

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN SOBRE EL
PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIESEL**

POR

ING. OMAR TORRES GARZA

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

NOVIEMBRE, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA**



**EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN SOBRE EL
PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIESEL**

**POR
ING. OMAR TORRES GARZA**

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

**DIRECTOR
DR. OSCAR ALEJANDRO DE LA GARZA DE LEÓN**

**CO-DIRECTOR
DR. SIMÓN MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

NOVIEMBRE, 2016

**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA
SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO**



**EFFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN SOBRE EL
PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIESEL**

**POR
ING. OMAR TORRES GARZA**

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

**DIRECTOR
DR. OSCAR ALEJANDRO DE LA GARZA DE LEÓN
CO-DIRECTOR
DR. SIMÓN MARTÍNEZ MARTÍNEZ**

SAN NICOLÁS DE LOS GARZA, NUEVO LEÓN,

NOVIEMBRE, 2016

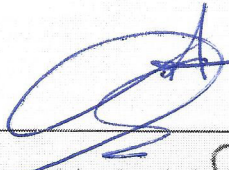
Universidad Autónoma de Nuevo León

Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica

Subdirección de Estudios de Posgrado

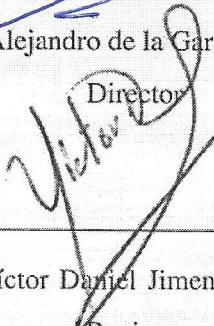
Los miembros del Comité de Tesis recomendamos que la tesis « Efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor diesel », realizada por el estudiante Omar Torres Garza, con número de matrícula 1394769, sea aceptada para su defensa en opción al grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

El Comité de Tesis



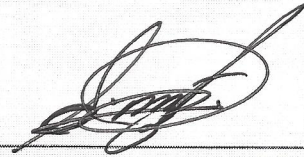
Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León

Director



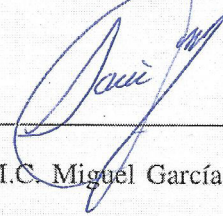
Dr. Víctor Daniel Jimenez Macedo

Revisor



Dr. Simón Martínez Martínez

Co-Director



M.C. Miguel García Yera

Revisor

Yo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez

Subdirector de Estudios de Posgrado

San Nicolás de los Garza, Nuevo León, Noviembre 2016

*“Around here, however, we don’t
look backwards for very long
We keep moving forward opening up new doors and
doing new things, because we’re curious...
and curiosity keeps leading us down new paths“*

WALT DISNEY, The family of the future

AGRADECIMIENTOS

Principalmente a mi familia: a mi padre Omar Torres Treviño, mi madre Rosa Nelly Garza Elizondo, mi hermana Cynthia Nelly Torres Garza y mi hermano Daniel Torres Garza que día con día estuvieron conmigo desde el inicio de esta nueva etapa tan importante de mi vida, apoyándome en todo momento desde el comienzo hasta el final.

A mi novia Linda Celia Rodriguez que siempre estuvo conmigo brindándome su apoyo incondicional en las buenas y las malas, por motivarme a siempre seguir hacia adelante y nunca darme por vencido ante todas las dificultades que se me presentaran.

A mis amigos que siempre me animaron cuando las cosas no salían de la mejor manera y nunca dejaron que renunciara ante nada.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, especialmente al Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) por abrirme sus puertas y haberme dado la oportunidad de trabajar en tantos proyectos, especialmente en la investigación para la realización de mi tesis.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por haberme otorgado la beca para realizar este proyecto mediante el No. de Apoyo 628673.

A mi asesor, el Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León por todas sus enseñanzas tanto dentro como fuera del aula de clase y sobre todo por ser mi guía y asesorarme durante la realización de mi investigación.

A mis compañeros de generación de la maestría, Jessica Casanova, Jose Enrique Camacho y Asley Bautista por todas las experiencias que compartimos y vivimos juntos durante esta etapa de nuestras vidas y por siempre apoyarnos juntos como un equipo.

A los de generaciones anteriores, Adolfo Benítez, Victor Madrid, César Ramírez, Mario Chapa, Mirna Martínez, Jesús Juárez, René Mondragón, Ricardo Delgado, Yonathan Loredó, Andres Bazaldua, Hugo Ramírez, etc, por haberme guiado y por compartir parte de su experiencia y conocimientos conmigo.

A las generaciones futuras, Pablo Gómez, Hernán Ramírez, Victor Sánchez, Luis Fernando Rúa, Juan Carlos Ulloa, Guillermo Rubio y en general a todos los compañeros de la maestría, todos y cada uno de ustedes aportó algo.

A todos los profesores que ayudaron en mi formación y compartieron gran parte de sus conocimientos conmigo, sobre todo el Dr. Simón Martínez Martínez por todo su apoyo para así conseguir que este proyecto se pudiera lograr, al M.C. Miguel García Yera por sus constantes asesorías y orientaciones para sacar este proyecto a flote, al M.C. Jaime Armendáriz Velázquez por todos sus conocimientos inculcados sobre las energías renovables (biocombustibles), al Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz, Dr. Arturo Morales Fuentes, Dr. Santos Méndez Díaz por sus excelentes clases y los conocimientos transferidos. Al resto del comité de tesis.

Esta tesis forma parte del marco de la Red “Investigación e Innovación en Tecnología Energética”, apoyada por el programa para el Desarrollo Profesional Docente (prodeP), así como del proyecto “Uso y Aprovechamiento Energético de Biocombustibles en Motores de Combustión Interna (Proyecto CB-239943)”, financiado por el Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología.

NOMENCLATURA

Acrónimos

- AISI* — American Iron and Steel Institute [-]
- ANSI* — American National Standards Institute [-]
- ASOI* — Después del inicio de la inyección [After Start Of Injection]
- CMOS* — Semiconductor complementario de oxido de metal [Complementary Metal Oxide Semiconductor]
- CRS* — Sistema common-rail [Common Rail System]
- CRDI* — Inyección directa common rail [Common Rail Direct Injection]
- DME* — Dimethyl Ester [-]
- ECU* — Electronic Control Unit [Unidad de control electrónico]
- EOI* — End Of Injection [Final de la inyección]
- IDT* — Integrated Design Tools [Herramientas de Diseño Integradas]
- JB* — Jatropha Biodiesel [-]
- JOME* — Jatropha Oil Methyl Ester [-]
- KB* — Karanja Biodiesel [-]
- KOME* — Karanja Oil Methyl Ester [-]
- MCI* — Motor de Combustión Interna [Internal Combustion Engine]
- PA* — Poliamida [-]

- PCM* — Módulo de control del tren motriz [Powertrain Control Module]
PDA — Phase Doppler Anemometer [-]
POM — Polioximetileno [-]
SB — Soybean Biodiesel [-]
USLD — Ultralow Sulfur Diesel [-]
VDC — Voltaje de Corriente Directa [Voltage Direct Current]

Simbolos Romanos

A	—	Área [cm^2]
I	—	Corriente eléctrica [A]
l	—	Longitud [cm]
P	—	Potencia eléctrica [KW]
Pa	—	Pascal [$\frac{N}{m^2}$]
Pr	—	Presión [$\frac{Lbf}{in^2}$]
rpm	—	Revoluciones por minuto [$\frac{r}{min}$]
T	—	Temperatura [°C]
Ts	—	Temperatura de servicio [°F]
V	—	Voltaje [V]
W	—	Peso [kg]
WP	—	Potencia [$\frac{J}{seg}$]
Wp	—	Duración del pulso eléctrico [μs]

Simbolos Griegos

ρ	—	Densidad [$\frac{kg}{m^3}$]
ϕ	—	Diámetro [cm]
f	—	Frecuencia [Hz]
σ	—	Tensión superficial [$\frac{N}{m}$]
μ	—	Viscosidad [Pa · s]
τ	—	Torque [N · m]

Subíndices

- back* — Contrapresión [MPa]
rail — Presión de inyección [MPa]
amb — Temperatura ambiental [K]

RESUMEN

Los motores diésel han sido ampliamente utilizados debido a su alta eficiencia para la generación de energía, ya que permiten el uso de combustibles alternos (biodiesel) y el uso de una estrategia de inyección múltiple, los que conllevan a una reducción de las emisiones de gases de la combustión y evitar un mayor desgaste en las toberas y bombas de inyección, sin embargo el uso de una estrategia de inyección múltiple demanda profundizar en los efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor diesel.

Con el fin de analizar el efecto de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla, mediante el análisis de los parámetros macroscópicos tales como la penetración del chorro, el ángulo del chorro y el área del mismo. Estos parámetros están influenciados principalmente por la presión de inyección y la contrapresión que hay en el interior de la cámara.

El objetivo de esta tesis es profundizar en los efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor diésel, para esto fue necesario trabajar en la puesta a punto de una instalación experimental, asimismo en la definición de las condiciones de operación para los combustibles objetos de estudio y finalmente en analizar los resultados experimentales a través del procesamiento de imágenes.

Los resultados obtenidos sobre las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro, demuestran claramente que con un alto nivel de contrapresión en el interior de una maqueta de visualización a volumen constante se tiene un mayor ángulo del chorro y una disminución en la penetración del chorro y el área de la misma mejorando el proceso de mezcla.

En cuanto al efecto de la duración del pulso eléctrico sobre el proceso de mezcla, se ha observado que a una duración de pulso eléctrico de $2,000 \mu s$ se tiene un menor ángulo del chorro y un aumento en la penetración del chorro y área de la misma empeorando el proceso de mezcla en comparación a una duración de pulso eléctrico de $500 \mu s$.

ABSTRACT

Diesel engines have been widely used because of their high efficiency for the generation of energy, as they allow the use of alternative fuels (biodiesel) and the use of a multiple injection strategy, which lead to a reduction of gas emissions Of the combustion and to avoid a greater wear in the nozzles and pumps of injection, nevertheless the use of a strategy of multiple injection demands to deepen in the effects of the parameters of injection on the process of mixing in a diesel engine.

In order to analyze the effect of injection parameters of the mixing process, by analyzing the macroscopic parameters such as the tip penetration, spray cone angle and spray area. These parameters are influenced mainly by the injection pressure and back pressure that is inside the chamber.

The aim of this thesis is to deepen the effects of the injection parameters on the mixing process in a diesel engine, for this was necessary to work on the development of the experimental facility, likewise in the definition of operating conditions, fuels objects for study and finally analyze experimental results through image processing.

The results obtained on the temporal evolution of the macroscopic spray parameters, clearly demonstrate that a high level of back pressure within the model display to constant

volume has a greater spray cone angle and a decrease in tip penetration and spray area therefore improving the mixing process.

Regarding to effect of electric pulse duration on the mixing process, it has been observed that a electric pulse duration of 2,000 microseconds has a smaller spray cone angle and an increase in tip penetration and spray area worsening the mixing process compared to electric pulse duration of 500 microseconds.

ÍNDICE GENERAL

Nomenclatura	VI
Resumen	XI
Abstract	XIII
Indice de Figuras	XXIV
Índice de Tablas	XXVI
1. Introducción	1
1.1. Hipótesis	1
1.2. Importancia del uso del biodiesel	2
1.2.1. Ventajas del biodiesel	2
1.2.2. Desventajas del biodiesel	3
1.3. Justificación	3
1.4. Antecedentes	4
Bibliografía	6
2. Conocimiento del proceso de mezcla en un motor Diesel	7
2.1. Introducción	8

2.2. Parámetros macroscópicos del chorro diesel	8
2.3. Efecto de la contrapresión y presión de inyección sobre el proceso de mezcla	10
2.4. Efecto de las propiedades físicas del combustible sobre el proceso de mezcla	17
2.5. Efectos de la estrategia de inyección múltiple sobre el proceso de mezcla .	22
2.6. Formación de gotas y ligamentos al término de la inyección	29
Bibliografía	35
3. Planteamiento de la tesis	39
3.1. Introducción	40
3.2. Síntesis de la revisión bibliográfica	40
3.3. Objetivos	42
3.3.1. Objetivo general	42
3.3.2. Objetivos específicos	42
3.4. Metodología	42
3.4.1. Puesta a punto de la instalación experimental	43
3.4.2. Definición de las condiciones de operación	43
3.4.3. Combustibles objetos de estudio	44
3.4.4. Análisis de los resultados experimentales	44
Bibliografía	46
4. Herramientas experimentales	49
4.1. Introducción	50
4.2. Maqueta de visualización a volumen constante	51
4.2.1. Cámara a volumen constante	52
4.2.2. Sistema de inyección	53
4.2.3. Sensores de medición	72
4.3. Técnica óptica-Iluminación directa por dispersión MIE	79
4.3.1. Cámara de alta velocidad	80
4.3.2. Iluminación	81
4.4. Procesamiento de imágenes	82

4.A. Anexo: Determinación del par de apriete óptimo de los accesos ópticos sin dañarlos	83
4.A.1. Introducción	84
4.A.2. Metodología planteada para la determinación del par de apriete óptimo	84
4.A.3. Plan de trabajo desarrollado para la determinación del par de apriete óptimo	84
4.A.4. Análisis de la determinación del par de apriete óptimo y conclusión	85
4.B. Anexo: Metodología empleada para la calibración de la válvula de seguridad	88
4.B.1. Calibración de la válvula	89
4.B.2. Análisis de la calibración de la válvula de alivio durante la experimentación	89
4.B.3. Conclusión	90
4.C. Anexo: Determinación de la relación pixel/mm.	91
4.D. Anexo: Manual de operación de la maqueta de visualización a volumen constante	92
4.D.1. Precauciones	93
4.D.2. Uso del sistema de inyección	94
4.D.3. Uso de la cámara digital de alta velocidad	106
Bibliografía	111
5. Efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla	113
5.1. Introducción	114
5.2. Plan de trabajo	114
5.3. Efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla	117
5.3.1. Contrapresión	120
5.3.2. Presión de inyección	125
5.3.3. Duración del pulso eléctrico	129

