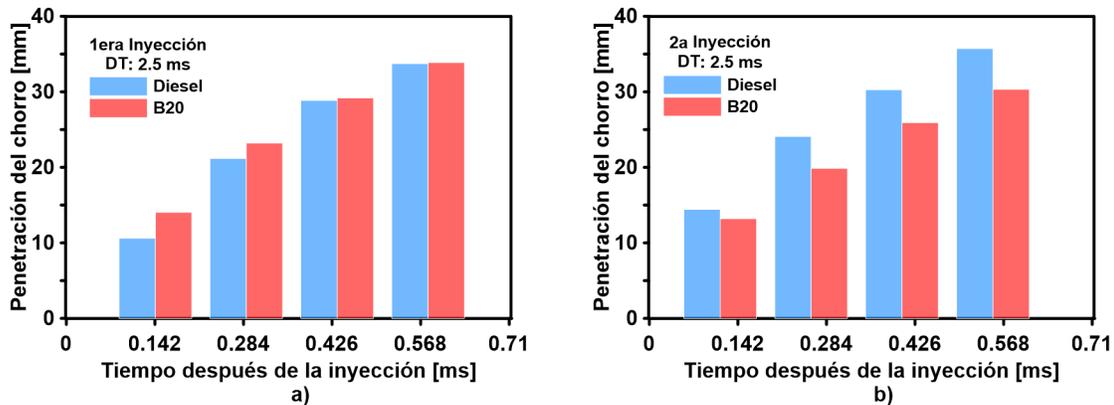


FIGURA 5.45: Evolución temporal de la penetración del chorro durante el: (a) primer, y (b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

Con base en las Figuras 5.43 a), 5.44 a) y 5.45 a), se observa que los valores de la penetración del chorro de la mezcla B20, son mayores a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, en aproximadamente 1 % y 2 % para los valores de DT de 2 ms y 2.25 ms, respectivamente. Sin embargo, para el valor de DT de 2.5 ms se tiene una igualación en los valores de penetración de ambos combustibles. Todo ello para el 0.56 ms aSOI.

En función de las Figuras 5.43 b), 5.44 b) y 5.45 b), se puede observar que los valores de la penetración del chorro de la mezcla B20 son menores a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, en aproximadamente 2 %, 6 %, 15 % para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, y al llegar a 0.56 ms aSOI. Lo anterior puede explicarse debido al elevado nivel de viscosidad de la mezcla B20 en comparación al diésel mineral, así como el cambio en el gas contenido en la cámara, el cual es afectado por la primera inyección, tal como se ha explicado con anterioridad, en el análisis de las presiones de 140 MPa y 160 MPa.

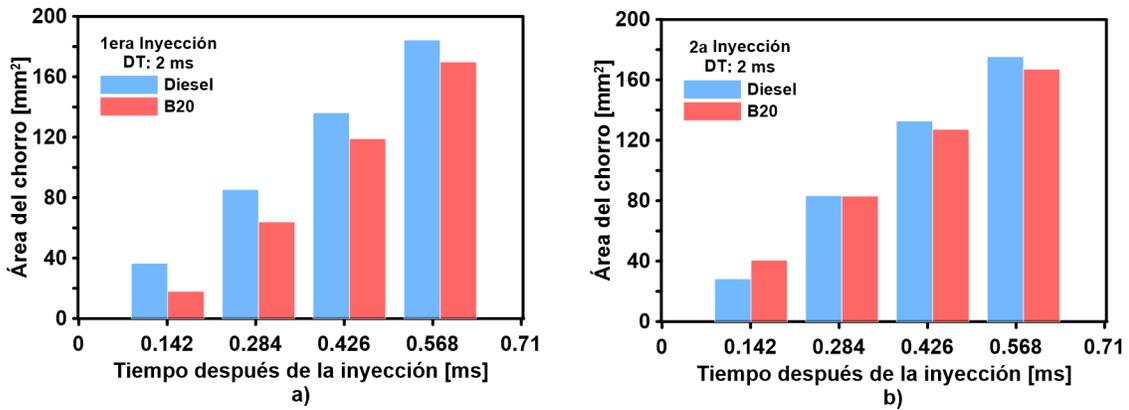


FIGURA 5.46: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

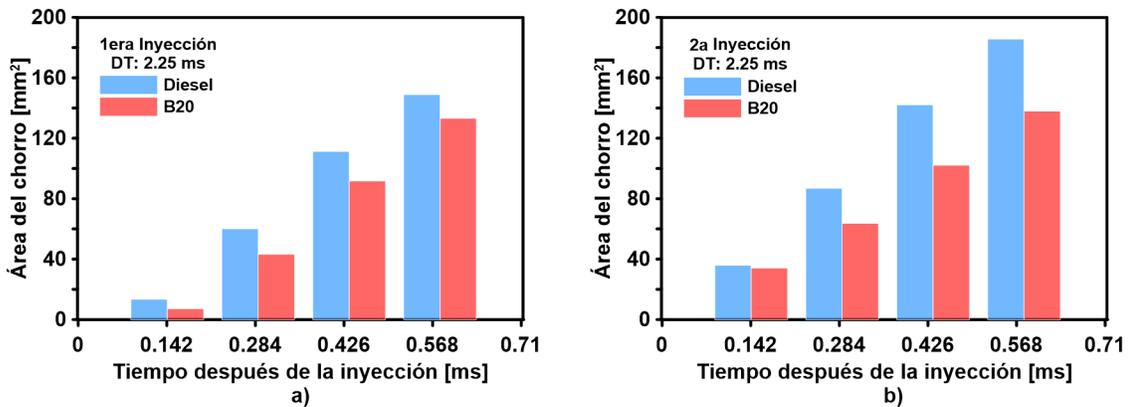


FIGURA 5.47: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

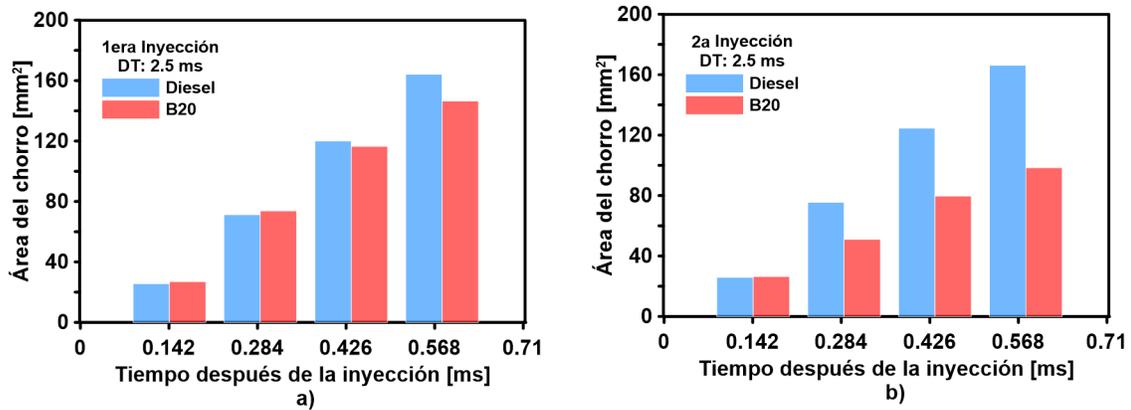


FIGURA 5.48: Evolución temporal del área del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

Con base en las Figuras 5.46 a), 5.47 a) y 5.48 a) se puede observar que los valores del área del chorro de las mezcla B20 son menores a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, en aproximadamente 8 %, 11 % y 11 % para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, y al alcanzar 0.56 ms aSOI.

Asimismo, partiendo de las Figuras 5.46 b), 5.47 b) y 5.48 b) se observa que los valores del área del chorro de las mezcla B20 son menores a los del diésel en todos los tiempos después del inicio de la inyección, en aproximadamente 5 %, 26 % y 41 % para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente, y al alcanzar 0.56 ms aSOI.

Esto podría explicarse debido a la mayor viscosidad y tensión superficial del combustible, asimismo a los valores registrados de penetración y ángulo, los cuales se encuentran relacionados con el área del chorro.