5.A. Anexo: Metodología para determinar la frecuencia de inyección óptima para evitar el ensuciamiento en los accesos ópticos	142
5.A.1. Objetivo	142
5.A.2. Plan de trabajo desarrollado para la determinación de la frecuencia de inyección óptima	142
5.A.3. Análisis y conclusiones de la determinación de la frecuencia de inyección óptima	143
5.B. Anexo: Determinación de la configuración óptima de iluminación	144
Bibliografía	150
6. Conclusiones y trabajos futuros	154
6.1. Introducción	154
6.2. Conclusiones	155
6.3. Trabajos futuros	156
Bibliografía	158

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Muestra de biodiesel derivado de la Jatropha.	2
1.2. Motor Diesel.	4
2.1. Parámetros macroscópicos del chorro diesel.	9
2.2. Evolución temporal de la punta de penetración del chorro para el diesel, el biodiesel derivado del aceite usado de cocina y el B20.	10
2.3. Evolución temporal del ángulo de chorro para el diesel, el biodiesel derivado del aceite usado de cocina y el B20.	11
2.4. Comportamiento de la penetración del chorro con la presión de inyección, para diferentes combustibles.	13
2.5. Comportamiento del ángulo del chorro con la presión de inyección, para diferentes combustibles.	13
2.6. Evolución temporal del área del chorro al emplear diesel, las mezclas binarias diesel-biodiesel de Karanja a diferentes niveles de presión de inyección.	15
2.7. Comportamiento de la penetración del chorro con la duración del mismo, para distintas mezclas binarias diesel-biodiesel.	17
2.8. Comportamiento del ángulo del chorro en función de la contrapresión para el biodiesel de Karanja y las mezclas binarias diesel-biodiesel.	18

2.9. Comportamiento del ángulo del chorro para distintas mezclas binarias gasolina-diesel.	20
2.10. Evolución temporal del ángulo del chorro para distintos valores de densidad.	21
2.11. Estrategia de inyección múltiple.	22
2.12. Evolución temporal de la penetración del chorro bajo una inyección doble.	25
2.13. Evolución temporal de la penetración del chorro bajo una inyección triple.	25
2.14. Comparativa del área de chorro a diferentes tiempos de permanencia. . . .	26
2.15. Comparativa de la penetración del chorro a diferentes tiempos de permanencia.	26
2.16. Comparación de la penetración del chorro del diesel y la mezcla binaria biodiesel-diesel a distintas masas de inyección.	28
2.17. Parámetros de las pruebas experimentales.	30
2.18. Formación de gotas al término de la inyección a distintos rangos de presión ambiental.	31
2.19. Formación de gotas y ligamentos al término de la inyección a distintos rangos de presión de inyección.	32
2.20. Comportamiento del chorro diesel; a) Asociado al inyector con formación de depósitos y b) Relacionado con el inyector nuevo.	33
2.21. Técnica óptica de Shadowgraph.	33
2.22. Imagen macroscópica del chorro diesel empleando i) Alta presión de inyección ii) Alta temperatura ambiente.	34
3.1. Metodología general de la Tesis.	43
4.1. Maqueta de visualización a volumen constante.	52
4.2. Cámara de volumen constante.	53
4.3. Esquema hidráulico del sistema de inyección.	54
4.4. Acumulador de succión.	56
4.5. Filtros de combustible DELPHI HDF296.	57
4.6. Electrobomba de baja presión.	57
4.7. Funcionamiento de la electrobomba.	58

4.8. Intercambiadores de calor de tubos y coraza.	59
4.9. Válvulas hidráulicas PARKER F200B.	60
4.10. Motor eléctrico.	61
4.11. MicroMaster SIEMENS 420.	61
4.12. Bomba BOSCH CP1.	63
4.13. Funcionamiento de la bomba de alta presión CP1.	64
4.14. Manguera Spir Star Tipo 4/6.	65
4.15. Common-Rail.	67
4.16. Componentes de un inyector diesel tipo solenoide.	68
4.17. Esquema de un inyector diesel.	69
4.18. Funcionamiento del inyector diesel.	70
4.19. CRS-1200 Common Rail Tester System.	71
4.20. Sensor de la firma WINTERS.	73
4.21. Termopar tipo K.	74
4.22. Bloque de acero con conexión de 4 vías.	75
4.23. Esquema hidráulico de la conexión de cuatro vías.	75
4.24. Manómetro con glicerina.	76
4.25. Válvula de aguja.	77
4.26. Válvula de alivio.	78
4.27. Técnica óptica-Iluminación directa por dispersión MIE.	80
4.28. Lente de enfoque.	81
4.29. Imágenes obtenidas por medio de la técnica óptica utilizada.	82
4.30. Imagen binarizada.	83
4.31. Contorno de chorro binarizado.	83
4.32. Torquimetro de caratula de 3/8".	85
4.33. Torquimetro de trueno de 3/8".	86
4.34. Valores de contrapresión alcanzados a determinados tiempos, con los distintos torques aplicados para cada ensayo.	88
4.35. Contrapresiones alcanzadas en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante.	90

4.36. Coordenadas de la relación pixel/mm.	92
4.37. Depósito de combustible	94
4.38. Baño térmico.	95
4.39. Sistema de purga.	96
4.40. Cable de alimentación del motor eléctrico.	96
4.41. Sistema de alimentación del motor eléctrico.	97
4.42. Common rail system tester.	97
4.43. Fuente de alimentación de la bomba de baja presión.	98
4.44. Encendido del variador de frecuencia.	99
4.45. Comandos del common rail system tester.	99
4.46. Sistema de inyección common rail.	100
4.47. Sistema regulador de presión del tanque de nitrógeno.	101
4.48. Tipo de inyector, presión del rail indicados en el panel del common rail tester.	102
4.49. Apagado del variador de frecuencia.	103
4.50. Motor eléctrico y bomba de alta presión.	103
4.51. Apagado del baño térmico.	104
4.52. Válvulas de operación del tanque de nitrógeno.	105
4.53. Válvula de aguja.	106
4.54. Manómetro lector de la contrapresión de la maqueta.	106
4.55. Cámara digital de alta velocidad.	107
4.56. Parte posterior de la cámara.	108
4.57. Lente de la cámara.	109
4.58. Placa base.	110
5.1. Imagen bruta de chorro líquido a una $P_{rail}=80$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $800 \mu s$	116
5.2. Imágenes brutas adquiridas a una $P_{rail}=50$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $2,000 \mu s$	117

5.3. Evolución temporal de la penetración del chorro obtenida al utilizar una $P_{rail}=50\text{MPa}$, una $P_{back}=2\text{MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de 2000 μs 118

5.4. Evolución temporal del ángulo del chorro obtenida al utilizar una $P_{rail}=50\text{MPa}$, una $P_{back}=2\text{MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de 2000 μs 119

5.5. Evolución temporal del área del chorro obtenida al utilizar una $P_{rail}=50\text{MPa}$, una $P_{back}=2\text{MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de 2000 μs 120

5.6. Efectos en la evolución temporal de la penetración del chorro a varios niveles P_{rail} y P_{back} 121

5.7. Evolución temporal del ángulo del chorro para los niveles de P_{rail} de 50, 100 y 130 MPa y una P_{back} de 2, 3 y 4 MPa. 122

5.8. Evolución temporal del área del chorro para los niveles de P_{rail} de 50, 100 y 130 MPa y una P_{back} de 2, 3 y 4 MPa. 124

5.9. Evolución temporal de la penetración del chorro para un nivel de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130 MPa y P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa. 125

5.10. Evolución temporal del ángulo del chorro para los niveles de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130 MPa y P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa. 127

5.11. Evolución temporal del área del chorro para los niveles de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130 MPa y P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa. 128

5.12. Imágenes brutas adquiridas para un nivel de $P_{rail}=50\text{ MPa}$, $P_{back}=2\text{ MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de 300 μs 129

5.13. Penetración del chorro diesel a una $P_{rail}=50\text{ MPa}$ y una $P_{back}=2\text{ MPa}$. . . 130

5.14. Angulo del chorro diesel a una $P_{rail}=50\text{ MPa}$ y una $P_{back}=2\text{ MPa}$ 131

5.15. Área del chorro diesel a una $P_{rail}=50\text{ MPa}$ y una $P_{back}=2\text{ MPa}$ 131

5.16. Imágenes brutas adquiridas para un nivel de $P_{rail}=50\text{ MPa}$, $P_{back}=2\text{ MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de 500 μs 132

5.17. Penetración del chorro diesel a una $P_{rail}=50\text{ MPa}$ y una $P_{back}=2\text{ MPa}$. . . 133

5.18. Angulo del chorro diesel a una $P_{rail}=50\text{ MPa}$ y una $P_{back}=2\text{ MPa}$ 134

5.19. Área del chorro diesel a una $P_{rail}=50\text{ MPa}$ y una $P_{back}=2\text{ MPa}$ 134

5.20. Efectos en la evolución temporal en la penetración del chorro a distintas duraciones de pulso eléctrico y a varios niveles de P_{rail} y P_{back} 136

5.21. Efectos de la duración del pulso eléctrico en la penetración del chorro con una $P_{rail}=130\text{MPa}$ y una $P_{back}=4\text{MPa}$ 137

5.22. Efectos en la evolución temporal del ángulo del chorro a distintas duraciones de pulso eléctrico y a varios niveles de P_{rail} y P_{back} 138

5.23. Efectos de la duración del pulso eléctrico en el ángulo del chorro con una $P_{rail}=130\text{MPa}$ y una $P_{back}=4\text{MPa}$ 139

5.24. Efectos en la evolución temporal del área del chorro a distintas duraciones de pulso eléctrico y a varios niveles de P_{rail} y P_{back} 140

5.25. Efectos de la duración del pulso eléctrico en el área del chorro con una $P_{rail}=130\text{MPa}$ y una $P_{back}=4\text{MPa}$ 141

5.26. Iluminación directa por dispersión MIE empleando lámparas de 35 W y 12 V. 145

5.27. Imágenes brutas adquiridas del evento de inyección al utilizar una $P_{rail}=80$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $800 \mu\text{s}$ 145

5.28. Iluminación directa por dispersión MIE empleando una lámpara de 300 W y 120 V de intensidad. 146

5.29. Imágenes brutas adquiridas del evento de inyección al utilizar una $P_{rail}=80$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $1,000 \mu\text{s}$ 146

5.30. Iluminación directa por dispersión MIE empleando lámparas de 50 W y 12 V 147

5.31. Imágenes brutas adquiridas del evento de inyección al utilizar una $P_{rail}=50$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $800 \mu\text{s}$ 147

5.32. Iluminación directa por dispersión MIE empleando una lámpara de 100 W y 12 V de intensidad. 148

5.33. Imágenes brutas adquiridas del evento de inyección al utilizar una $P_{rail}=50$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $800 \mu\text{s}$ 148

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Parámetros macroscópicos del chorro correspondientes al diesel, al biodiesel de jatropha y mezclas binarias diesel-biodiesel.	19
2.2. Parámetros macroscópicos del chorro correspondientes al diesel, biodiesel de Karanja y mezclas binarias diesel-biodiesel.	19
2.3. Propiedades físicas del diesel y mezclas binarias gasolina-diesel.	20
2.4. Condiciones de operación aplicadas para una inyección sencilla o múltiple.	24
2.5. Condiciones de operación para una relación de mezcla binaria del 20 %.	28
2.6. Condiciones experimentales de inyección.	34
4.1. Componentes del circuito de baja presión	55
4.2. Componentes del circuito de alta presión	55
4.3. Características técnicas del intercambiador de calor de tubos y coraza.	59
4.4. Especificaciones técnicas de la válvula de control de flujo.	60
4.5. Características técnicas del motor eléctrico.	62
4.6. Características técnicas de la Bomba de alta presión.	63
4.7. Especificaciones técnicas de la manguera de alta presión.	66
4.8. Instrumentos de medición.	72
4.9. Especificaciones técnicas del transductor de presión.	73
4.10. Descripción de materiales que conforman la válvula de aguja.	77

4.11. Especificaciones técnicas de la válvula de alivio.	79
4.12. Características técnicas de la cámara digital de alta velocidad.	80
4.13. Parámetros de operación de la cámara digital de alta velocidad.	81
4.14. Resultados obtenidos sobre el torque aplicado y la P_{back} alcanzada.	87
4.15. Lectura del manómetro versus el transductor de presión.	90
5.1. Condiciones de operación de inyección.	115
5.2. Condiciones de trabajo del circuito de inyección	143
5.3. Resultados de la determinación de la frecuencia de inyección	143

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

Índice

1.1. Hipótesis	1
1.2. Importancia del uso del biodiesel	2
1.2.1. Ventajas del biodiesel	2
1.2.2. Desventajas del biodiesel	3
1.3. Justificación	3
1.4. Antecedentes	4
Bibliografía	6

1.1. Hipótesis

Mediante la variación de los parámetros de inyección para un combustible diésel y biodiesel, se es capaz de mejorar el proceso de mezcla y sus características de pulverización; concretamente sobre los parámetros macroscópicos del chorro: penetración del chorro,

ángulo del chorro y el área del mismo.

1.2. Importancia del uso del biodiesel

Anteriormente en el siglo XX, se decía que en un futuro próximo los combustibles alternativos de origen vegetal **biodiesel** observado en la **Figura 1.1** serían tan importantes como lo son el petróleo mismo y el carbón [2].

Uno de los principales motivos para promover con mayor fuerza el uso de estos combustibles alternativos es para reducir en gran número la contaminación del medio ambiente provocada por los combustibles de origen fósil [3]. Por ello es importante conocer tanto los beneficios como las restricciones que éste nos presenta.

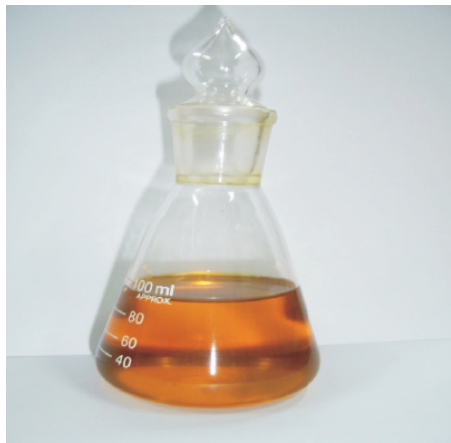


Figura 1.1: Muestra de biodiesel derivado de la Jatropha.

1.2.1. Ventajas del biodiesel

- El biodiesel disminuye en forma notable las principales emisiones en los motores diesel; dióxido de azufre, monóxido de carbono y los óxidos de nitrógeno.

- La producción de biodiesel supone una alternativa del uso del suelo evitando los fenómenos de desertificación y erosión a los que las tierras agrícolas quedan expuestas.
- Supone un ahorro de entre 25 % a 80 % de las emisiones de dióxido de carbono, absorbiéndolo a medida que crece emiten la misma cantidad producida por los combustibles derivados del petróleo, formando un proceso de ciclo cerrado.
- Al tener un mayor índice de cetano y mejor lubricación que el combustible diesel reduce el desgaste en las bombas de inyección y extienden la vida útil de los inyectores.
- Puede ser utilizado además como un aditivo para los motores diesel **nafta** para la limpieza interna de estos.

1.2.2. Desventajas del biodiesel

- Tiene una capacidad energética de aproximadamente 3 % menos, aunque en la práctica esto no es tan notorio debido a su alto número de cetano, produciendo así una combustión mas completa con una menor compresión.
- No se tiene claro por el momento el tiempo de vida útil del biodiesel, pero esto depende de la manipulación y almacenamiento que se emplee a éste.

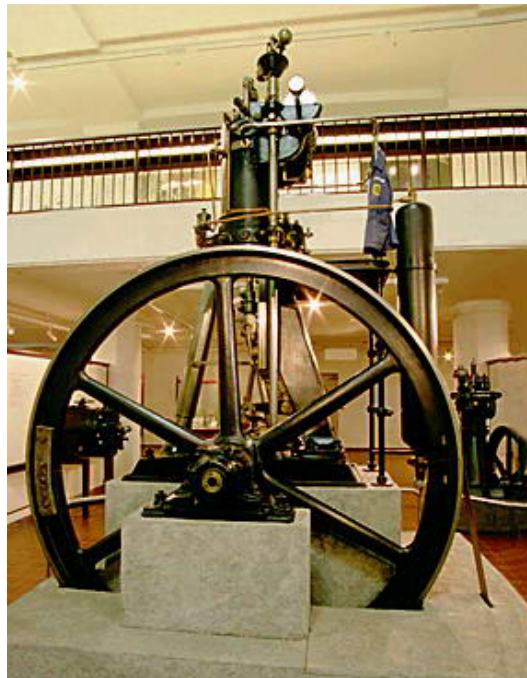
1.3. Justificación

Actualmente las normativas ambientales tanto las americanas como las europeas, le exigen a los fabricantes de automóviles que sus productos cumplan una cantidad de requisitos muy estrictos sobre la reducción de las emisiones de los gases de combustión. Actualmente existen varias vías para cumplir con estas normativas, entre las cuales se pueden mencionar las siguientes:

- Modificar la geometría del inyector
- Uso de la estrategia de inyección múltiple
- Uso de los combustibles alternativos tales como los biocombustibles

1.4. Antecedentes

Ya desde hace muchos años se invento el motor de combustión interna, pero no fue hasta el año 1893 en donde el ingeniero alemán Rudolf Diesel, invento el que ahora conocemos como motor Diesel el cual se muestra en la **Figura 1.2**; este consiste en utilizar el calor del aire altamente comprimido para encender una carga de combustible inyectada en el cilindro y con lo cuál se mostró tener una mayor eficiencia que los otros tipos de motores de esa época [1].



Motor Diesel de Rudolf Diesel

Figura 1.2: Motor Diesel.

Así entonces en donde en el año 1900 para el primer motor Diesel diseñado se utilizó un biocombustible derivado del aceite de maní, pero no fue hasta el año 1970 cuando se le comenzó a prestar mayor importancia debido a la crisis petrolera a nivel mundial y el elevado costo del petróleo.

Ya entonces hasta el año 1982 en el continente europeo se efectuaron las primeras pruebas técnicas sobre los combustibles de origen vegetal y tres años después en la ciudad de Viena, en Austria se construyó la primer planta productora de biodiesel a partir de las semillas de colza [4].

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Jorge Enrique Gaviria Ríos, Jorge Hernán Mora Guzmán, John Ramiro Agudelo**, *Historia de los motores de combustión interna*, Universidad de Antioquia, Revista Facultad de Ingeniería No. 26. pp. 68-78, Junio 2002.
- [2] **Nancy E. López Ramirez, Itzel de los Santos Reyes, Artemio de Jesus Jiménez Díaz, Rodolfo Palacios Silva**, *Biodiesel-la historia detrás de la moda*, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Gaceta No. 4.
- [3] **Jairo Téllez, Alba Rodriguez, Álvaro Fajardo**, *Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental*, Revista Salud Pública. 8 (1): 108-117, 2006.
- [4] **Fernando Aguirre, Maribel Carmona, Mauricio Romero**, *Biodiesel, sustitución de combustibles fósiles por renovables*, ITO - DEPI - MIA, Ciencia, Tecnología y Sociedad + Innovación, Biodiesel Orizaba, México 2011.

CAPÍTULO 2

CONOCIMIENTO DEL PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIESEL

Índice

2.1. Introducción	8
2.2. Parámetros macroscópicos del chorro diesel	8
2.3. Efecto de la contrapresión y presión de inyección sobre el proceso de mezcla	10
2.4. Efecto de las propiedades físicas del combustible sobre el proceso de mezcla	17
2.5. Efectos de la estrategia de inyección múltiple sobre el proceso de mezcla	22
2.6. Formación de gotas y ligamentos al término de la inyección	29
Bibliografía	35

2.1. Introducción

El presente capítulo se divide en cuatro secciones en donde se abordaran los temas más relevantes relacionados con el proceso de mezcla de un biocombustible derivado del aceite usado de cocina en un motor Diesel. Concretamente en la sección 1, se realizara una ligera introducción sobre cuáles son los parámetros macroscópicos del chorro de mayor importancia, los cuales se analizarán en la presente investigación. En la sección 2 se llevará a cabo una revisión de los efectos de la P_{back} y la P_{rail} sobre el proceso de mezcla, En la sección 3, se llevará a cabo una revisión del efecto de las propiedades físicas y cuáles son las que tienen un mayor efecto sobre el proceso de mezcla. En la sección 4, igualmente se realizará una revisión pero ahora sobre los efectos de la estrategia de inyección múltiple en el proceso de mezcla. Y finalmente en la sección 5, la revisión estará enfocada en la formación de gotas y ligamentos al término de la inyección, los cuáles son precursores de la formación del hollín.

2.2. Parámetros macroscópicos del chorro diesel

Tal y como se describió en el capítulo anterior los biocombustibles pueden ser utilizados como combustibles alternativos en un motor Diesel, tomando en cuenta todas sus ventajas y desventajas contra un combustible fósil y por esto es necesario la elaboración de un estudio pertinente de los efectos del biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel.

Actualmente existen una gran cantidad de estudios en donde comparan un combustible diesel fósil con un biodiesel esto con el objetivo de determinar sus parámetros macroscópicos, [1, 2] observando que la punta de penetración del chorro, el área de contorno del chorro y el ángulo de cono, son los tres parámetros de mayor importancia y que más afectan el proceso de mezcla en un motor Diesel, en la **Figura 2.1** se ilustran cada uno de estos y posteriormente se da una breve definición de cada uno de estos parámetros.

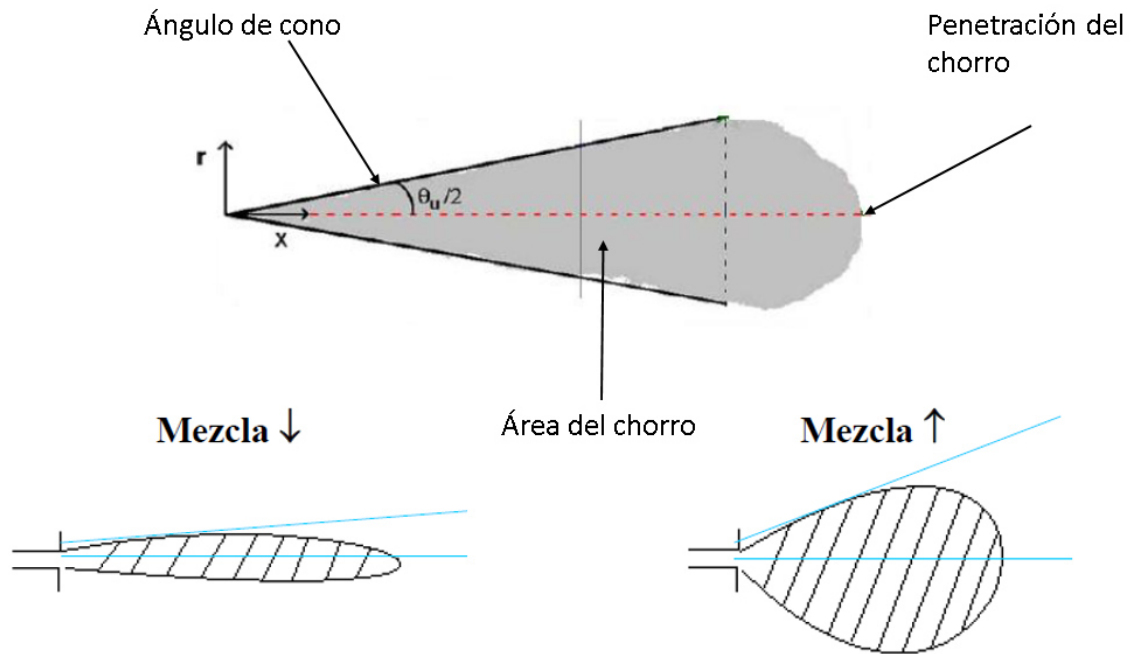


Figura 2.1: Parámetros macroscópicos del chorro diesel.

- Penetración del chorro diesel-*es la distancia entre la sección del orificio de la tobera y la punta del chorro.*
- Ángulo de cono-*máximo ángulo cónico de la pulverización del chorro, con su vértice en el orificio de la boquilla.*
- Área del chorro-*es la superficie total del contorno del chorro líquido al término de la inyección.*

2.3. Efecto de la contrapresión y presión de inyección sobre el proceso de mezcla

Hoy en día se sabe que el proceso de mezcla se ve afectado por ciertas características y propiedades del combustible. Esto es lo que ha motivado a muchos investigadores, entre los cuales se puede destacar a **Mohan et al.** quienes llevaron a cabo un estudio experimental sobre los efectos del biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre la penetración del chorro diesel y el ángulo del mismo, para ello emplearon dos niveles de P_{rail} : 60 MPa y 100 MPa y dos niveles de contrapresión : 3 MPa y 6 MPa. En la **Figura 2.2** se muestran los resultados a los que llegaron, en cuanto a la penetración del chorro, concretamente en ésta se muestra la evolución temporal de la penetración del chorro para el caso del diesel, el biodiesel derivado del aceite usado de cocina puro y el B20.

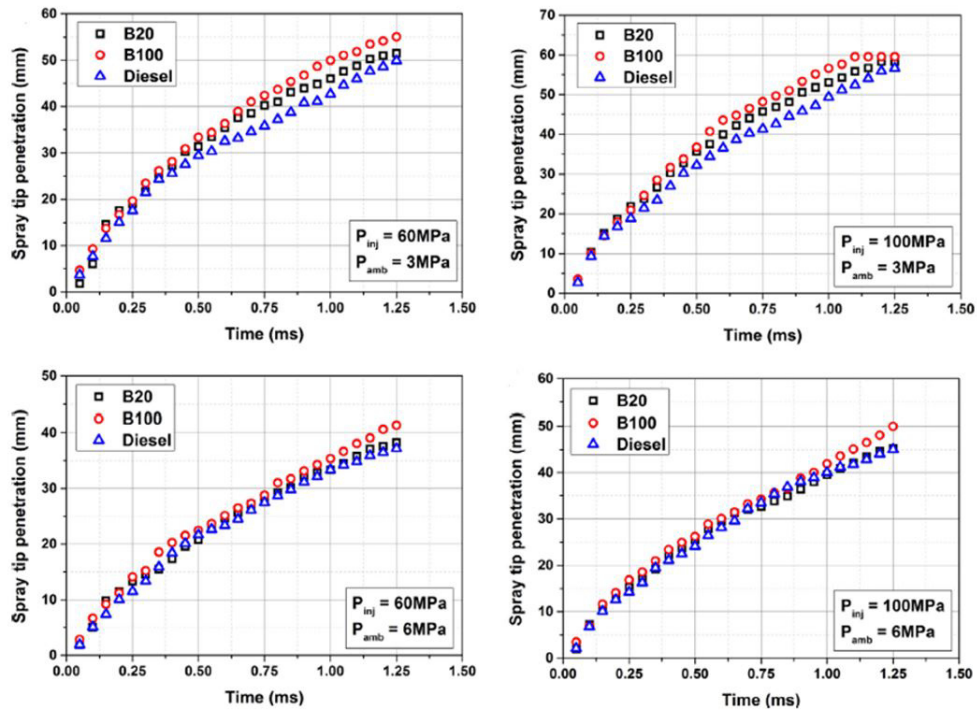


Figura 2.2: Evolución temporal de la punta de penetración del chorro para el diesel, el biodiesel derivado del aceite usado de cocina y el B20.

Ellos observaron que al comienzo de la inyección la penetración del chorro diesel y el biodiesel eran muy similares; pero al transcurso de 0.5 ms de haber comenzado la inyección, ellos observaron un incremento en la penetración del chorro diesel, al emplear una contrapresión de 3 MPa y una presión de inyección de 100 MPa, concluyendo que la penetración del chorro para el caso del biodiesel derivado del aceite usado de cocina es mayor en comparación al caso del diesel.