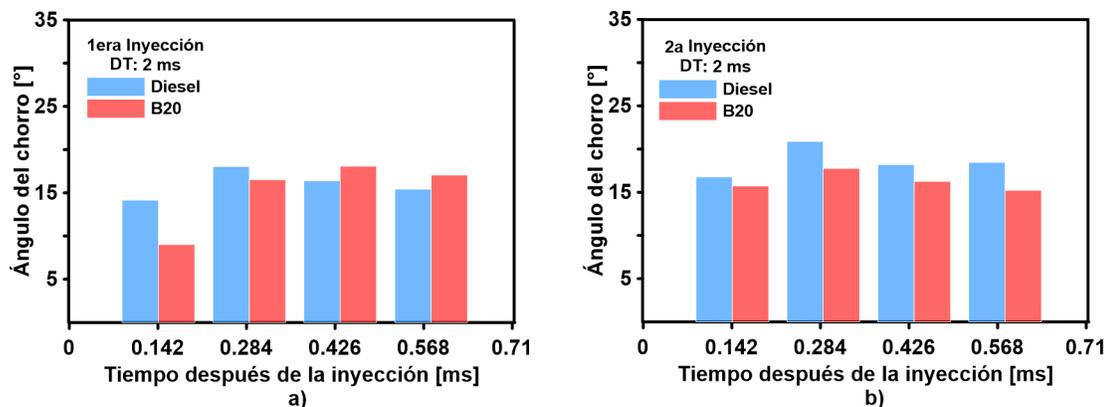


FIGURA 5.49: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

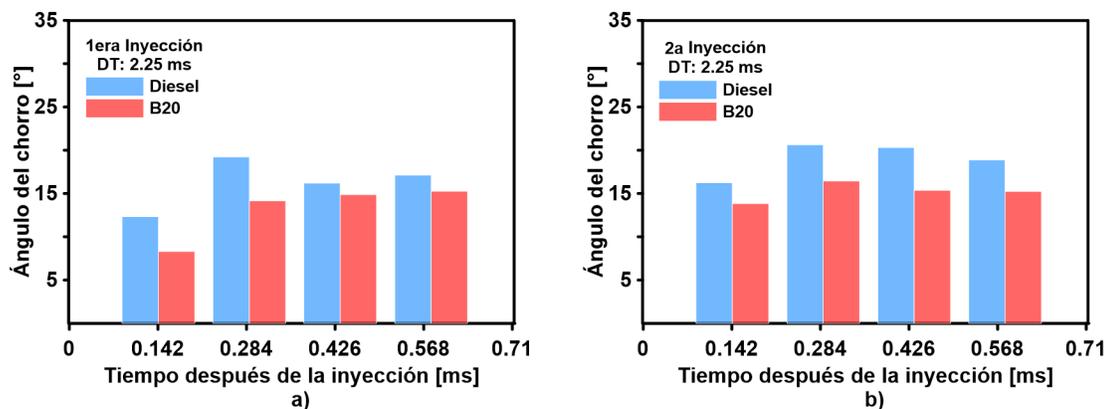


FIGURA 5.50: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

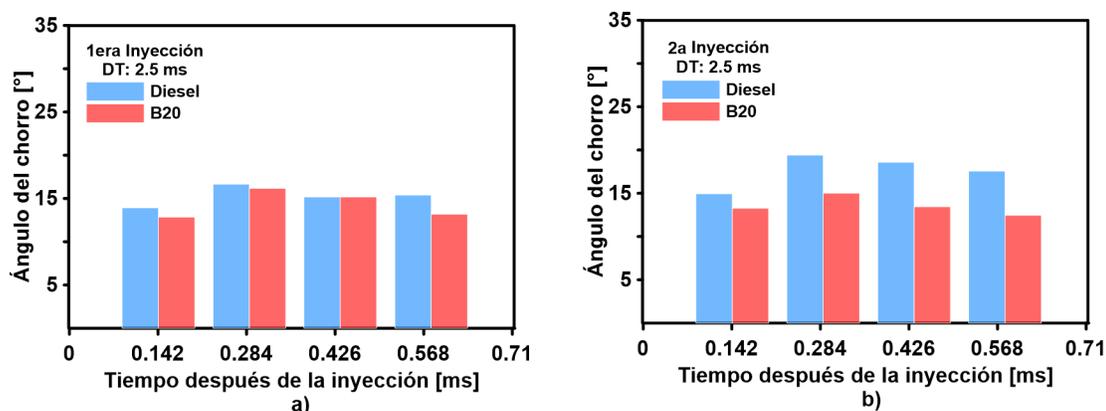


FIGURA 5.51: Evolución temporal del ángulo del chorro durante el: a) primer y b) segundo evento de inyección, obtenida cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

A partir de las Figuras 5.49 a), 5.50 a) y 5.51 a) se puede observar que los valores del ángulo del chorro del diésel son mayores a los de la mezcla B20 en todos los instantes de tiempo después del inicio de la inyección, exceptuando los 2 últimos tiempos después del inicio de la inyección para la Figura 5.49 a. Se obtuvieron ángulos del chorro mayores a la mezcla B20 de aproximadamente 11 % para el valor de DT de 2 ms. Sin embargo, para los valores de DT de 2.25 ms y 2.5 ms se observaron incrementos del 11 % y 14 %, respectivamente, empleando 0.56 ms aSOI.

En función de las Figuras 5.49 b), 5.50 b) y 5.51 b), se observa que los valores del ángulo del chorro son menores para la mezcla B20 en comparación al diésel en todos los instantes de tiempo después del inicio de la inyección, siendo de aproximadamente 18 %, 19 % y 29 % para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms y 2.5 ms, respectivamente, al llegar al tiempo de 0.56 ms aSOI.

Esto, como se ha explicado con anterioridad, puede deberse a los valores más elevados de viscosidad y densidad de la mezcla B20 en comparación al diésel mineral. además de la tensión superficial como se mencionaba anteriormente, podría deberse al efecto que tiene la primera inyección.

Adicionalmente, se evaluó el efecto del primer evento de inyección sobre el segundo; para ello se normalizaron los valores de los parámetros macroscópicos del chorro durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección al emplear tanto el diésel como la mezcla B20; tal como se muestra en las Figuras 5.52, 5.53 y 5.54, para los valores de DT de 2 ms, 2.25 ms, y 2.5 ms, respectivamente.

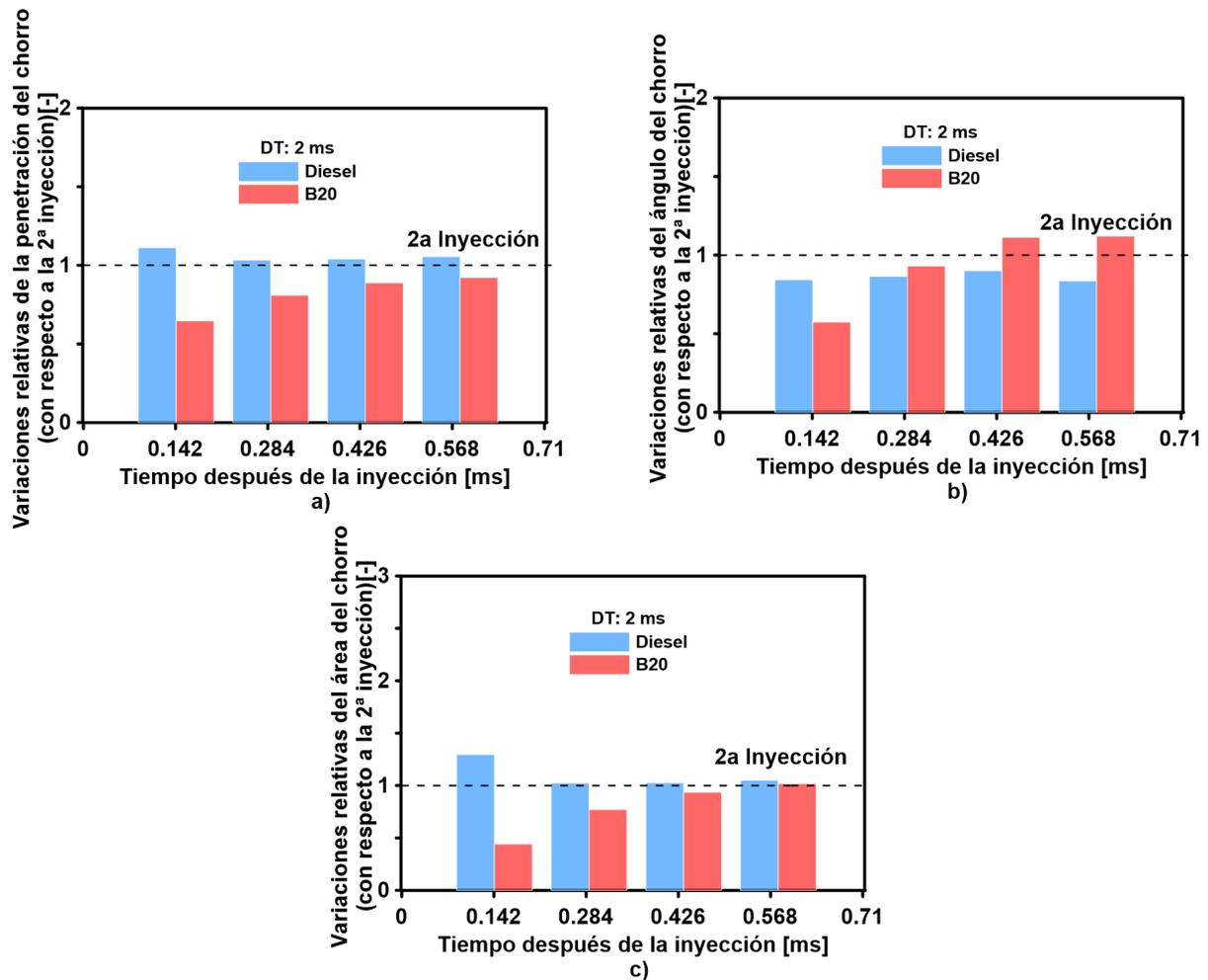


FIGURA 5.52: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) área, y c) ángulo durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

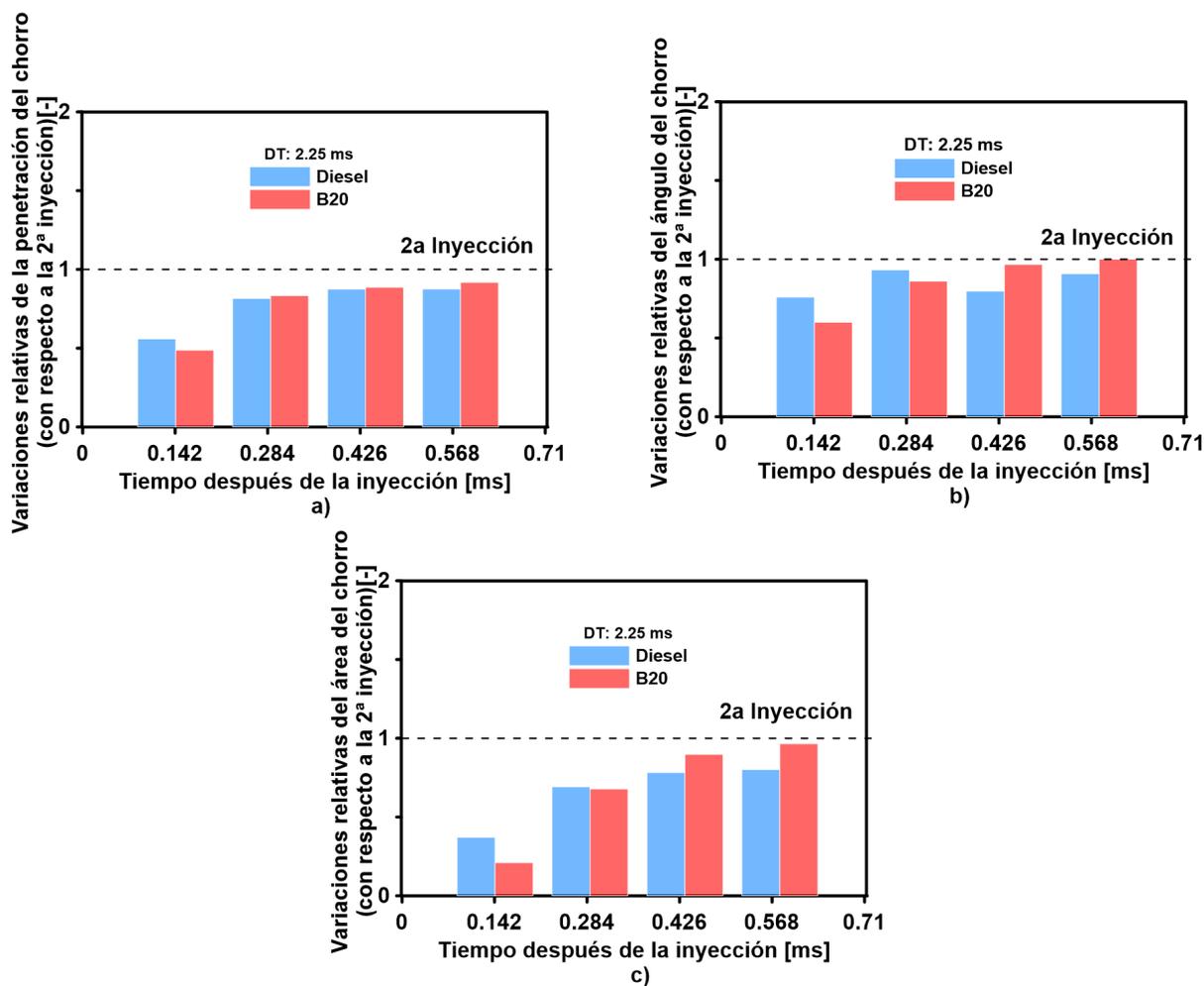


FIGURA 5.53: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) área, y c) ángulo durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.25 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