En la **Figura 2.3** se muestran los resultados a los que llegaron en cuanto al ángulo del chorro, concretamente en esta se ilustra la evolución temporal del ángulo del chorro, similarmente para el caso del diesel, el biodiesel derivado del aceite usado de cocina puro y el B20.

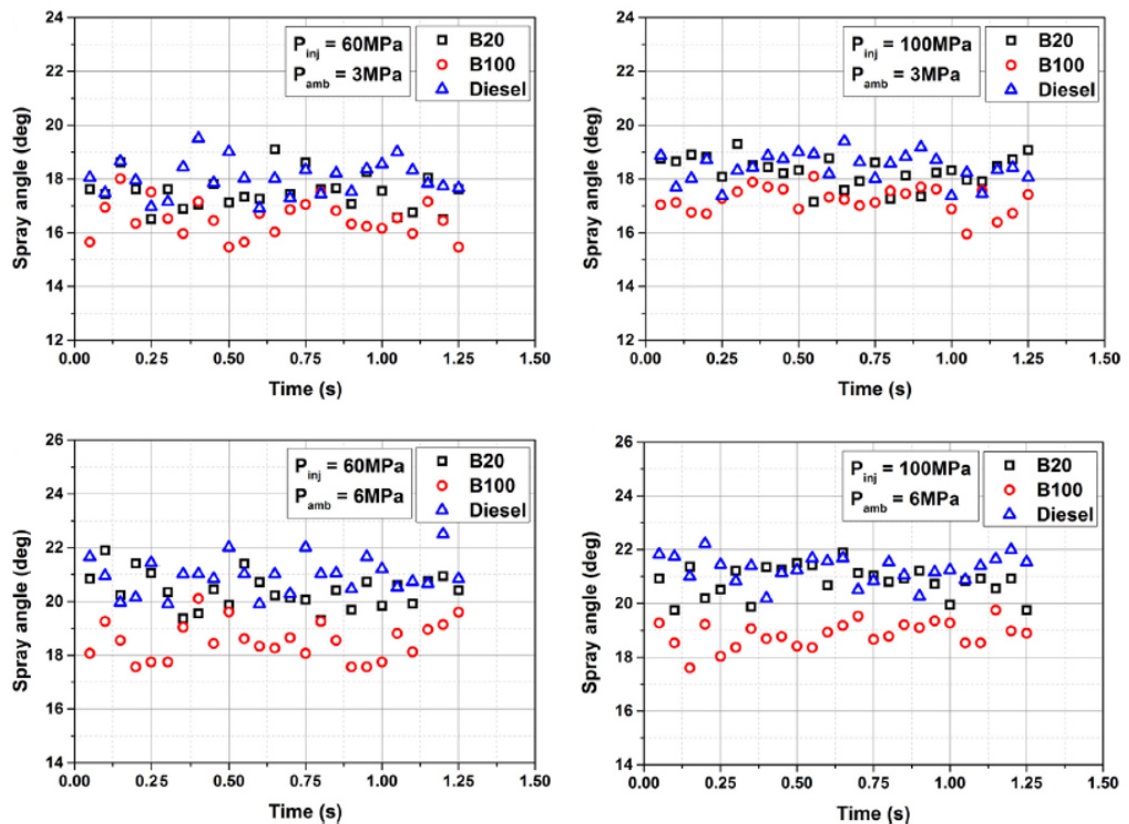


Figura 2.3: Evolución temporal del ángulo de chorro para el diesel, el biodiesel derivado del aceite usado de cocina y el B20.

Ellos observaron que el proceso de mezcla mejora cuando el combustible es inyectado a elevadas presiones de inyección y sobre una alta contrapresión, concluyendo que el proceso de mezcla mejora al emplear diesel ya que este presenta un mayor ángulo de chorro en comparación al biodiesel derivado del aceite usado de cocina puro y el B20.

Mohan et al. [3] estudiaron los efectos de un biodiesel derivado del aceite usado de cocina, un diesel y una mezcla de ambos con un 20 %, sobre el proceso de mezcla, para ello desarrollaron una serie de experimentos en donde determinaron el ángulo del chorro, concluyendo que entre mayor sea la viscosidad, el biodiesel presentara ángulos mas estrechos mientras que la penetración del chorro presenta un incremento característico debido al aumento de la contrapresión que existe en el interior de la cámara de visualización, incluso hacen ver que la presión con que el combustible se inyecta no juega un papel importante en ambos parámetros del chorro contradiciendo de esta manera el trabajo de **Rag et al.** [4] quienes caracterizaron un biodiesel de *Jatropha* y otro de *Karanja* comparándolos con un diesel, observando que entre mayor sea la viscosidad del combustible ésta lleva a una penetración de chorro mas corta, mientras que el ángulo del chorro tiende a aumentar a una mayor contrapresión, así mismo concluyen que si la presión de inyección se incrementa el ángulo de cono tiende a ser menor; tal y como se observa en las **Figuras 2.4 y 2.5**, respectivamente.

Xiangang et al. [5] analizaron los efectos de dos biocombustibles, un biodiesel derivado del aceite de palma y el otro derivado del aceite usado de cocina sobre la penetración del chorro, para ello emplearon elevadas presiones de inyección y diferentes densidades del gas, donde encontraron que un ambiente a una densidad menor bajo una elevada presión de inyección se observa una penetración del chorro mayor en un lapso de tiempo más corto, esta conclusión es consistente con la de **Hongzhan et al.** [8] quienes investigaron que efectivamente la presión con que se inyecta un combustible afecta el proceso de mezcla; pero que la contrapresión que hay dentro de una cámara a volumen constante es la que tiene los efectos mas significativos sobre los parámetros macroscópicos del chorro tanto para un combustible diesel como un biodiesel, concluyendo así que con el aumento de la

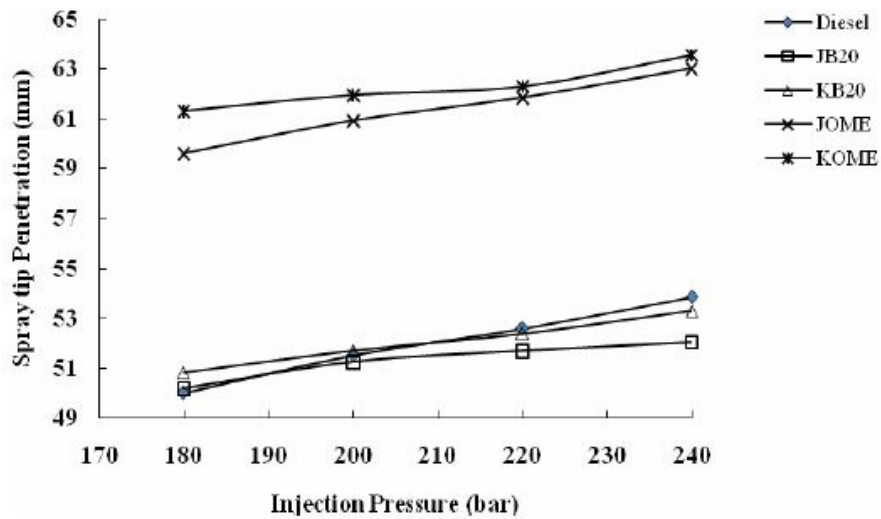


Figura 2.4: Comportamiento de la penetración del chorro con la presión de inyección, para diferentes combustibles.

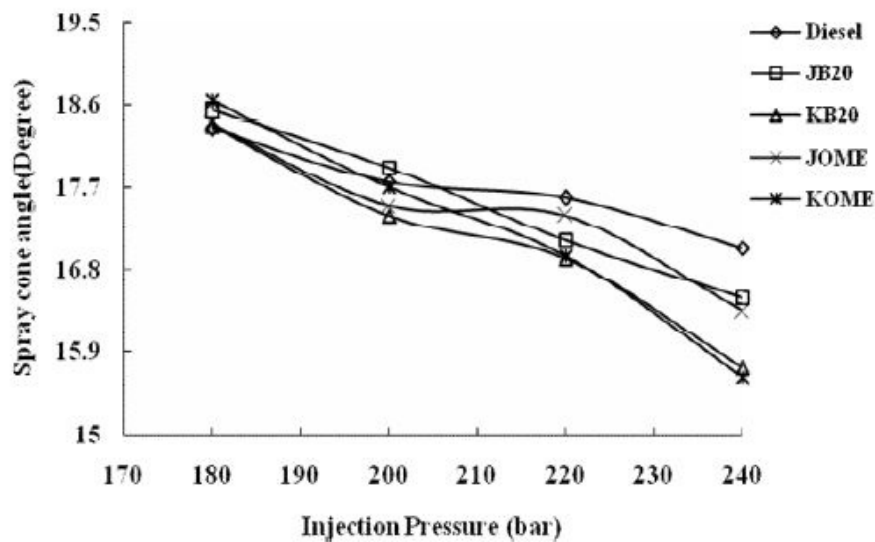


Figura 2.5: Comportamiento del ángulo del chorro con la presión de inyección, para diferentes combustibles.

contrapresión los ángulos de cono tienden a incrementarse mejorando así el proceso de mezcla para un combustible diesel y adicionalmente concluyeron que mientras mayor sea la mezcla binaria biodiesel-diesel el proceso de mezcla será más deficiente debido a las

propiedades físicas del biocombustible.

Por otro lado **Chao et al.** [6] realizaron pruebas experimentales en una cámara a volumen constante para analizar las propiedades de pulverización de un biodiesel derivado del aceite de ensalada de residuos y compararlo con un combustible diesel, concluyendo que la contrapresión en el interior de la cámara tiene un mayor efecto en el proceso de mezcla y que si está se disminuye la penetración del chorro sera aumentará mientras que el angulo de chorro disminuirá para cualquier combustible, estas conclusiones son consistentes con las de **Hyung et al** [7] quienes concluyeron que la contrapresión en el interior de la cámara tiene un mayor efecto en los parámetros macroscópicas para un biodiesel derivado del aceite de soya y un DME, adicionalmente encontraron que entre mayor sea la contrapresión el proceso de mezcla se irá desarrollando más lentamente pero con una eficiencia mucho mayor.

Incluso **Wugao et al.** [9] investigaron las características de pulverización de un metanol y un DME en un motor Stirling dentro de un recipiente de presión a volumen constante, comparándolos con un combustible USLD a distintas presiones de inyección; reportando que debido a que el diesel tiene muy bajos niveles de azufre éste tiene una viscosidad mucho mayor que los biocombustibles provocando que su ángulo del chorro sea menor al igual que su penetración.

Jai et al. [10] investigaron los efectos de un combustible diesel mineral y dos mezclas binarias diesel-biodiesel de Karanja (B10 y B20) en un sistema common rail de inyección directa (CRDI) al varias las presiones con que se inyecta el combustible, observando lo siguiente; 0.2 ms después de haberse comenzado la inyección el área del chorro tiende a irse incrementando, así como se ilustra en la **Figura 2.6**; adicionalmente observaron que mientras mayor sea la presión de inyección éstos presentaran un incremento en su área del chorro, esto mientras menor sea la contrapresión.

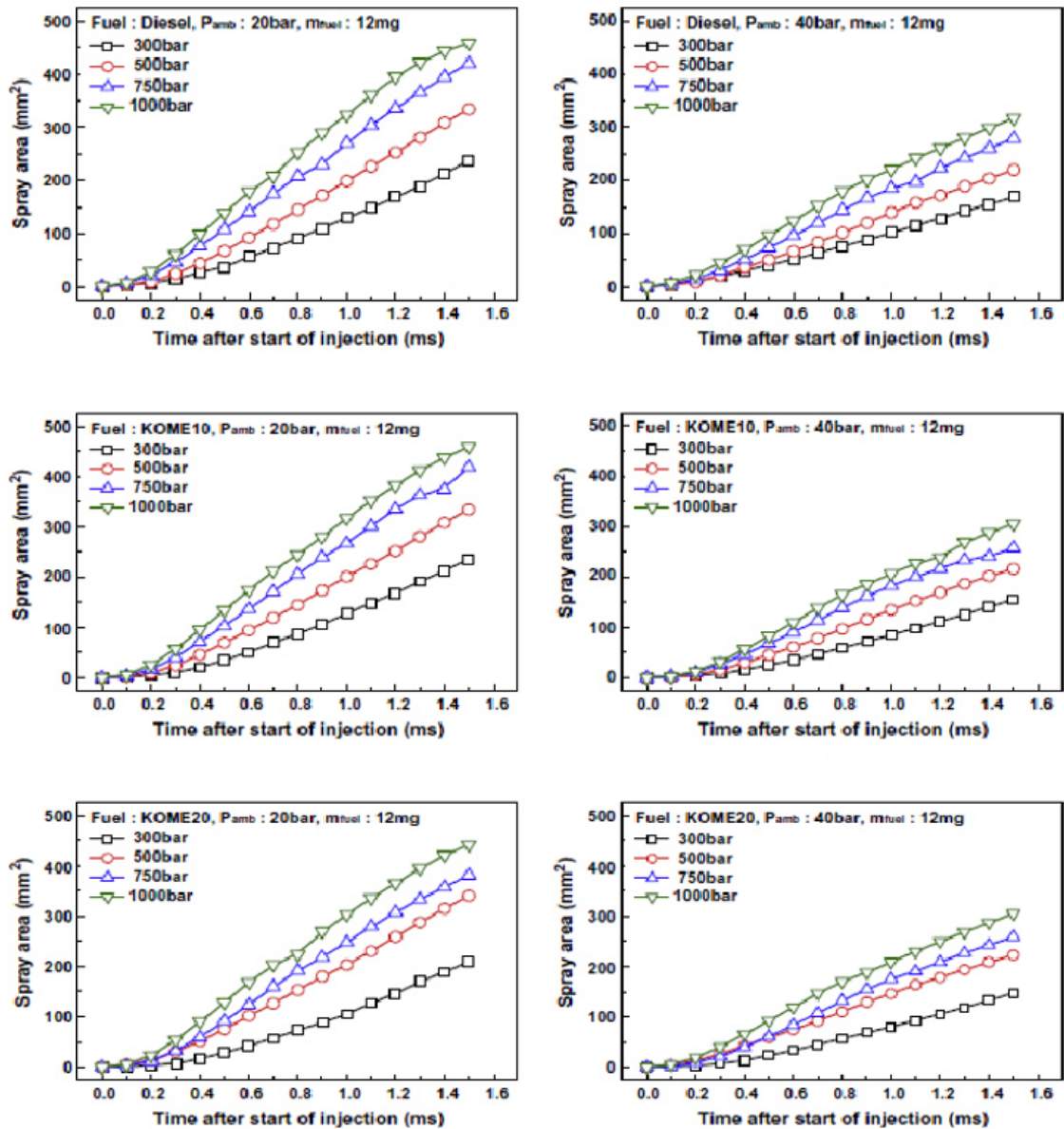


Figura 2.6: Evolución temporal del área del chorro al emplear diesel, las mezclas binarias diesel-biodiesel de Karanja a diferentes niveles de presión de inyección.

Song et al. [11] investigaron las características de pulverización del combustible diesel bajo distintas presiones de inyección (P_{rail}) utilizando un sistema de inyección common rail de alta presión, mientras se fue variando la contrapresión (P_{back}) en una cámara a vo-

lumen constante mediante el uso de la tecnología de fotografías con una cámara de alta velocidad, concluyendo que los parámetros macroscópicos del chorro son afectados de forma significativa por la presión de inyección y la contrapresión dentro de la cámara. Adicionalmente encontraron que con la adición de etanol se reduce el impacto ambiental de las emisiones de los vehículos y no afecta en nada su proceso de mezcla.

2.4. Efecto de las propiedades físicas del combustible sobre el proceso de mezcla

Gao et al. [12] desarrollaron un estudio experimental en una maqueta a volumen constante empleando un biodiesel derivado del aceite usado de cocina, un diésel como combustible de referencia y cinco mezclas binarias diesel-biodiesel, en donde encontraron que después de 0.8 ms de haberse iniciado la inyección las penetraciones del chorro fueron aumentando de acuerdo al % de la mezcla binaria diesel-biodiesel; tal y como se observa en la **Figura 2.7**, este comportamiento se debe a que la viscosidad juega un rol importante, aunque por otro lado reportaron que la densidad también afecta considerablemente a los parámetros macroscópicos del chorro, estas conclusiones son consistentes con las de **Avinash et al.** [14] quienes comentaron que tanto la densidad como la viscosidad son las dos principales propiedades que afectan las características de pulverización del chorro, adicionalmente encontraron que para un biodiesel de Karanja presentan un mayor ángulo de chorro que el propio diesel debido a su alta densidad tal y como se puede observar en la **Figura 2.8** va en aumento de acuerdo a la contrapresión en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante.

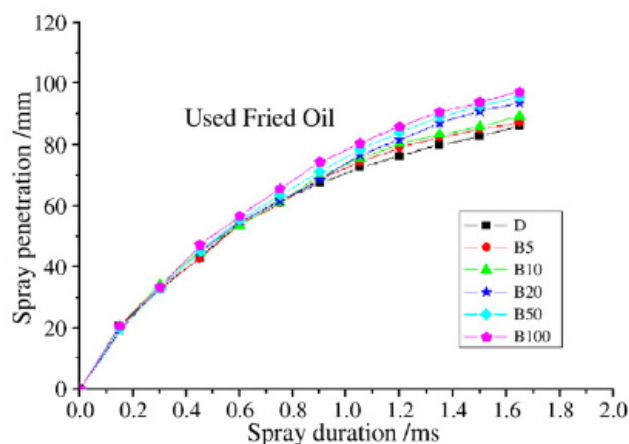


Figura 2.7: Comportamiento de la penetración del chorro con la duración del mismo, para distintas mezclas binarias diesel-biodiesel.

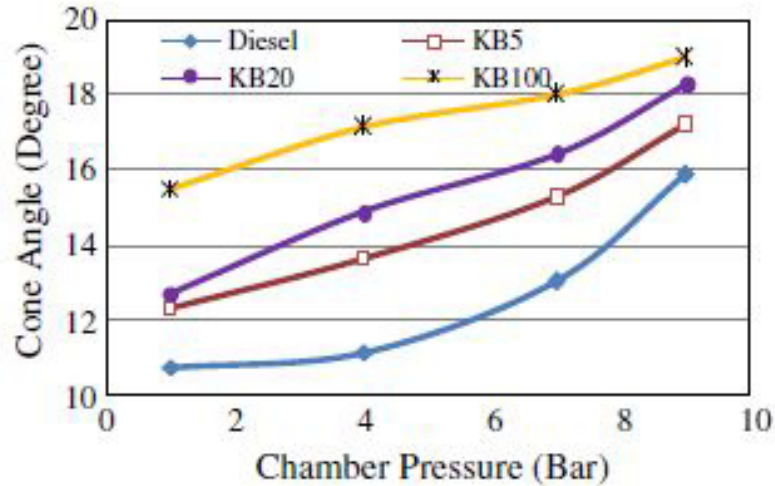


Figura 2.8: Comportamiento del ángulo del chorro en función de la contrapresión para el biodiesel de Karanja y las mezclas binarias diesel-biodiesel.

Sibendu et al. [15] analizaron los parámetros de pulverización del chorro de dos biodiesel uno a base de aceite de jatropha y el otro de Karanja en una cámara a volumen constante la cuál fue presurizada con N_2 a 10 bar de contrapresión, utilizando un sistema de inyección common rail inyectaron los combustibles objeto de estudio a una $P_{rail}=1000$ bar, emplearon un equipo de NI, CompactRIO-9022 para leer tanto la presión de inyección como la contrapresión que se tenía en el interior de la cámara a volumen constante, así mismo emplearon dos lámparas halógenas para iluminar el chorro de combustible con el fin de captar las imágenes del evento de inyección con una cámara digital de alta velocidad y finalmente éstas las analizaron mediante un código matemático, el cuál se desarrolló en MATLAB para la determinación de la penetración del chorro, el área del chorro y el ángulo del mismo; concluyendo que las propiedades físicas del combustible tienen una influencia en los parámetros macroscópicos del chorro diesel tal y como se puede observar en las **Tabla 2.1** y **2.2**, concretamente observaron que debido a la alta viscosidad del biodiesel de jatropha en comparación a la del diesel y el biodiesel de Karanja, el biodiesel de Karanja presenta un peor proceso de mezcla en comparación a la del diesel y al biodiesel de jatropha.

Tabla 2.1: Parámetros macroscópicos del chorro correspondientes al diesel, al biodiesel de jatropha y mezclas binarias diesel-biodiesel.

Fuel	Spray tip penetration (cm)	Spray area (cm^2)	Spray cone angle ($^\circ$)
Diesel	9.91	31.45	19.3
JB5	9.98	29.54	17.17
JB20	10.37	30.77	17.74
JB100	11.11	32.38	18.27

Tabla 2.2: Parámetros macroscópicos del chorro correspondientes al diesel, biodiesel de Karanja y mezclas binarias diesel-biodiesel.

Fuel	Spray tip penetration (cm)	Spray area (cm^2)	Spray cone angle ($^\circ$)
Diesel	9.91	31.45	19.3
KB5	10.15	28.66	18.55
KB20	10.87	31.86	19.26
KB100	12.19	32.62	20.98

Dong et al. [13] investigaron las características de pulverización de mezclas binarias gasolina-diesel utilizando un sistema de inyección common rail inyectando las mezclas binarias a un nivel de $P_{rail}=60$ MPa y con una duración del pulso eléctrico de 0.8 ms, para ello utilizaron una cámara de visualización a volumen constante, la cuál la presurizaron con N_2 a 1 atm, así mismo emplearon una cámara de alta velocidad para adquirir las imágenes del chorro iluminado con una lámpara halógena; concluyendo que con el incremento de la proporción de gasolina en la mezcla binaria gasolina-diesel tal y como se observa en la **Tabla 2.3** hay una disminución en las propiedades físicas del combustible, la cuál conlleva a un incremento en su ángulo del chorro como se puede observar en la **Figura 2.9**.

Tabla 2.3: Propiedades físicas del diesel y mezclas binarias gasolina-diesel.

Fuel	Density @ 313 K $\frac{g}{ml}$	Kinematic viscosity @ 313 K $\frac{mm^2}{s}$	Surface tension @ 298 K $\frac{mN}{m}$
G0	0.8045	2.388	27.06
G20	0.7895	1.679	26.38
G40	0.7765	1.128	25.31

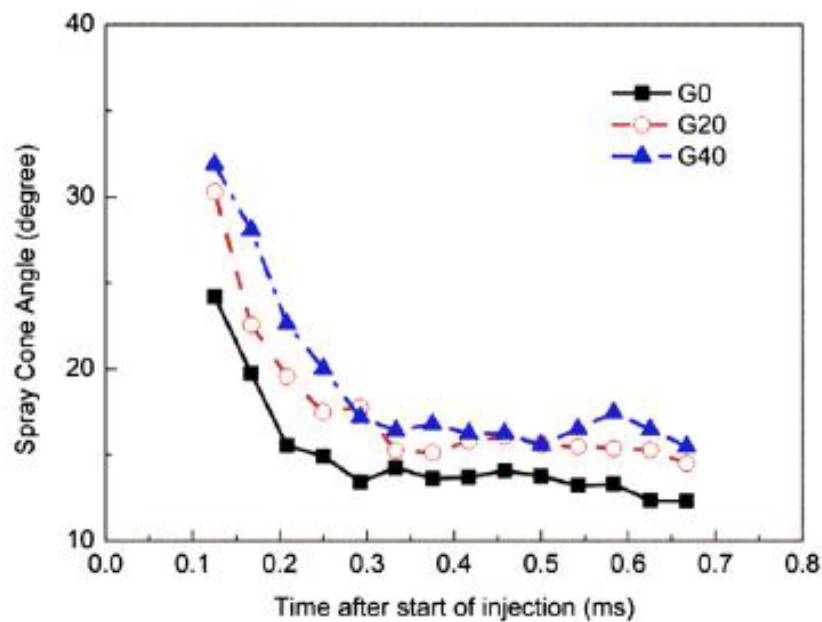


Figura 2.9: Comportamiento del ángulo del chorro para distintas mezclas binarias gasolina-diesel.

Mientras que **Delacourt et al** [16] estudiaron el efecto de la densidad del gas sobre las características de pulverización macroscópica del diesel a muy elevadas presiones de inyección dentro de una cámara de combustión utilizando técnicas de imagen digital, concluyendo que la presión de inyección tiene poca influencia en el ángulo del chorro, asimismo que entre más denso, el ángulo del chorro tiende a ser mayor y penetrar menos; tal y como se ilustra en la **Figura 2.10**.

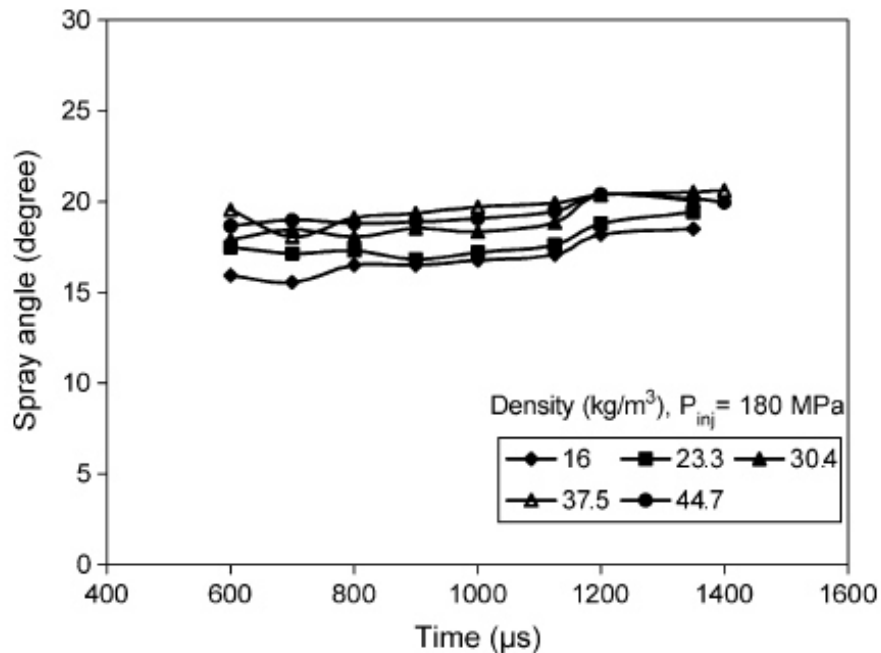


Figura 2.10: Evolución temporal del ángulo del chorro para distintos valores de densidad.

Nallusamy et al. [17] investigaron las características de pulverización de dos aceites metil esterres uno de Karanja y otro de jatropa y un combustible diesel, para comparar las características macroscópicas del chorro, concretamente la fase de vapor de los combustibles para ello emplearon una maqueta de visualización a volumen constante, así mismo utilizaron la técnica óptica shadowgraphic de pulverización mientras adquiría las imágenes a través de una cámara de alta velocidad, concluyendo que para ambos biocombustibles debido a su alta densidad y viscosidad presentan una mayor penetración del chorro, área de chorro y un ángulo de chorro más pequeño en comparación a los parámetros macroscópicos del diesel.

2.5. Efectos de la estrategia de inyección múltiple sobre el proceso de mezcla

Actualmente se tienen grandes problemas con la contaminación del medio ambiente, es por ello que las normativas ambientales americanas y europeas exigen como requisito reducir al máximo las emisiones de gases de la combustión y una forma para lograr esto es el utilizar una estrategia de inyección múltiple; la cuál se ilustra en la **Figura 2.11** la cual consiste en emplear múltiples inyecciones en el lapso de tiempo que dura un evento de inyección, concretamente una inyección piloto, una principal y una post-inyección.