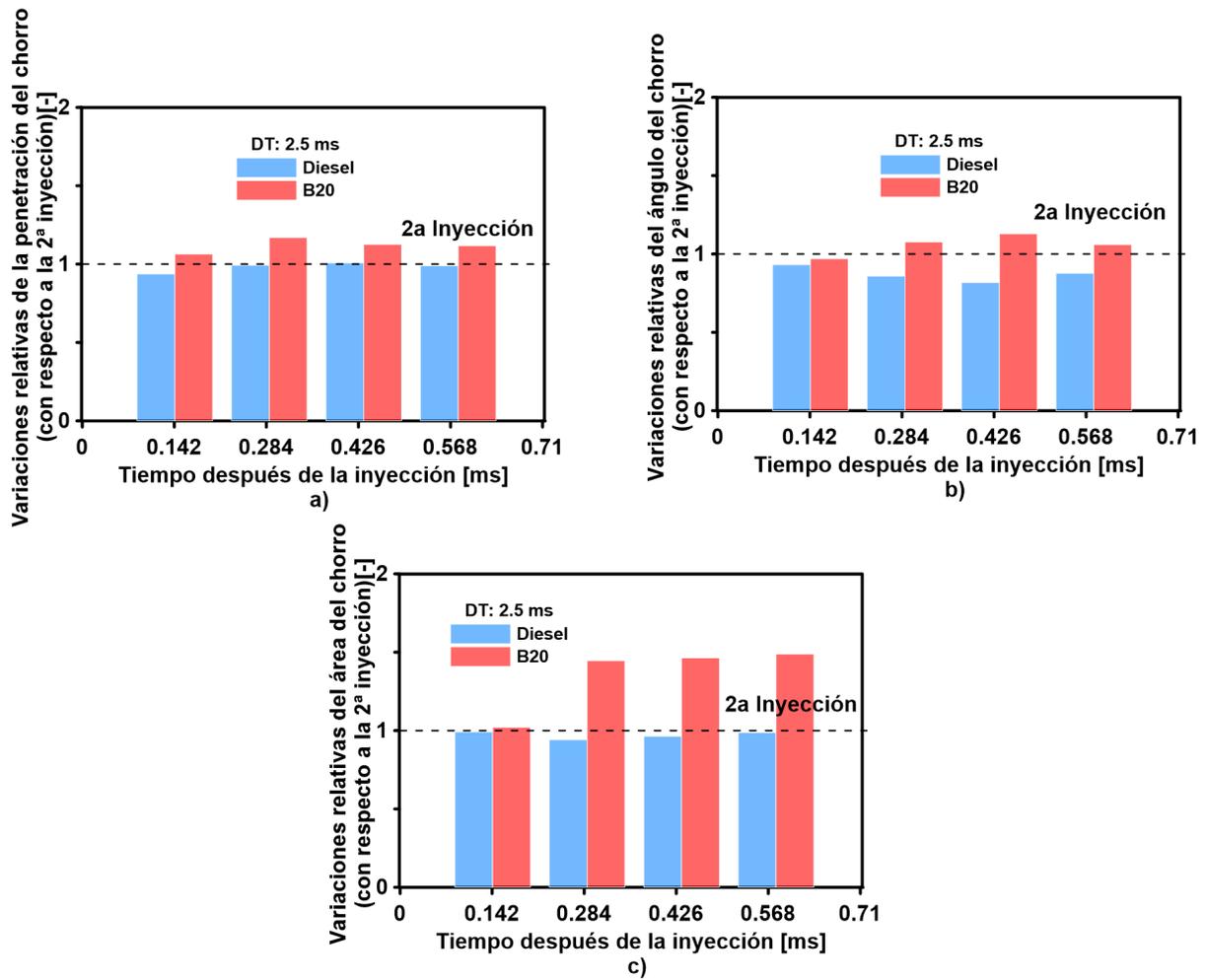


FIGURA 5.54: Variación relativa de los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20: a) penetración, b) área, y c) ángulo durante el primer evento de inyección con respecto a los valores obtenidos durante el segundo evento de inyección, y cuando se empleó un valor de DT de 2.5 ms, y un nivel de presión de inyección de 180 MPa.

Es posible observar que para cada uno de los dwell times el efecto en la penetración del chorro de la primera inyección sobre la segunda disminuye en cada uno de los parámetros conforme se incrementa el valor de dwell time. Esto indica que los dwell times empleados para este análisis no permiten que exista un efecto en la segunda inyección.

Se observa que para todos los casos estudiados de la mezcla B20, exceptuando los casos de las Figuras 5.52a y 5.53a la variación relativa de los parámetros de penetración, área y ángulo del chorro es mayor o igual a la unidad. Esto indica que no existe un efecto de la primera inyección sobre la segunda. Esto puede deberse a los valores más elevados de viscosidad, densidad y tensión superficial de la mezcla B20 en comparación al diésel mineral, así como a los valores de dwell time, como se mencionó con anterioridad para los casos de variación relativa al emplear las presiones de 140 MPa y 160 MPa.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

En el presente capítulo se sintetizan las principales conclusiones alcanzadas en el estudio realizado. Adicionalmente, se presentan los trabajos futuros que podrían complementarlo.

6.1 CONCLUSIONES

El biodiésel de aceite de ricino posee diversas características que lo hacen una alternativa viable para su implementación, como el hecho de que proviene de una fuente renovable. Asimismo, su materia prima no es apta para consumo humano, no se necesita un riego constante para su crecimiento, y su facilidad de producción. No obstante, su aplicación directa en motores Diesel no es posible debido a su elevado nivel de viscosidad, densidad y tensión superficial en comparación con el diésel mineral. Sin embargo, las propiedades físicas del biodiesel derivado de aceite de ricino se pueden equiparar a las del diesel mineral, empleando elevados niveles de presión de inyección.

Para ello, se caracterizaron los parámetros macroscópicos del chorro, tales como la penetración, ángulo, y área del chorro, empleando elevados niveles de presión de inyección en las estrategias de inyección simple y piloto. Seguidamente, se sintetizan las principales conclusiones alcanzadas en el presente estudio:

Si se centra la atención en el nivel de presión de inyección de 140 MPa, y a los 0.58 ms aSOI, se puede destacar que los valores de la penetración, ángulo, y área de la mezcla B20 son mayores a los del diésel, en aproximadamente, 1 %, 3 %, y 5 %, respectivamente.

Igualmente, en el nivel de presión de inyección de 160 MPa, los valores de la penetración, área, y ángulo del chorro de la mezcla B20 son mayores a los del diésel, en aproximadamente 6 %, 22 %, y 30 %, respectivamente.

Análogamente, en el nivel de presión de inyección de 180 MPa, los valores de la penetración, área y ángulo de la mezcla B20 son mayores a los del diésel, en aproximadamente 6 %, 10 % y 8 %, respectivamente.

De esta manera la causa por la que las propiedades físicas de la mezcla B20 no pudieron equipararse al elevar el nivel de presión de inyección pudo deberse al efecto que tiene la cantidad de masa inyectada sobre los parámetros macroscópicos del chorro. Esto debido a que la mayor viscosidad de los biocombustibles afecta la tasa de inyección,

por lo que se requiere de un mayor tiempo de energización para inyectar la misma masa en comparación al diésel mineral. Una menor concentración de combustible produce un chorro más pequeño, generando un cambio en el proceso de atomización, lo cual afecta al proceso de mezcla de la mezcla B20 en comparación al del diésel [60].

Los valores del ángulo del chorro para la mezcla B20 fueron semejantes a los del diésel mineral para un tiempo de 0.58 ms, esto es debido a la geometría del inyector, y los valores de tensión superficial muy similares en ambos combustibles, siendo de 28.57 mN/m para el diésel mineral y 28.09 mN/m para la mezcla B20.

Al emplear la estrategia de inyección piloto, se observó que no existen efectos de la primera inyección sobre la segunda, esto debido al elevado valor del dwell time, ya que este no permite que exista una interacción sobre la segunda inyección provocada por la primera.

Se observó que el incremento de la presión de inyección provoca una mejora en los parámetros macroscópicos del chorro de la mezcla B20 en comparación a los del diésel mineral. Este comportamiento fue observado tanto al emplear una estrategia de inyección simple como una estrategia de inyección piloto, teniendo como consecuencia una mejora en su proceso de mezcla.

Al emplear un elevado nivel de presión de inyección se observó una mejora en los efectos negativos de las propiedades físicas de la mezcla B20, sin embargo, ésta mejoría no llega a ser suficiente como para decantarse por su uso en motores Diesel bajo estas condiciones de operación en comparación al diésel mineral. Es por ello, que es necesario buscar alternativas que en conjunto con el nivel de presión de inyección a utilizar puedan mejorar las propiedades de la mezcla B20, como podrían ser el uso de aditivos o el precalentamiento.

6.2 TRABAJOS FUTUROS

Con el fin de complementar la presente investigación, se proponen los siguientes trabajos futuros:

- Analizar el comportamiento de la mezcla B20, similarmente empleando elevados niveles de presión de inyección, pero ahora en las estrategias de inyección dividida, y post-inyección.
- Compensar los elevados valores de densidad, viscosidad, y tensión superficial del biodiesel, a través de explorar otras vías, como es el uso de aditivos, y el precalentamiento del combustible.
- Averiguar si las conclusiones alcanzadas en el presente estudio, son las mismas, si ahora se utiliza un inyector diésel tipo piezoeléctrico.
- Evaluar el comportamiento de la mezcla B20 a partir de la caracterización de las emisiones contaminantes en un motor Diesel.
- Evaluar el comportamiento de la mezcla B20, a partir de la caracterización del proceso de evaporación de una gota de combustible.

APÉNDICE A

INFLUENCIA DEL TIEMPO DE ENERGIZACIÓN SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

A.1 INFLUENCIA DEL TIEMPO DE ENERGIZACIÓN SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL DIÉSEL Y LA MEZCLA B20, EMPLEANDO DIFERENTES NIVELES DE PRESIÓN DE INYECCIÓN

Se caracterizaron los parámetros macroscópicos del chorro empleando los tiempos de energización de 0.8 ms y 1.0 ms, una estrategia de inyección simple, así como los niveles de Prail de 140 MPa, 160 MPa, y 180 MPa, con la finalidad de averiguar el efecto del tiempo de energización en los parámetros macroscópicos del chorro. Seguidamente, se presentan los resultados obtenidos.

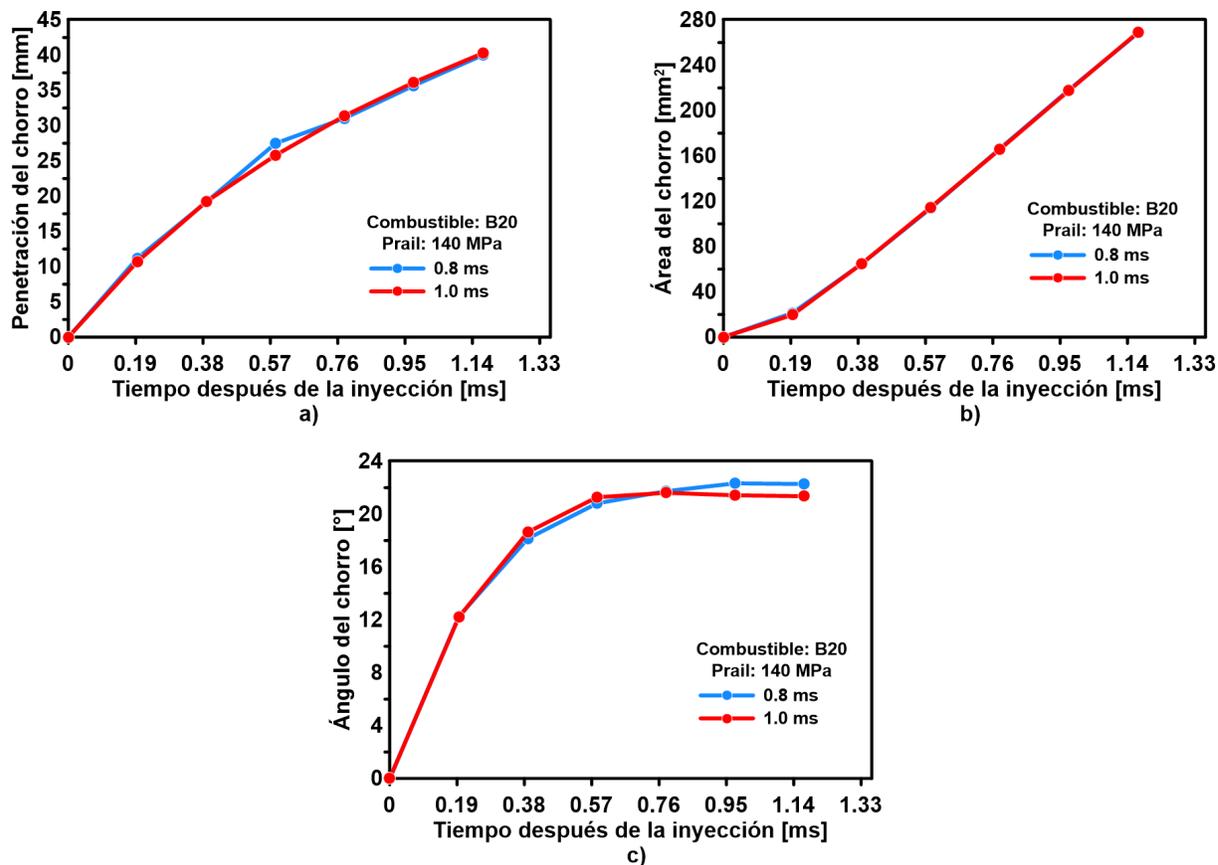


FIGURA A.1: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms.

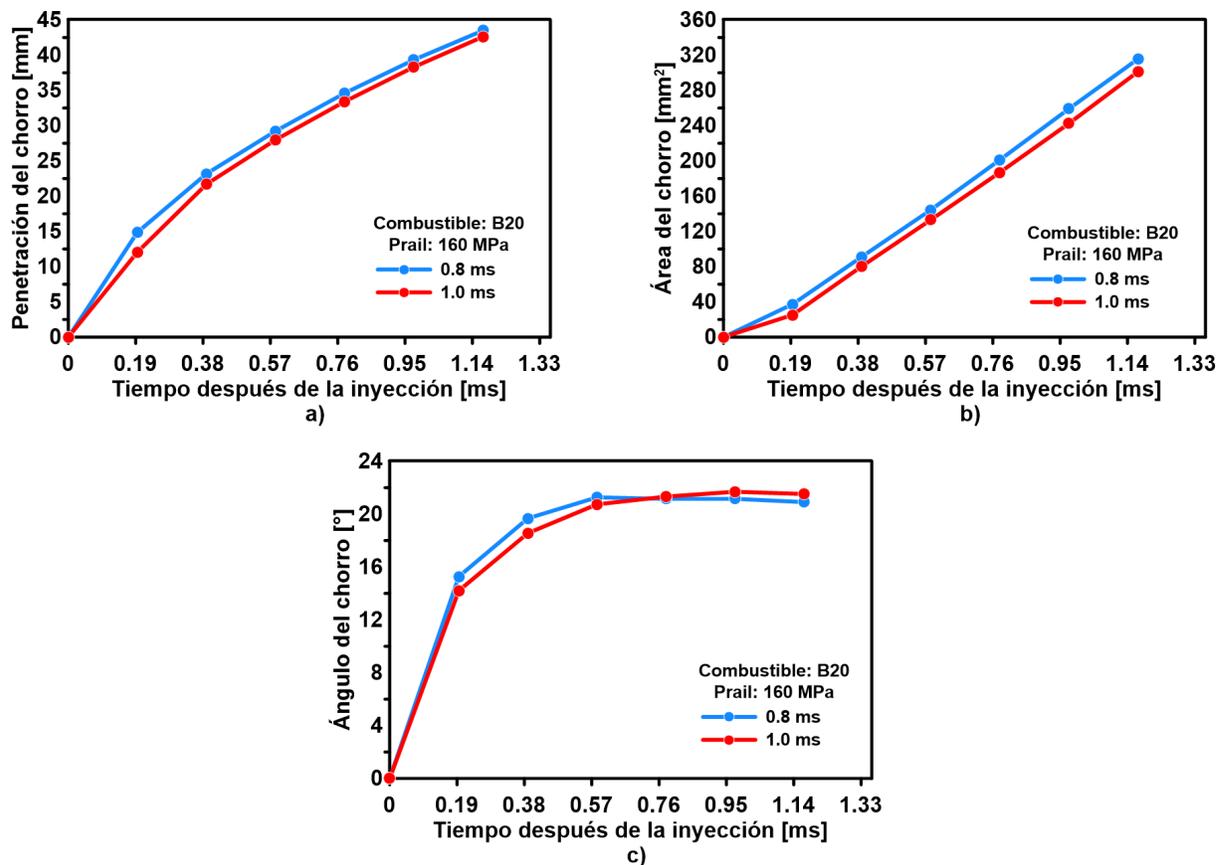


FIGURA A.2: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms.

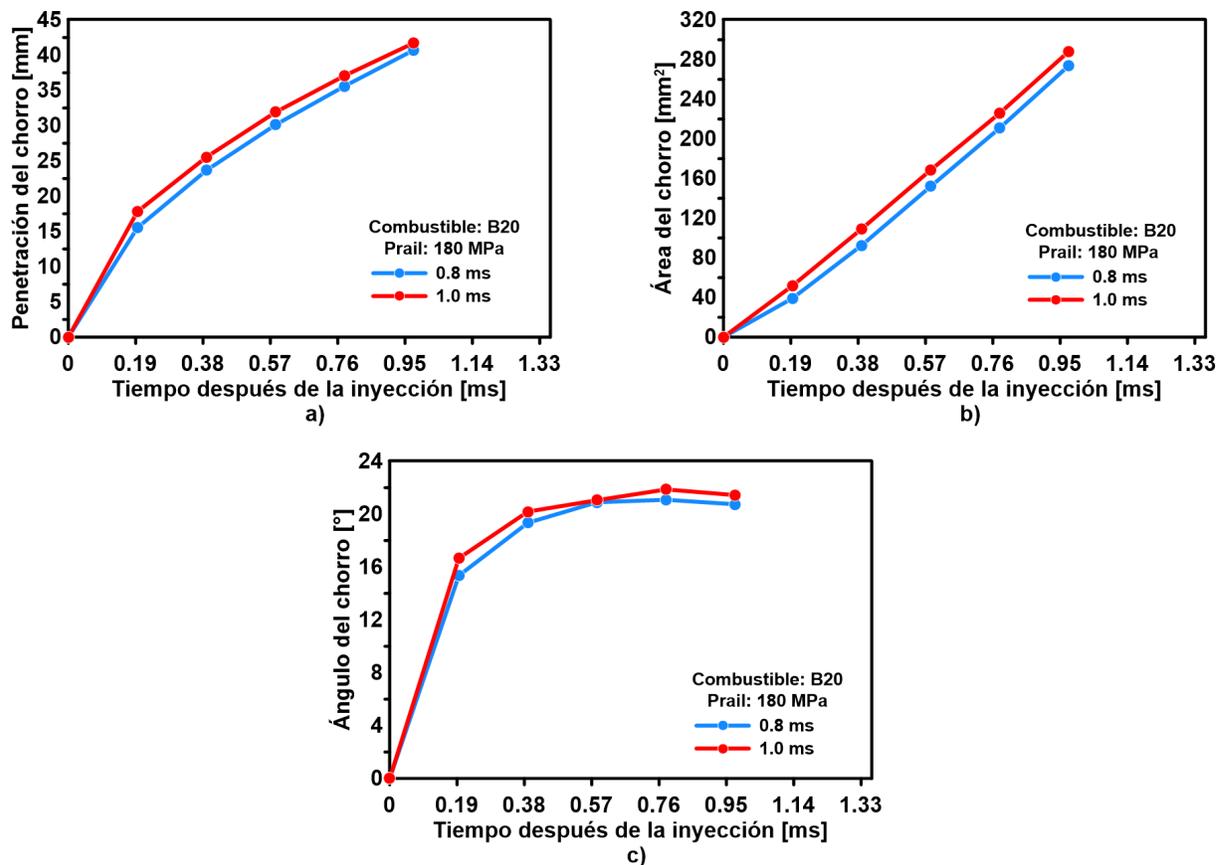


FIGURA A.3: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms.