Se comienza con la inyección piloto cuya duración de esta es muy corta (1) esto con el fin de inyectar una pequeña masa de combustible, la cual al quemarse contribuye a incrementar la temperatura del gas, de tal manera que cuando se efectuó la inyección principal ésta se queme con facilidad reduciendo el ruido de la combustión en un motor Diesel [1, 19]. (2) corresponde a la inyección principal, en ésta se inyecta la mayor cantidad de combustible y por último (3) corresponde a la post-inyección, la cual consiste en inyectar una pequeña cantidad de combustible, empleando un pulso eléctrico muy corto, para reducir las emisiones contaminantes.

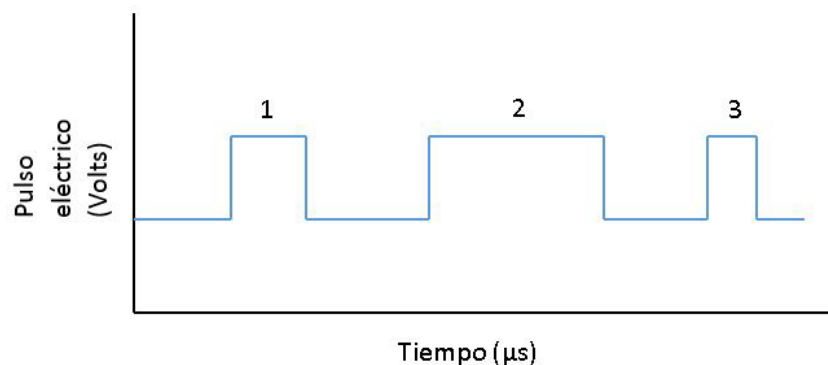


Figura 2.11: Estrategia de inyección múltiple.

- 1) Inyección piloto

- 2) Inyección principal

- 3) Post-inyección

Se sabe que la presión del medio ambiente y la presión de inyección del combustible influyen en gran parte sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel y que ocurre con la variación de la temperatura, debido a esto **Kouros** [18] desarrollo su trabajo de tesis enfocado en estudiar el efecto que tienen la presión ambiental y la temperatura al emplear una estrategia de inyección múltiple, donde concluyo que cuando la presión ambiental se incrementa algo similar ocurrirá con la temperatura y esto afecta considerablemente el proceso de mezcla tanto para una estrategia de inyección múltiple como una inyección sencilla, adicionalmente comprobó que mientras más corto sea el tiempo de permanencia entre las inyecciones menor sera el tiempo en que la penetración del chorro alcance su punto máximo y llegue a su punto de estabilidad.

Zhiqiang et al. [20] estudiaron los parámetros macroscópicas de un chorro de combustible diesel empleando una estrategia de inyección múltiple; usando desde dos hasta tres inyecciones a elevadas presiones de inyección a través de un sistema de inyección common rail y una bomba de aceite accionada por un motor eléctrico y un circuito de control que controla el proceso de inyección, el cual envía el pulso eléctrico al inyector solenoide colocado en una cámara a volumen constante, la cual presurizaron con N_2 a 1.1 MPa para todos los ensayos desarrollados, donde en la **Tabla 2.4** se muestran las condiciones de operación para una inyección sencilla y la estrategia de inyección múltiple.

Tabla 2.4: Condiciones de operación aplicadas para una inyección sencilla o múltiple.

Caso	Presión (MPa)	Porcentaje por inyección (%- %- %)	Intervalo inyección (ms)
1	80	100	-
2	100	100	-
3	120	100	-
4	100	10-90	1.5
5	100	30-70	1.5
6	100	50-50	1.5
7	100	10-40-50	1.5
8	100	25-50-25	1.5
9	100	33-33-33	1.5

Concluyendo que el proceso de mezcla claramente se ve afectado de acuerdo al % de volumen de combustible que se aplique por inyección. En las **Figuras 2.12 y 2.13** se muestra primero una inyección doble mientras en la siguiente gráfica se ilustra una inyección triple, en donde se puede observar que entre mayor sea el % de volumen de combustible aplicado por inyección se tiene un incremento en la penetración del chorro; en cambio para una inyección sencilla los parámetros macroscópicos se ven afectados únicamente por la presión de inyección.

Ziman et al. [21] en cambio investigaron de manera sistemática los parámetros macroscópicos y microscópicos de un chorro diesel utilizando una estrategia de inyección múltiple, mientras emplearon la captura de imágenes a ultra-alta velocidad en el interior de una cámara de alta presión, la cuál se presurizo a 3.5 MPa mientras se inyectaba el combustible a 60 MPa, reportando que al comienzo de una inyección múltiple se presentan una menor área del chorro y penetración del mismo, causado por los cortos tiempos de permanencia entre ambas inyecciones, lo cual provoca que la aguja no cierre en su totalidad pero al término de la inyección se presenta una mejoría en ambos parámetros tal y como se ilustra en las **Figuras 2.14 y 2.15**.

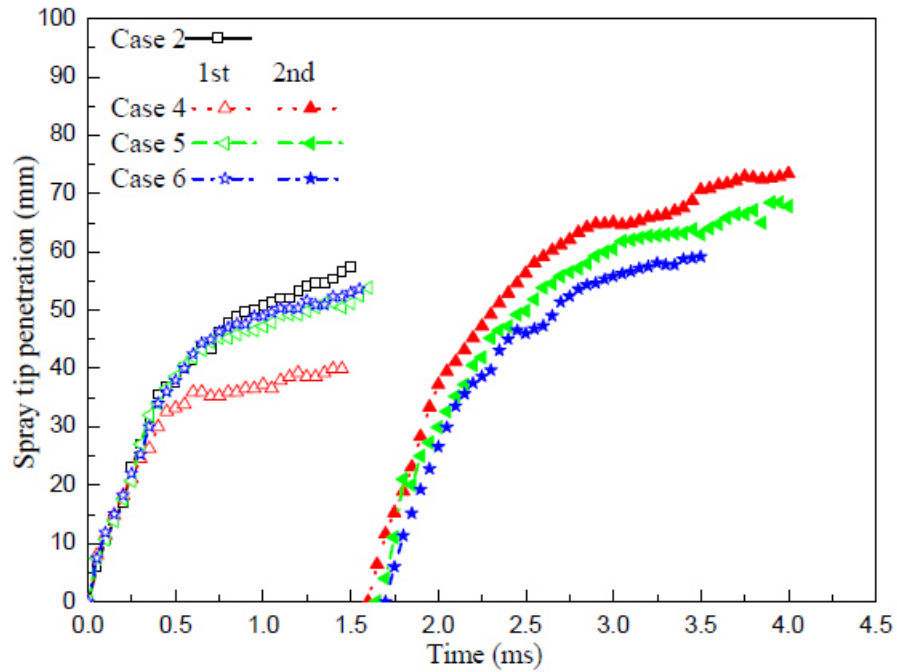


Figura 2.12: Evolución temporal de la penetración del chorro bajo una inyección doble.

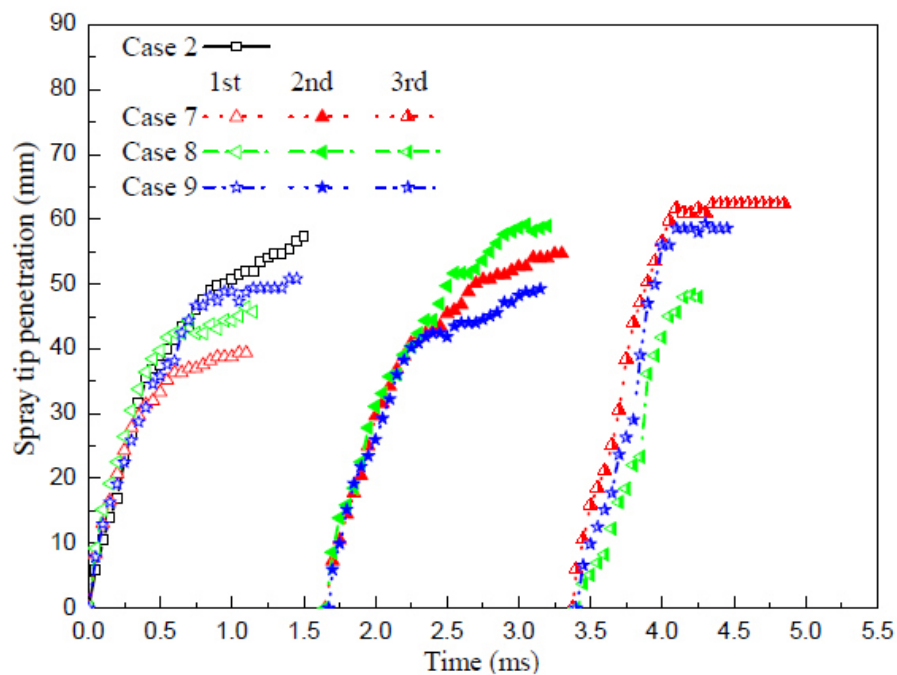


Figura 2.13: Evolución temporal de la penetración del chorro bajo una inyección triple.

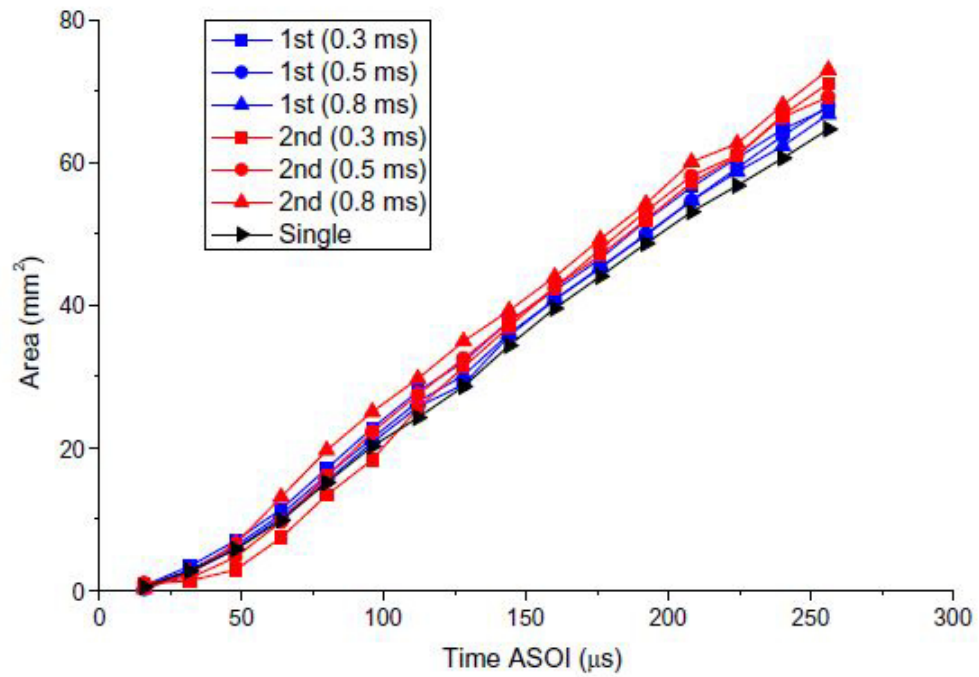


Figura 2.14: Comparativa del área de chorro a diferentes tiempos de permanencia.

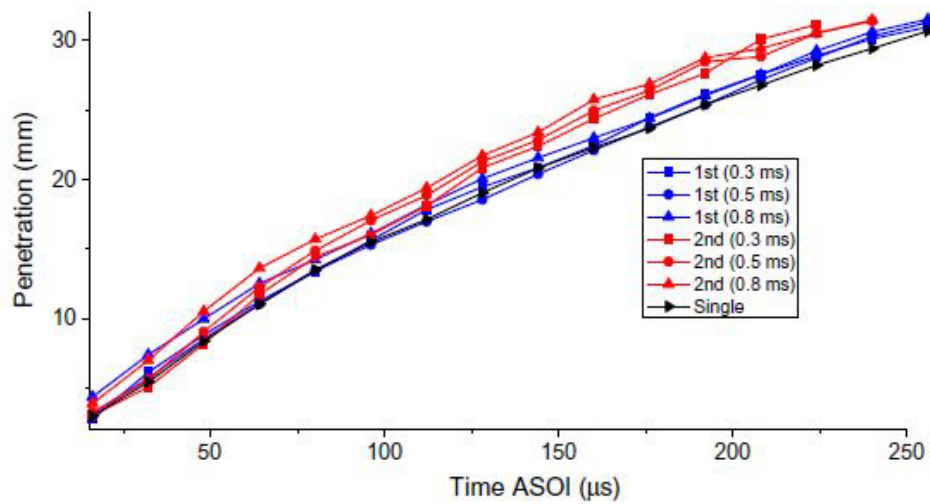


Figura 2.15: Comparativa de la penetración del chorro a diferentes tiempos de permanencia.

Inclusive se han hecho ensayos en los motores diesel de los barcos empleando la estrategia de inyección múltiple utilizando un combustible diesel en donde **Chang et al.** [22] realizaron una prueba en una cámara a volumen constante utilizando una cámara digital de alta velocidad para poder captar las imágenes del proceso de inyección, reportando que la penetración máxima del chorro en una inyección múltiple es menor en comparación con una inyección sencilla, pero cabe destacar que el ángulo del chorro empleando una inyección múltiple es mayor por consiguiente su proceso de mezcla mejora significativamente.

Suh et al. [23] investigaron el efecto de una inyección dividida sobre las características de pulverización de un combustible inyectado a través de un sistema common-rail, con el objetivo de analizar el comportamiento de pulverización a diversas tasas de inyección, para ello la duración tanto de la inyección piloto como la inyección principal, concluyendo que de acuerdo al flujo de gas ambiental que se genera durante la inyección piloto afecta considerablemente la pulverización a la inyección principal pero solamente al comienzo ya que la penetración que se alcanza en la inyección principal tiende a ser mayor por el tiempo que dura la inyección y adicionalmente encontraron que la presión de inyección no afecta a las características de pulverización.

Hyun et al. [24] igualmente investigaron las características de pulverización pero de un biodiesel derivado del aceite de soya (SB) para estudiar el efecto de la relación de mezcla biodiesel de soya-diesel e inyección piloto y compararlo con un combustible diesel, los cuales se inyectaron en una cámara de combustión capaz de simular las condiciones de funcionamiento de un motor diesel de inyección directa common rail, la cual se presurizó con N_2 y en la **Tabla 2.5** se describen las condiciones experimentales que emplearon para la mezcla binaria biodiesel-diesel y diesel puro.