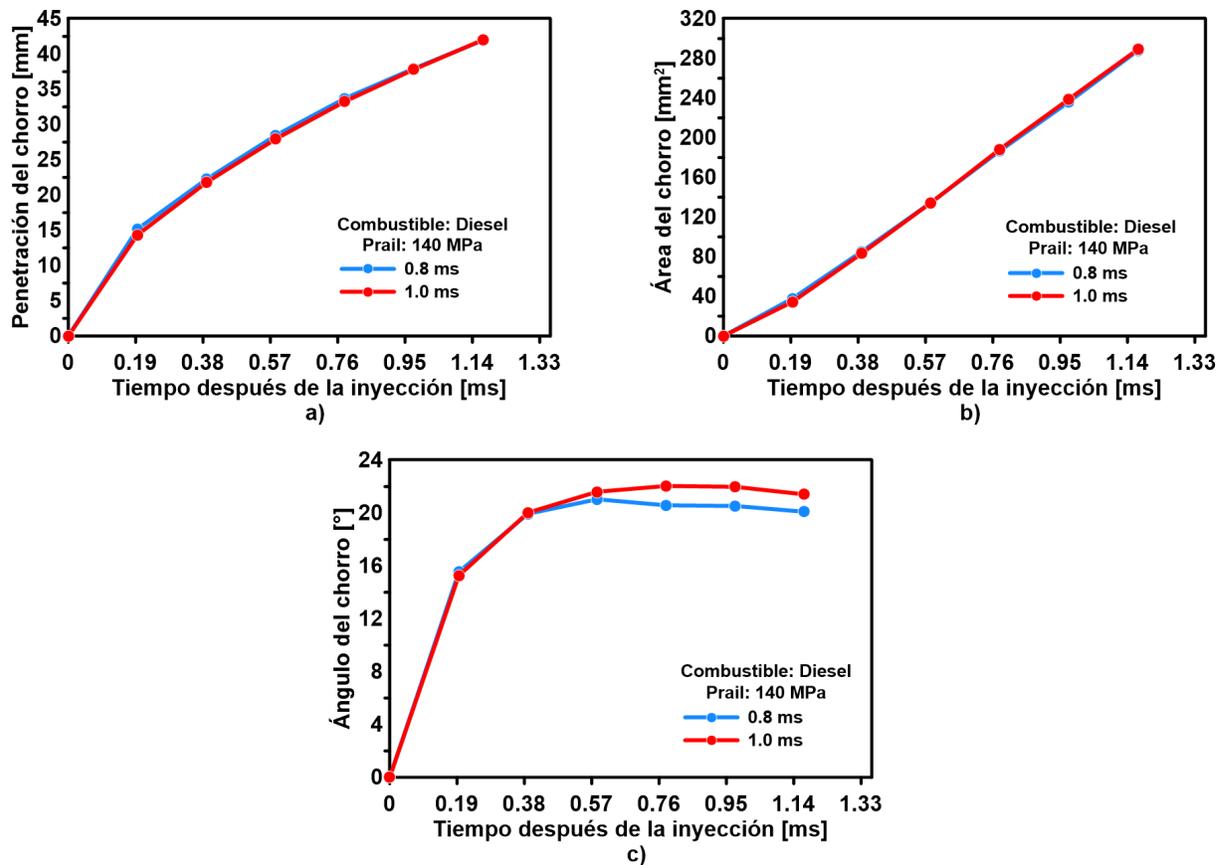


FIGURA A.4: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para diésel, y empleando un nivel de presión de inyección de 140 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms.

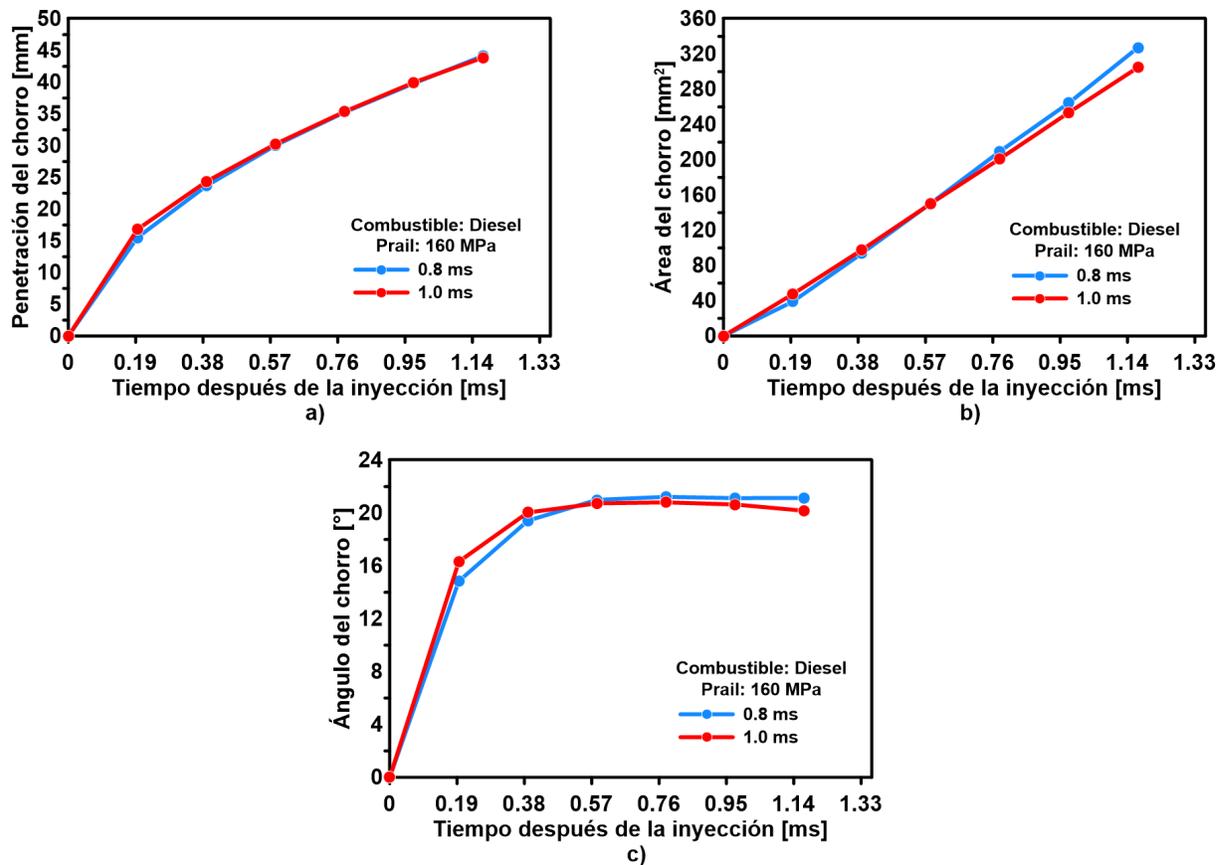


FIGURA A.5: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para diésel, y empleando un nivel de presión de inyección de 160 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms.

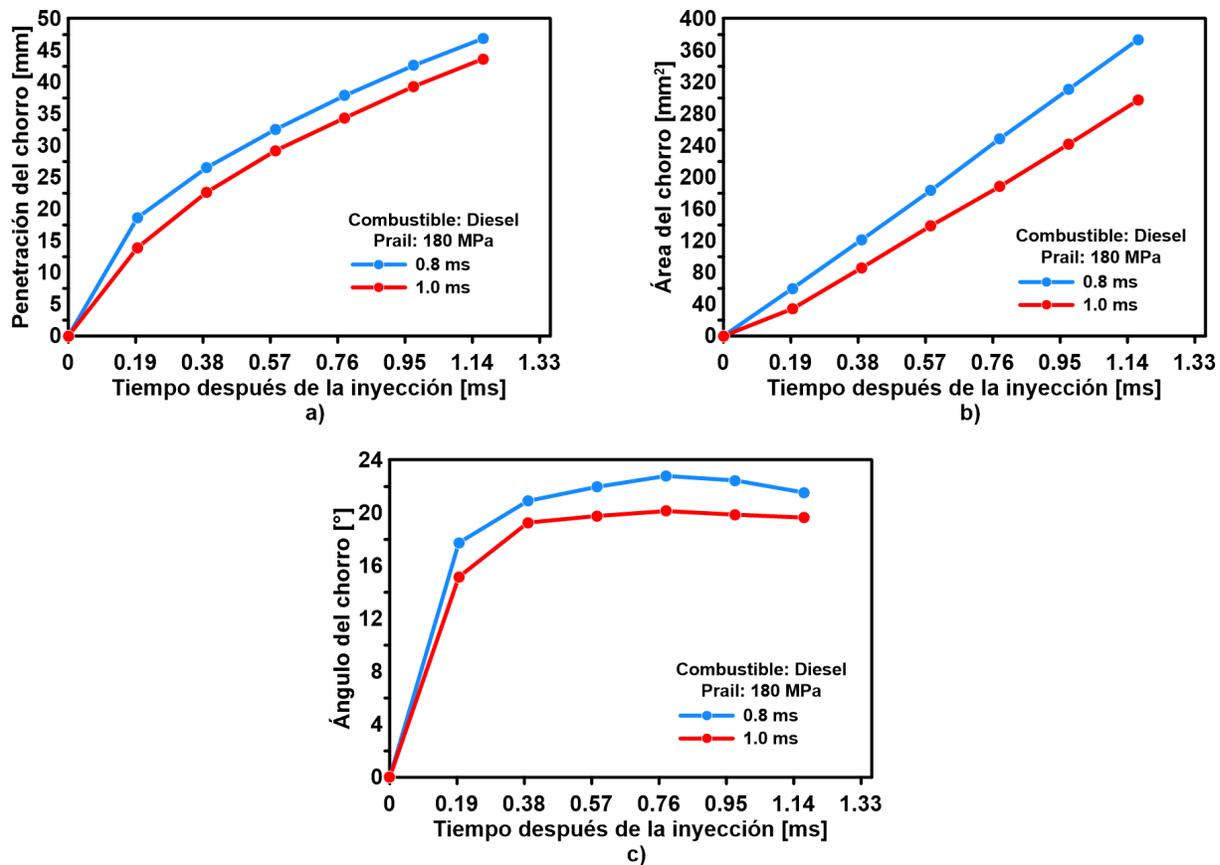


FIGURA A.6: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para diésel, y empleando un nivel de presión de inyección de 180 MPa, y los tiempos de energización de 0.8 y 1 ms.

Se observó que, para cada nivel de presión de inyección y para cada uno de los tiempos de energización empleados, el tiempo de energización no influye en el comportamiento de los parámetros macroscópicos del chorro.

APÉNDICE B

INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

B.1 INFLUENCIA DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN SOBRE LOS PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO

En las Figuras B.1, B.2, B.3 y B.4, se muestran las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro, empleando los tiempos de energización de 0.8 ms y 1 ms, y los niveles de presión de inyección de 140 MPa, 160 MPa, y 180 MPa.

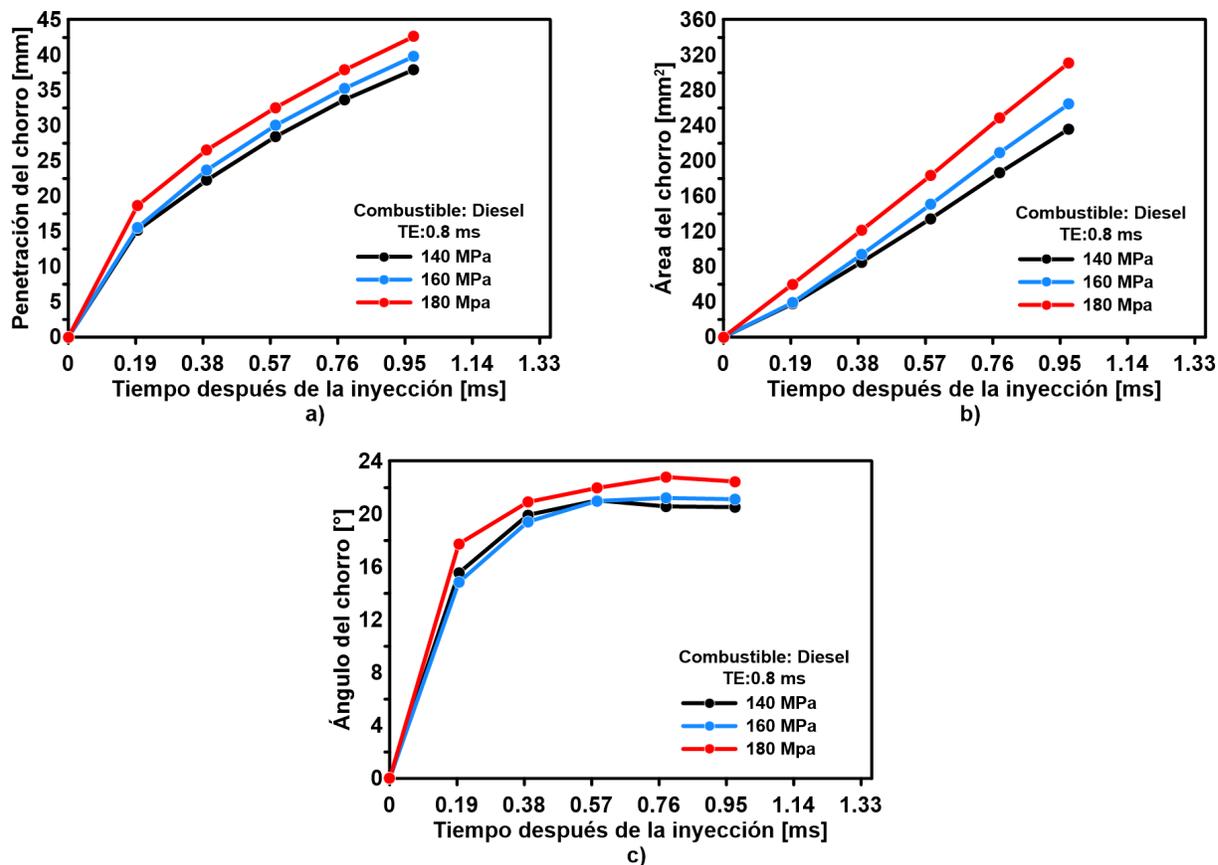


FIGURA B.1: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para el diésel, y empleando los niveles de presión de inyección de 140, 160, y 180 MPa, y un tiempo de energización de 0.8 ms.

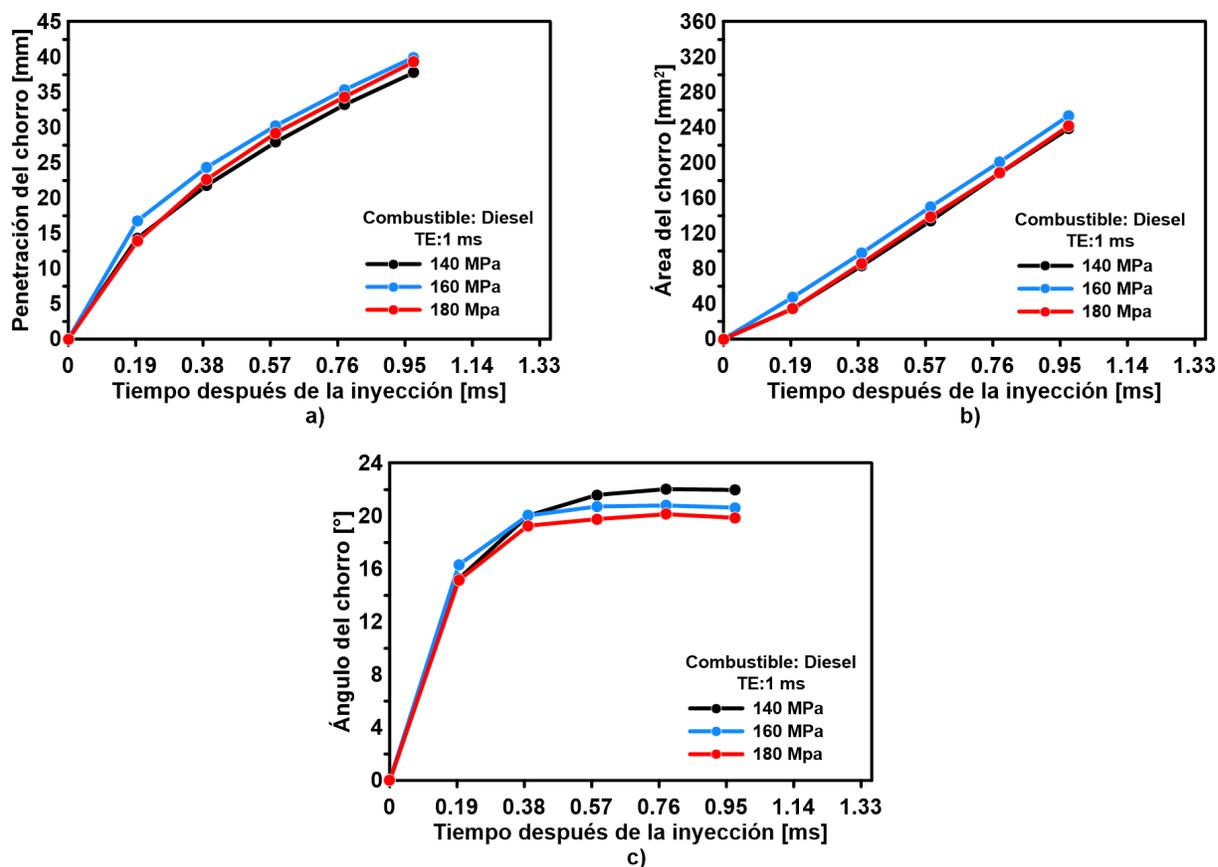


FIGURA B.2: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para el diésel, y empleando los niveles de presión de inyección de 140, 160, y 180 MPa, y un tiempo de energización de 1 ms.

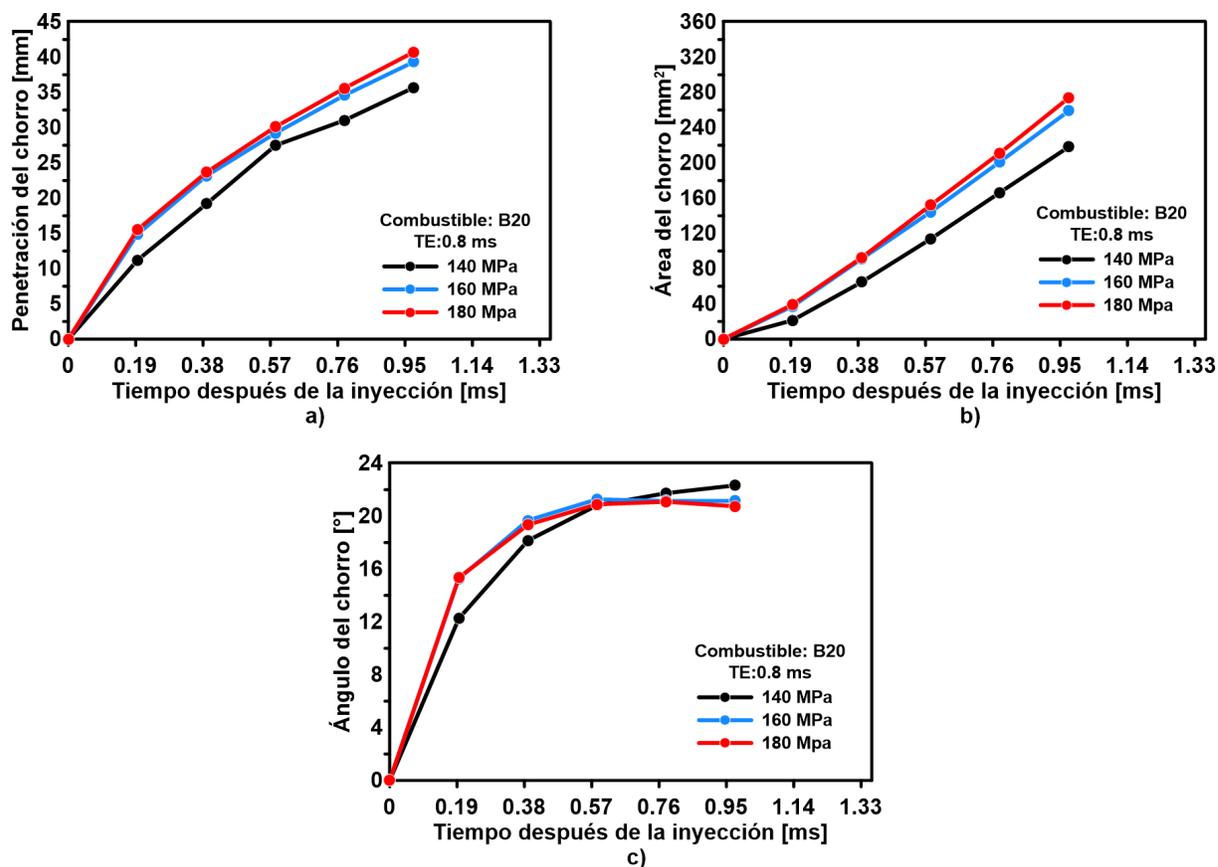


FIGURA B.3: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando los niveles de presión de inyección de 140, 160, y 180 MPa, y un tiempo de energización de 0.8 ms.