Concluyendo que a una condición de inyección piloto con 0.5 mg de combustible la penetración del chorro tanto del diesel como el biodiesel derivado del aceite de soya son muy similares, pero se observa que con 2 mg de combustible la penetración del chorro diesel tiende a ser mayor que la del biodiesel, tal como se puede observar en la **Figura 2.16**,

Tabla 2.5: Condiciones de operación para una relación de mezcla binaria del 20 %.

Presión de inyección (MPa)	100
Contrapresión (MPa)	4
Masa de combustible piloto inyectada (mg)	0.5, 2
Masa de combustible principal inyectada (mg)	11.5, 10

esto quiere decir que a pequeñas cantidades de combustible inyectado no conduce a una completa evolución de pulverización; en cambio, a cantidades de 2 mg ambos combustibles se pulverizan en su totalidad, pero el biodiesel de una forma mas lenta esto debido a su alto grado de viscosidad.

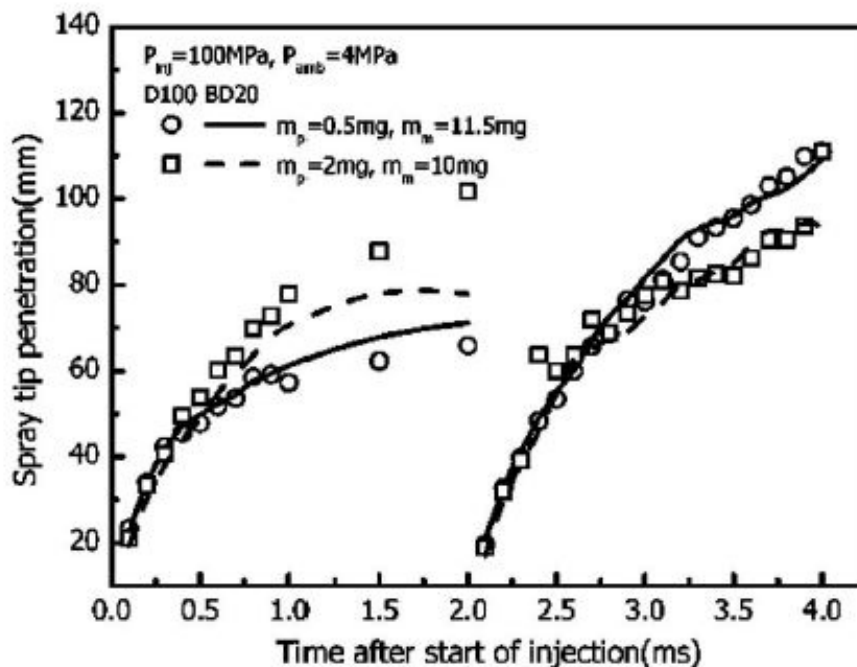


Figura 2.16: Comparación de la penetración del chorro del diesel y la mezcla binaria biodiesel-diesel a distintas masas de inyección.

2.6. Formación de gotas y ligamentos al término de la inyección

Como se mencionó en las secciones anteriores las propiedades físicas de los combustibles y el uso de estrategias de inyección múltiple afectan considerablemente el proceso de mezcla en un motor Diesel y que sucede con la formación de gotas y ligamentos al término de la inyección. Esta área no ha sido lo suficientemente explotada y existe una cantidad muy escasa de estudios con respecto a este tema. De acuerdo a la bibliografía esta formación de gotas y ligamentos al término de la inyección, contribuye a la formación de hollín.

Cabe señalar que no existen actualmente estudios o investigaciones en donde se haya empleado el uso de un biocombustible de cualquier materia prima para estudiar estos fenómenos, sólo se ha estudiado el combustible diesel; empleando una inyección sencilla o principal haciendo énfasis en el efecto de la presión de inyección, el diámetro de la tobera y la contrapresión que se tiene en el interior de la cámara a volumen constante.

Swantek et al. [25] estudiaron el comportamiento de los inyectores diesel de un solo orificio durante del cierre del inyector empleando diagnósticos de rayos X. Para ello en cada uno de los experimentos realizados, variaron los siguientes tres parámetros:

- 1) Presión ambiental
- 2) Diámetro del orificio de la tobera
- 3) Presión de inyección

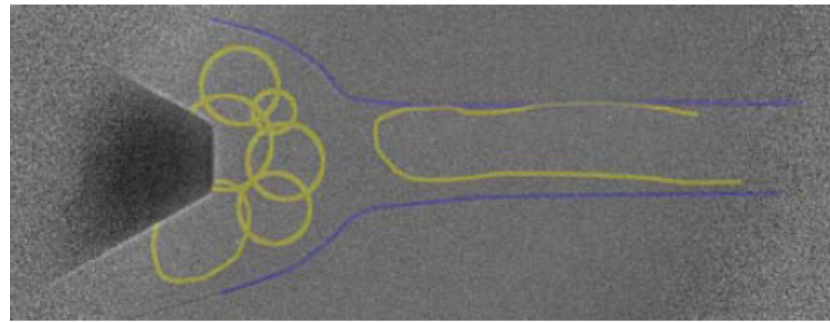
En la **Figura 2.17** se describen las condiciones de operación que siguieron para cada prueba realizada, en donde los rectángulos rojos indican que la cantidad de formación de gotas es muy alta, mientras que los amarillos indican una menor formación pero sin afectar al proceso de inyección y por último los azules indican que la formación de gotas es casi nula. Concluyendo que con el incremento de la presión de inyección hay una mayor formación de gotas dependiendo en gran parte del diámetro de la tobera y la presión ambiental que se tenga; observando esto claramente en la **Figura 2.18**, donde se empleó una presión de inyección de 1000 bar para el combustible diesel utilizando un inyector con un diámetro de la tobera de 180 μm a distintos rangos de presión ambiental.

$P_{\text{amb}}=1\text{bar}$		P_{rail}, bar		
Diameter, μm	500	1000	1500	
110	Blue	Yellow	Red	
130	Red	Red	Red	
180	Red	Red	Red	

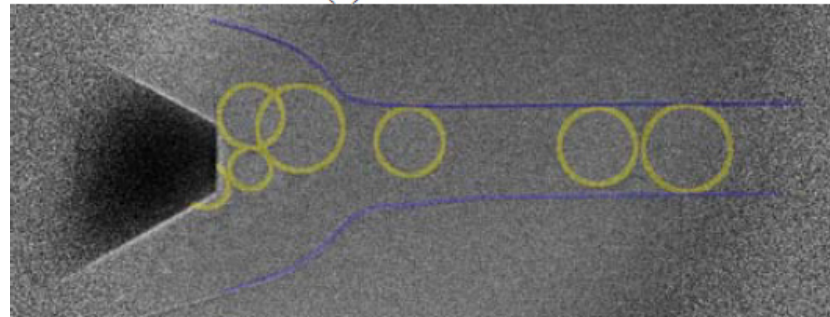
$P_{\text{amb}}=10\text{ bar}$		P_{rail}, bar		
Diameter, μm	500	1000	1500	
110	Blue	Yellow	Yellow	
130	Yellow	Yellow	Yellow	
180	Yellow	Red	Red	

$P_{\text{amb}}=20\text{ bar}$		P_{rail}, bar		
Diameter, μm	500	1000	1500	
110	Blue	Blue	Blue	
130	Blue	Yellow	Yellow	
180	Blue	Yellow	Red	

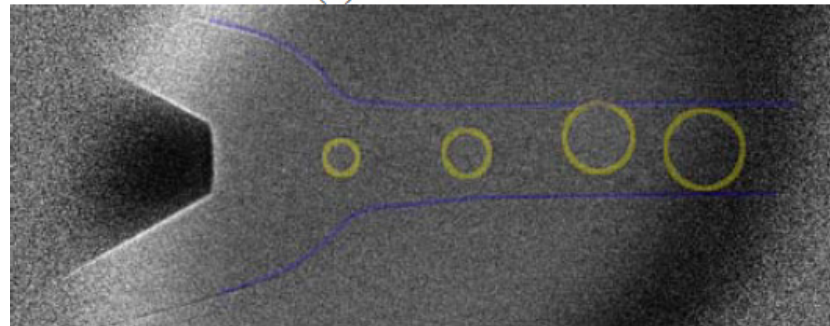
Figura 2.17: Parámetros de las pruebas experimentales.



(a) 1 bar ambient



(b) 10 bar ambient



(c) 20 bar ambient

Figura 2.18: Formación de gotas al término de la inyección a distintos rangos de presión ambiental.

Pos et al. [26] investigaron las características macroscópicas del chorro diesel a elevadas presiones de inyección al término de la inyección (EOI) a través de la adquisición de imágenes con una cámara de alta velocidad en una cámara de volumen constante, la cual se presurizo con N_2 a 33 bar, adicionalmente utilizaron dos inyectores solenoides similares, solo que uno se adquirió de un automóvil con 30, 000 millas recorridas y el otro uno totalmente nuevo para compararlos. Concluyendo que para ambos inyectores existe formación de gotas y ligamentos, tal y como se muestra en la **Figura 2.19**.

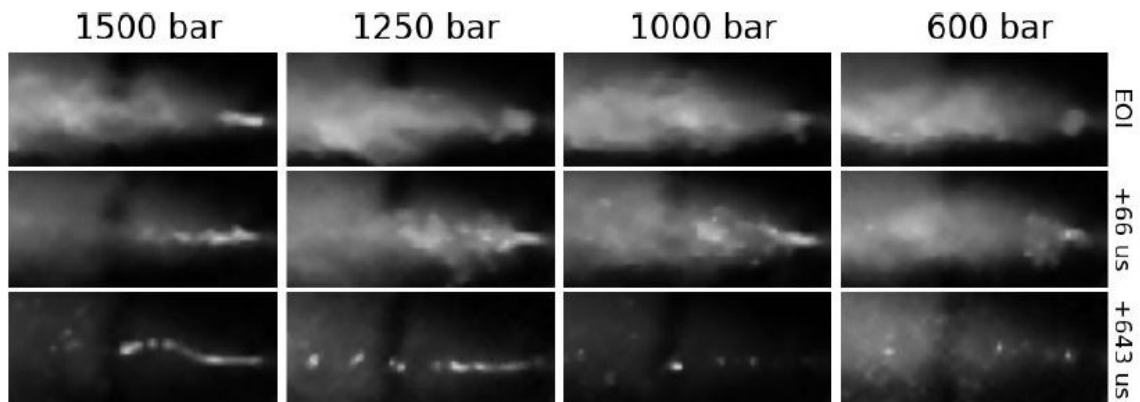


Figura 2.19: Formación de gotas y ligamentos al término de la inyección a distintos rangos de presión de inyección.

Además analizaron el comportamiento del chorro al emplear un inyector con formación de depósitos y otro nuevo. En la **Figura 2.20**, se muestra el comportamiento del chorro asociado al inyector con formación de depósitos y al inyector nuevo, concretamente han observado que hay una penetración reducida en dos de los seis chorros del inyector rico en depósitos mientras que en el nuevo la penetración es similar en todos los chorros al inicio de la inyección.

Abdullah et al. [27] investigaron los efectos de la P_{rail} y la T_{amb} sobre la distribución y formación de gotas de un combustible diesel empleando una técnica óptica (shadowgraph) mostrada en la **Figura 2.21**, la cual consiste en una cámara de pulverización a volumen constante capaz de simular las condiciones reales de combustión de un motor diesel, utilizando una máquina de compresión rápida que suministra N_2 para la presurización de la cámara a la que se inyecta el combustible diesel mediante un sistema de inyección common rail.

En donde emplearon las condiciones experimentales descritas en la **Tabla 2.6**, concluyendo que con el incremento de la temperatura ambiental ocurre una menor formación de gotas provocado por la baja presión con que se inyecta lo que presenta una restricción que evita que se desarrolle correctamente la pulverización del chorro y por ello su proceso de

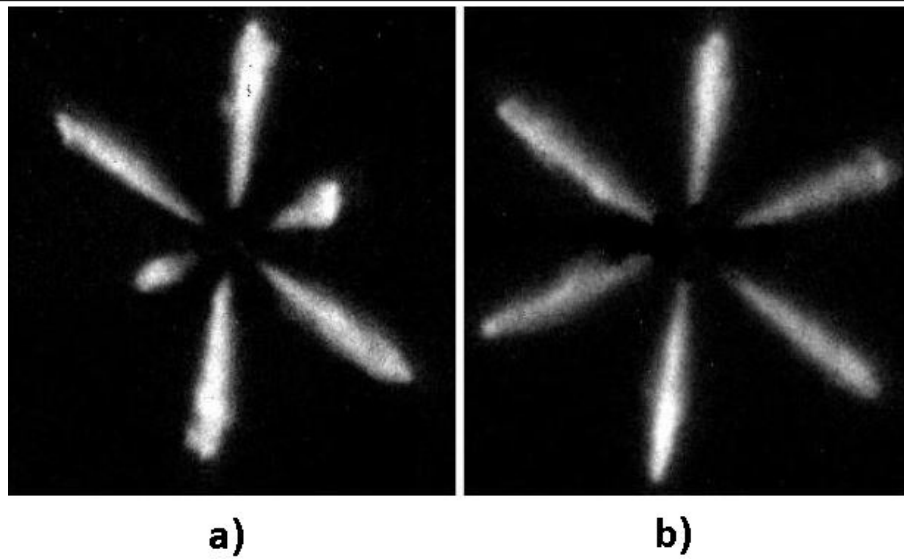


Figura 2.20: Comportamiento del chorro diesel; a) Asociado al inyector con formación de depósitos y b) Relacionado con el inyector nuevo.