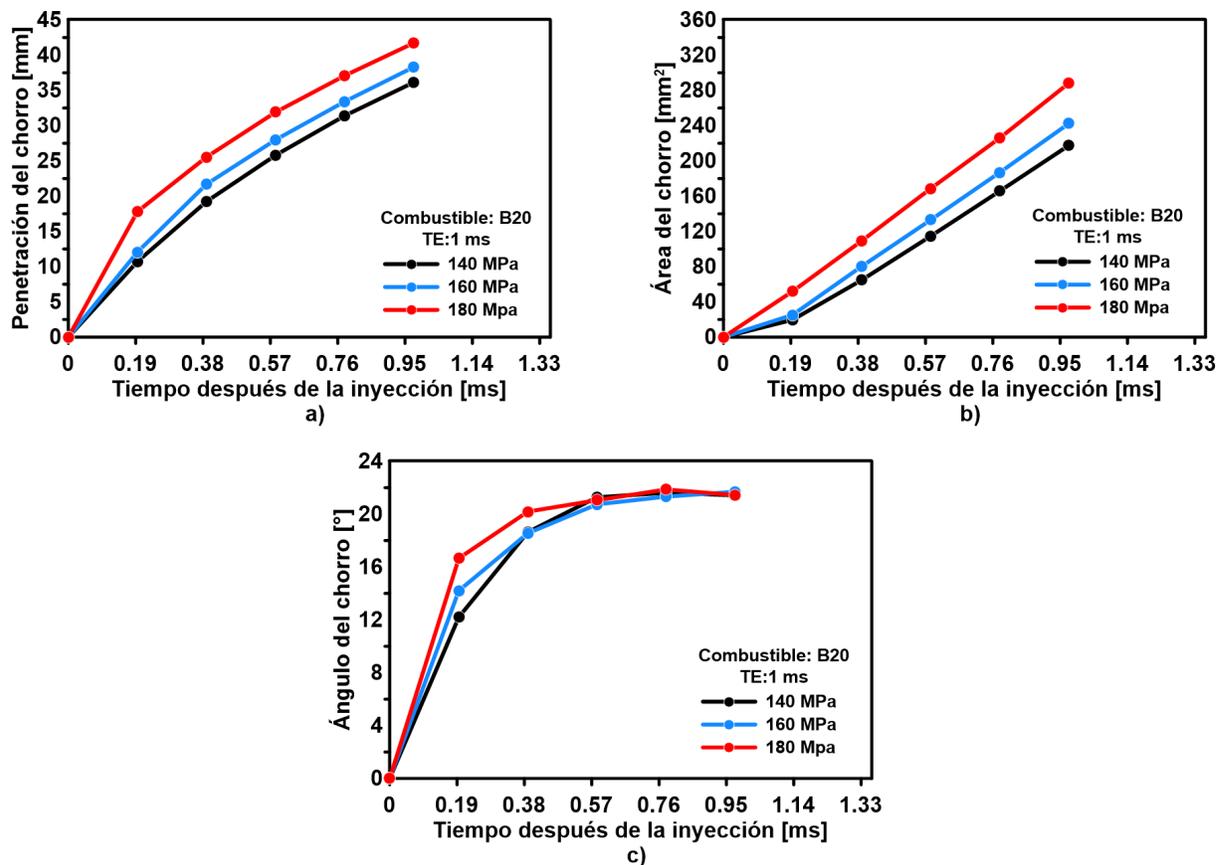


FIGURA B.4: Evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro: (a) penetración del chorro, (b) área del chorro, y (c) ángulo del chorro, para la mezcla B20, y empleando los niveles de presión de inyección de 140, 160, y 180 MPa, y un tiempo de energización de 1 ms.

En cada una de las gráficas mostradas anteriormente, se observa el efecto de la presión de inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro del diésel y la mezcla B20. Se observó un incremento en los valores del área y el ángulo del chorro para cada uno de los combustibles al emplear los tiempos de energización de 0.8 ms y 1 ms. Este comportamiento consolida los datos obtenidos en este estudio, debido a que este comportamiento es similar a los obtenidos en la literatura.

Estos comportamientos concuerdan con lo estudiado por Kim et al. [64], quienes estudiaron las características de atomización del chorro empleando mezclas de dimetiléter e isobuteno. Concluyeron, entre otros aspectos que, el incremento de la presión de inyección aumenta la penetración del chorro de combustible.

Asimismo, Agarwal et al. [51] en su estudio sobre el efecto de la presión de inyección sobre las características de atomización del combustible encontraron, entre otros aspectos que, la presión de inyección afecta significativamente a la penetración del chorro, debido a que la penetración sufre un incremento conforme se aumenta la presión de inyección. De igual manera, el área del chorro también se incrementa con el aumento del nivel de presión de inyección, debido a una mejor atomización del combustible.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Ricardo Martínez Carrillo. *Estudio sobre el comportamiento del proceso de inyección empleando un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico bajo diferentes estrategias de inyección múltiple*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2011.
- [2] Wenjun Zhong, P. Tamilselvan, Qian Wang, Zhixia He, Huan Feng, and Xiong Yu. Experimental study of spray characteristics of diesel/hydrogenated catalytic biodiesel blended fuels under inert and reacting conditions. *Energy*, 153:349–358, 2018.
- [3] Sanghoon Lee, Chang Sik Lee, Sungwook Park, Jai Gopal Gupta, Rakesh Kumar Maurya, and Avinash Kumar Agarwal. Spray characteristics, engine performance and emissions analysis for karanja biodiesel and its blends. *Energy*, 119:138–151, 2017.
- [4] L. Corral-Gómez, G. Rubio-Gómez, S. Martínez-Martínez, and F. A. Sánchez-Cruz. Effect of diesel-biodiesel-ethanol blends on the spray macroscopic parameters in a common-rail diesel injection system. *Fuel*, 241:876–883, 2019.
- [5] Angel Leonides Rodríguez Ramos. *Efecto de la temperatura de una mezcla diésel-biodiésel derivado del aceite de higuera sobre los parámetros macroscópicos del chorro*. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2024.
- [6] Naciones Unidas. Cambio climático — naciones unidas. recurso libre, disponible en <https://www.un.org/es/global-issues/climate-change>, s/f.
- [7] Francisco Guerra Martínez. Cambio climático, calentamiento global y efecto invernadero, ¿cuál es cuál? *Ciencia*, 72:48–55, 2021.

- [8] Diario Oficial de la Unión Europea. Reglamento (ce) no 715/2007 del parlamento europeo y del consejo. recurso libre, disponible en <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?>, 2007.
- [9] Instituto Mexicano del Transporte. Regulación de emisiones contaminantes de los motores de combustión interna. recurso libre, disponible en <https://imt.mx/resumen-boletines.htmlIdArticulo=396&IdBoletin=149?>, 2014.
- [10] Luis Gerardo Sánchez Vela, Manuel de Jesús Fabela Gallegos, Oscar Flores Centeno, José Ricardo Hernández Jiménez, David Vázquez Vega, and Mauricio Eliseo Cruz Acevedo. Revisión de la normativa internacional sobre Límites de emisiones contaminantes de vehículos de carretera. *Instituto Mexicano del Transporte*, 2019.
- [11] Diario Oficial de la Federación. Norma oficial mexicana nom-044-semarnat-2017. recurso libre, disponible en https://www.dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo5513626&fecha19/02/2018#gsc.tab0, 2018.
- [12] Comisión Reguladora de Energía. Norma oficial mexicana nom-016-cre-2016, especificaciones de calidad de los petrolíferos. recurso libre, disponible en https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo5450011&fecha29/08/2016#gsc.tab0, 2016.
- [13] Iliana Ernestina Medina Ramírez, Norma Angélica Chávez Vela, and Juan Jáuregui Rincón. Biodiesel, un combustible renovable. *Investigación y Ciencia*, 55:62–70, 2012.
- [14] T. del N. J. García-Cota, V. M. De La Cruz González, I. Nájera Martínez, O. Sánchez Daza, Y. Reyes Ortega, and T. López Arenas. Purificación de biodiesel obtenido de aceite de ricinus. *Superficies y Vacío*, 2009.
- [15] F Payri and J.M. Desantes. *Motores de Combustión Interna Alternativos*. Editorial Reverté, 2011.
- [16] Marissa Hernández Aguilar. *Evaluación de mezclas diésel-biodiésel a partir de la caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible empleando*

- elevados niveles de presión de inyección*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2023.
- [17] Sattar Jabbar Murad Algayyim and Andrew P. Wandel. Macroscopic and microscopic characteristics of biofuel spray (biodiesel and alcohols) in ci engines: A review. *Fuel*, 5 2021.
- [18] Thomas Bohl, Guohong Tian, Andrew Smallbone, and Anthony P. Roskilly. Macroscopic spray characteristics of next-generation bio-derived diesel fuels in comparison to mineral diesel. *Applied Energy*, 186:562–573, 1 2017.
- [19] Dong Han, Jiaqi Zhai, Yaozong Duan, Dehao Ju, He Lin, and Zhen Huang. Macroscopic and microscopic spray characteristics of fatty acid esters on a common rail injection system. *Fuel*, 2017.
- [20] M Bustos Britos, Sergio Borrego, Oscar A de La Garza, M A Platas Garza, and S Martínez-Martínez. *Diseño de un circuito de control para inyectoros diésel solenoide operados bajo estrategias de inyección múltiple*. Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 2018.
- [21] D. H. Qi, K. Yang, D. Zhang, B. Chen, Q. Wei, and C. H. Zhang. Experimental investigation of a turbocharged crdi diesel engine fueled with tung oil-diesel-ethanol microemulsion fuel. *Renewable Energy*, pages 1201–1207, 2017.
- [22] Pankaj Dubey and Rajesh Gupta. Influences of dual bio-fuel (jatropha biodiesel and turpentine oil) on single cylinder variable compression ratio diesel engine. *Renewable Energy*, pages 1294–1302, 2018.
- [23] Gopinath Dhamodaran, Ramesh Krishnan, Yashwanth Kutti Pochareddy, Homeshwar Machgahe Pyarelal, Harish Sivasubramanian, and Aditya Krishna Ganeshram. A comparative study of combustion, emission, and performance characteristics of rice-bran-, neem-, and cottonseed-oil biodiesels with varying degree of unsaturation. *Fuel*, 2017.

-
- [24] Hadi Taghavifar, Arash Nemati, F. J. Salvador, and J. De la Morena. 1d energy, exergy, and performance assessment of turbocharged diesel/hydrogen rcci engine at different levels of diesel, hydrogen, compressor pressure ratio, and combustion duration. *International Journal of Hydrogen Energy*, pages 22180–22194, 2021.
- [25] Rasim Behçet, Recep Yumrutaş, and Hasan Oktay. Effects of fuels produced from fish and cooking oils on performance and emissions of a diesel engine. *Energy*, pages 645–655, 7 2014.
- [26] Nguyen Xuan Khoa and Ocktaeck Lim. The effects of combustion duration on residual gas, effective release energy, engine power and engine emissions characteristics of the motorcycle engine. *Applied Energy*, 2019.
- [27] M. Vijay Kumar, A. Veeresh Babu, and P. Ravi Kumar. Experimental investigation on the effects of diesel and mahua biodiesel blended fuel in direct injection diesel engine modified by nozzle orifice diameters. *Renewable Energy*, 2018.
- [28] M. Ghazikhani, M. E. Feyz, and A. Joharchi. Experimental investigation of the exhaust gas recirculation effects on irreversibility and brake specific fuel consumption of indirect injection diesel engines. *Applied Thermal Engineering*, 2010.
- [29] Paramvir Singh, S. R. Chauhan, and Varun Goel. Assessment of diesel engine combustion, performance and emission characteristics fuelled with dual fuel blends. *Renewable Energy*, 2018.
- [30] Raghvendra Gautam and Saket Kumar. Performance and combustion analysis of diesel and tallow biodiesel in ci engine. *Energy Reports*, 2020.
- [31] Tikendra Nath Verma, Pankaj Shrivastava, Upendra Rajak, Gaurav Dwivedi, Siddharth Jain, Ali Zare, Anoop Kumar Shukla, and Puneet Verma. A comprehensive review of the influence of physicochemical properties of biodiesel on combustion characteristics, engine performance and emissions, 2021.
- [32] Golmohammad Khoobakht, Mahmoud Karimi, and Kamran Kheiralipour. Effects

- of biodiesel-ethanol-diesel blends on the performance indicators of a diesel engine: A study by response surface modeling. *Applied Thermal Engineering*, 2019.
- [33] M. A. Asokan, S. Senthur Prabu, S. Prathiba, Shrey Mishra, Harsh Mittal, and Vishisht Verma. Emission and performance behavior of safflower oil biodiesel/diesel blends in di diesel engine. *Materials Today: Proceedings*, 2021.
- [34] Md Nurun Nabi, Ali Zare, Farhad M. Hossain, Timothy A. Bodisco, Zoran D. Ristovski, and Richard J. Brown. A parametric study on engine performance and emissions with neat diesel and diesel-butanol blends in the 13-mode european stationary cycle. *Energy Conversion and Management*, 2017.
- [35] Shankar Vitthal Kodate, Pragada Satyanarayana Raju, Ajay Kumar Yadav, and G. N. Kumar. Investigation of preheated dhupa seed oil biodiesel as an alternative fuel on the performance, emission and combustion in a ci engine. *Energy*, 2021.
- [36] Ahmet Uyumaz, Bilal Aydoğan, Emre Yılmaz, Hamit Solmaz, Fatih Aksoy, İbrahim Mutlu, Duygu İpci, and Alper Calam. Experimental investigation on the combustion, performance and exhaust emission characteristics of poppy oil biodiesel-diesel dual fuel combustion in a ci engine. *Fuel*, 2020.
- [37] Roshan Raman and Naveen Kumar. Performance and emission characteristics of twin cylinder diesel engine fueled with mahua biodiesel and dee. *Transportation Engineering*, 2020.
- [38] Tawfik Badawy, Mohy S. Mansour, Ahmed M. Daabo, Mostafa M. Abdel Aziz, Abdelrahman A. Othman, Fady Barsoum, Mohamed Basouni, Mohamed Hussien, Mourad Ghareeb, Mahmoud Hamza, Chongming Wang, Ziman Wang, and Abdelrahman B. Fadhil. Selection of second-generation crop for biodiesel extraction and testing its impact with nano additives on diesel engine performance and emissions. *Energy*, 2021.
- [39] Digambar Singh, Dilip Sharma, S. L. Soni, Chandrapal Singh Inda, Sumit Sharma, Pushpendra Kumar Sharma, and Amit Jhalani. A comprehensive review of physi-

- cochemical properties, production process, performance and emissions characteristics of 2nd generation biodiesel feedstock: *Jatropha curcas*. *Fuel*, 2021.
- [40] S. M.A. Rahman, I. M.R. Fattah, S. Maitra, and T. M.I. Mahlia. A ranking scheme for biodiesel underpinned by critical physicochemical properties. *Energy Conversion and Management*, 2021.
- [41] M. A. Wakil, M. A. Kalam, H. H. Masjuki, A. E. Atabani, and I. M. Rizwanul Fattah. Influence of biodiesel blending on physicochemical properties and importance of mathematical model for predicting the properties of biodiesel blend. *Energy Conversion and Management*, 94:51–67, 2015.
- [42] Tikendra Nath Verma, Pankaj Shrivastava, Upendra Rajak, Gaurav Dwivedi, Siddharth Jain, Ali Zare, Anoop Kumar Shukla, and Puneet Verma. A comprehensive review of the influence of physicochemical properties of biodiesel on combustion characteristics, engine performance and emissions. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 2021.
- [43] Jiangjun Wei and Yuncheng Wang. Effects of biodiesels on the physicochemical properties and oxidative reactivity of diesel particulates: A review. *Science of the Total Environment*, 2021.
- [44] 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, 2019.
- [45] N. Varun Kumar Reddy, S. G. Sangashetty, and N. R. Banapurmath. Performance and emissions evaluation of diesel engine fueled with exhaust gas energy preheated caome biodiesel. *Materials Today: Proceedings*, 45:290–293, 2020.
- [46] S. Senthur Prabu, M. A. Asokan, S. Prathiba, Shakkeel Ahmed, and George Puthean. Effect of additives on performance, combustion and emission behavior of preheated palm oil/diesel blends in di diesel engine. *Renewable Energy*, 122:196–205, 2018.

- [47] Vikas Sharma, Abul Kalam Hossain, Alamgir Ahmed, and Ahmed Rezk. Study on using graphene and graphite nanoparticles as fuel additives in waste cooking oil biodiesel. *Fuel*, 328, 2022.
- [48] M. Barrera Martínez, María Ángel García, Luis F. Rúa Mujica, Oscar A. de la Garza, and S. Martínez Martínez. *Influencia de las estrategias de inyección múltiple en la caracterización del chorro diésel empleando inyectoros diésel tipo solenoide y piezoeléctrico*. Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 2020.
- [49] 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, 2018.
- [50] Fernando Guevara Romero. *Estudio de los efectos de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiesel sobre las características del chorro de combustible líquido*. Tesis de maestría, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, 2019.
- [51] Avinash Kumar Agarwal, Atul Dhar, Jai Gopal Gupta, Woong Il Kim, Chang Sik Lee, and Sungwook Park. Effect of fuel injection pressure and injection timing on spray characteristics and particulate size-number distribution in a biodiesel fuelled common rail direct injection diesel engine. *Applied Energy*, 130:212–221, 2014.
- [52] Meshack Hawi, Hidenori Kosaka, Susumu Sato, Tsuyoshi Nagasawa, Ahmed Elwardany, and Mahmoud Ahmed. Effect of injection pressure and ambient density on spray characteristics of diesel and biodiesel surrogate fuels. *Fuel*, 254, 2019.
- [53] Jianguo Du, Balaji Mohan, Jaeheon Sim, Tiegang Fang, and William L. Roberts. Macroscopic non-reacting spray characterization of gasoline compression ignition fuels in a constant volume chamber. *Fuel*, 255, 2019.
- [54] V. D. Chaudhari, Aniket Kulkarni, and D. Deshmukh. Spray characteristics of biofuels for advance combustion engines. *Cleaner Engineering and Technology*, 5, 2021.

- [55] Limin Geng, Yanjuan Wang, Yueying Wang, and Huimei Li. Effect of the injection pressure and orifice diameter on the spray characteristics of biodiesel. *Journal of Traffic and Transportation Engineering (English Edition)*, 7:331–339, 2020.
- [56] M. Bustos Britos, Sergio Borrego, Oscar A. de La Garza, M. A. Platas Garza, and S. Martínez-Martínez. *Diseño de un circuito de control para inyectores diésel solenoide operados bajo estrategias de inyección múltiple*. Congreso Internacional Anual de la SOMIM, 2018.
- [57] Raul Payri, F. Javier Salvador, Rami Abboud, and Alberto Viera. Study of evaporative diesel spray interaction in multiple injections using optical diagnostics. *Applied Thermal Engineering*, 176, 2020.
- [58] Yu Jin, Qing Wu, Chang Zhai, Jaeheun Kim, Hong liang Luo, Yoichi Ogata, and Keiya Nishida. Evaporating characteristics of diesel sprays under split-injection condition with a negative dwell time. *Energetic Materials Frontiers*, 2:265–271, 2021.
- [59] 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, 2021.
- [60] José M. Desantes, Raúl Payri, Antonio García, and Julien Manin. Experimental study of biodiesel blends' effects on diesel injection processes. *Energy and Fuels*, 23:3227–3235, 2009.
- [61] Alberto Viera Sotillo and Raúl Payri Marín. *Effect of multiple injection strategies on the diesel spray formation and combustion using optical diagnostics*. Tesis doctoral, Universitat Politècnica de València, 2019.
- [62] Marissa Hernández Aguilar, Erick V Maqueda Aguilar, Oscar A de la Garza, Miguel García Yera, and Raúl Hernández Altamirano. Influencia de la estrategia de post-inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro diésel utilizando inyectores diésel tipo solenoide y piezoeléctrico. 2022.

-
- [63] 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*, 14:303–313, 2023.
- [64] Woong Il Kim, Kihyung Lee, and Chang Sik Lee. Spray and atomization characteristics of isobutene blended dme fuels. *Journal of Natural Gas Science and Engineering*, 22:98–106, 2015.