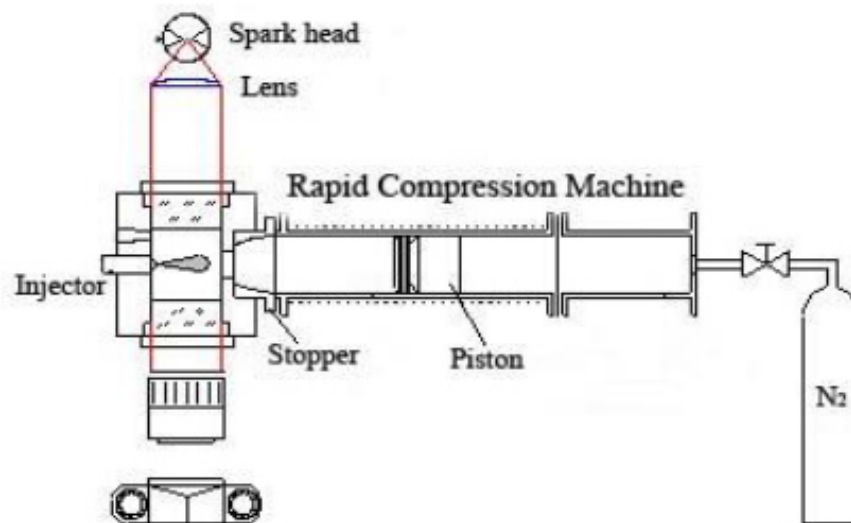


Figura 2.21: Técnica óptica de Shadowgraph.

mezcla tiende a ser menor mientras que con el aumento de la presión de inyección ocurre un incremento del 30 % en sus parámetros macroscópicos mejorando en consideración así su proceso de mezcla, tal y como se ilustra en la **Figura 2.22**.

Tabla 2.6: Condiciones experimentales de inyección.

	High P_{inj}	High T_{amb}
Ambient Temperature (K)	298	700
Fuel injection pressure (MPa)	70	40
Ambient Pressure (MPa)	2.4	2.4

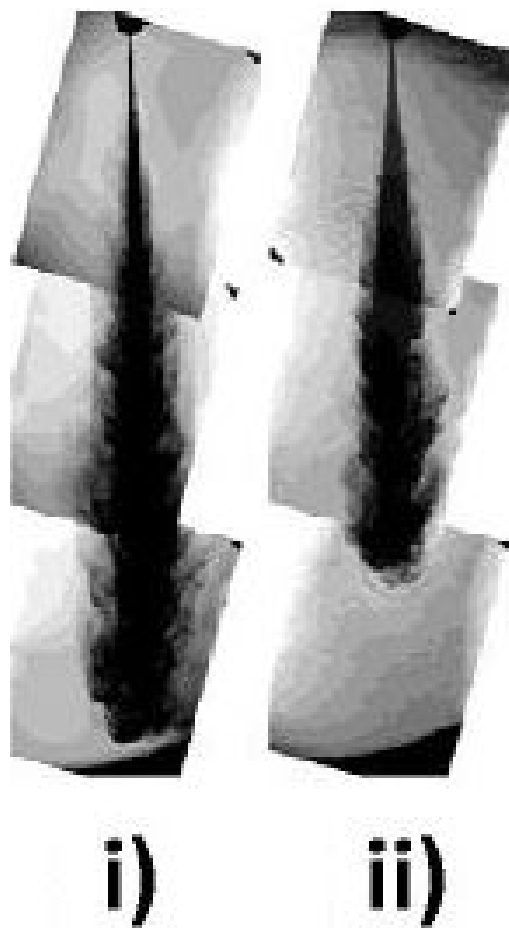


Figura 2.22: Imagen macroscópica del chorro diesel empleando i) Alta presión de inyección ii) Alta temperatura ambiente.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Charles Fayette Taylor**, *The Internal Combustion Engine in Theory and Practice*, Volume 2: Combustion, Fuels, Materials, Design, Revised Edition (1985).
- [2] **John B. Heywood**, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York: McGraw-Hill (1988).
- [3] **Balaji Mohan, Wenming Yang, Kun Lin Tay, Wenbin Yu**, *Experimental study of spray characteristics of biodiesel derived from waste cooking oil*, Energy Conversion and Management 88 (2014) 622-632.
- [4] **Raghu Palani, Nallusamy Nallusamy, Pitchandi K.**, *Spray characteristics of diesel and derivatives in direct injection diesel engines with varying injection pressures*, Mechanical Science and Technology 29 (10) (2015) 4465-4471.
- [5] **Xiangang Wang, Zuohua Huang, Olawole Abiola Kuti, Wu Zhang, Keiya Nishida**, *Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure*, International Journal of Heat and Fluid Flow 31 (2010) 659-666.

- [6] **Chao He, Yunshan Ge, Jianwei Tang, Xiukun Han**, *Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel*, International Journal of Energy Research (2008), 32, 1329-1338.
- [7] **Hyung Jun Kim, Su Han Park, Chang Sik Lee**, *A study on the macroscopic spray behavior and atomization characteristics of biodiesel and dimethyl ether sprays under increased ambient pressure*, Fuel Processing Technology 91 (2010) 354-363.
- [8] **Hongzhan Xie, Lanbo Song, Yizhi Xie, Dong Pi, Chunyu Shao, Qizhao Lin**, *An experimental study on the macroscopic spray characteristics of biodiesel and diesel in a constant volume chamber*, Energies (2015), 8, 5952-5972.
- [9] **Wugao Zhang, Xiaoling Chen, Genxiang Gu, Huaili Hu, Taotao Liu, Zhen Huang**, *Experimental study of the spray characteristics of USLD methanol and DME on the swirl nozzle of a Stirling engine*, Fuel Processing Technology 119 (2014) 1-9.
- [10] **Avinash Kumar Agarwal, Jai Gopal Gupta, Atul Dhar, Woong Il Kim, Chang Sik Lee, 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 (2014) 212-221.
- [11] **L.B. Song, Prof. Q.Z. Lin, Y.Z. Xie, H.W. Hu, H.Q. Hu, D. Pi, D.S.M. Xu**, *Experimental study of the spray characteristics of Diesohol fuel using a high-pressure common-rail injection system in a Diesel engine*, Energy Technology (2015) Vol. 3. pp. 896-905.
- [12] **Yuan Gao, Jun Deng, Chunwang Li, Fengling Dang, Zhuo Liao, Zhijun Wu, Liguang Li**, *Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil*, Biotechnology Advances 27 (2009) 616-624.
- [13] **Dong Han, Chunhai Wang, Yaozong Duan, Zhisong Tian, Zhen Huang**, *An experimental study of injection and spray characteristics of diesel and gasoline blends on a common rail injection system*, Energy 75 (2014) 513-519.

- [14] **Avinash Kumar Agarwal, Vipul H. Chaudhury**, *Spray characteristics of biodiesel/blends in a high pressure constant volumen spray chamber*, *Experimental Thermal and Fluid Science* 42 (2012) 212-218.
- [15] **Avinash Kumar Agarwal, Sibendu Som, Pravesh Chandra Shukla, Harsh Goyal, Douglas Longman**, *In-nozzle flow and spray characteristics for mineral diesel, Karanja and Jatropha biodiesels*, *Applied Energy* 156 (2015) 138-148.
- [16] **E. Delacourt, B. Desmet, B. Besson**, *Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques*, *Fuel* 84 (2005) 859-867.
- [17] **Raghu Palani, Nallusamy Nallusamy, Pitchandi K.**, *Spray characteristics of diesel and biodiesel fuels for various injection timings under non evaporating conditions*, *Applied Mechanics and Materials* Vol. 787, (2015) 682-686.
- [18] **Kourosh Karimi**, *Characterisation of multiple-injection diesel sprays at elevated pressures and temperatures*, School of Engineering, University of Brighton, Doctoral Thesis, May 2007.
- [19] **Robert Bosch GmbH** *Bosch Automotive Handbook*, Distribution John Wiles and Sons Ltd. 7th edition, July 2007.
- [20] **Zhiqiang Zhang, Fuquan Zhao, Jun Deng, Li-Guang Li, Yuan Shen**, *Characteristics of the multiple injection diesel spray employed common rail system*, *Journal of Thermal Science and Technology* Vol 8, No. 1, (2013) 106-119.
- [21] **Ziman Wang, Hongming Xu, Changzhao Jiang, Mirosław L. Wyszynski**, *Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection*, *Fuel* 174 (2016) 140-152.
- [22] **Chang Han-Bao, Xu Hong-Jun, Shao Li-Min, Chen Hai-Long, Zhou Jia-Dong**, *Test investigation on macroscopic properties of multi-injection spray*, *Chinese Internal Combustion Engine Engineering*, 2011, Vol. 32, No. 3, 48-52.

- [23] **S.W. Park, H.K. Suh, C.S. Lee**, *Effects of a split injection on spray characteristics for a common-rail type diesel injection system*, International Journal of Automotive Technology, Vol. 6, No. 4, (2005) 315-322.
- [24] **Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee, Hyun Gu Roh**, *Spray and combustion characteristics of biodiesel/diesel blended fuel in a direct injection common-rail diesel engine*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 130, pp. 032807-(1-9), May 2008.
- [25] **A.B. Swantek, D. Duke, F.Z. Tilocco, N. Sovis, C.F. Powell, A.L. Kastengren**, *End of injection, mass expulsion behaviors in single hole diesel fuel injectors*, ILASS Americas 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Sprays Systems, Portland, OR, May 2014.
- [26] **R. Pos, L. Ganippa, R. Cracknell**, *Characteristics of high pressure diesel sprays at the end of injection*, Brunel University London, College of Engineering, Design and Physical Sciences, Shell Global Solutions, (UK) United Kingdom 1-12.
- [27] **Abdullah Adam, Mamat Rizalman, Tomoaki Yatsufusa**, *Analysis of diesel spray droplets behavior using shadowgraph technique images*, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 3, No. 1, February 2015.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

Índice

3.1. Introducción	40
3.2. Síntesis de la revisión bibliográfica	40
3.3. Objetivos	42
3.3.1. Objetivo general	42
3.3.2. Objetivos específicos	42
3.4. Metodología	42
3.4.1. Puesta a punto de la instalación experimental	43
3.4.2. Definición de las condiciones de operación	43
3.4.3. Combustibles objetos de estudio	44
3.4.4. Análisis de los resultados experimentales	44
Bibliografía	46

3.1. Introducción

El presente capítulo se centra en dar una breve descripción del contenido y planteamiento de la investigación realizada. El capítulo se divide en los siguientes apartados: En el primero se dará una breve síntesis de la revisión bibliográfica sobre el conocimiento del proceso de mezcla descrito en el capítulo 2. En el segundo se expondrá el objetivo general y los objetivos específicos que se pretenden alcanzar para cubrir las carencias debido a la incertidumbre en la lectura relacionada sobre el efecto de los parámetros de inyección en el proceso de mezcla en un motor Diesel. Y finalmente en el tercero se describirá la metodología general de la investigación que se empleará para alcanzar los objetivos planteados.

3.2. Síntesis de la revisión bibliográfica

Con el paso de los años los biocombustibles derivados de las diferentes materias primas tales como: *el aceite usado de cocina, el aceite comestible, el aceite de palma, el aceite del sebo de la res, el aceite de jatropa, entre muchos otros más* se ha visto la posibilidad de emplearlos en los motores Diésel; ya que estos biocombustibles presentan un potencial [1, 2], para reducir las emisiones contaminantes en un motor Diesel.

Por ello existe una gran cantidad de investigación en la que se profundiza en el conocimiento del efecto del uso del biodiesel sobre el proceso de mezcla. Donde hacen mayor énfasis en la penetración del chorro, su ángulo del chorro y área del mismo; los cuáles son los parámetros macroscópicos del chorro que caracterizan al proceso de mezcla [3].

Dichos parámetros se ven sumamente influenciados por el efecto de las propiedades físicas del combustible, tales como la *densidad, viscosidad y tensión superficial* son las tres de mayor importancia y que afectan en gran parte al proceso de mezcla. El biodiesel a pesar de presentar una mayor viscosidad y tensión superficial que el mismo diésel, de acuerdo al % de mezcla que se tenga del biodiesel con diésel sus parámetros macroscópicos son muy similares a los de un diésel fósil [4], por otro lado, mezclando un % de

gasolina con diésel la penetración del chorro tiende a disminuir por el bajo nivel de viscosidad y tensión superficial que éste presenta provocando así un incremento significativo en el ángulo del chorro [5]. Sin importar el tipo de biodiesel que se utilice, su proceso de mezcla siempre se ve afectado en gran parte por las propiedades físicas del combustible, pero de acuerdo a la presión ambiental que se tenga en el interior de la cámara donde se inyecta el combustible sus parámetros macroscópicos se ven afectados considerablemente [6].

Existe una amplia gama de estudios acerca de los efectos del biodiesel sobre el proceso de mezcla empleando una inyección principal; donde un inconveniente muy grande que se presenta son las emisiones de los gases, productos de la combustión y es por ello que para un combustible diésel se aplica una estrategia de inyección múltiple con dos y hasta tres inyecciones con tiempos de permanencia distintos, donde su proceso de mezcla se ve afectado por el % de volumen en cada inyección [7], por otro lado en un combustible diésel la penetración del chorro y el área del mismo al inicio de una inyección múltiple son menores que en una inyección principal solo al comienzo de la inyección múltiple esto debido al corto tiempo de permanencia que hay entre ambas inyecciones, por el cuál la tobera del inyector no cierra totalmente incluso por esto la formación de gotas a la salida del inyector es menor en una inyección principal debido a su alta presión de inyección permitiendo una completa apertura en el inyector y una mejor dispersión [8].

Asimismo los estudios donde se destaque la formación de gotas y ligamentos al cierre del inyector; son muy escasos. Para el final de la inyección de un diésel entre mayor sea la presión de inyección provoca un mayor retardo en la salida de gotas y ligamentos [10], aunque desde otra perspectiva si a las toberas de menor diámetro se les aplica una alta presión de inyección presentarían un menor retardo en la formación de gotas esto de acuerdo a la presión ambiental en que se desarrolle el proceso de inyección [9].

3.3. Objetivos

3.3.1. Objetivo general

Profundizar en el conocimiento del efecto de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel. Para alcanzar el objetivo general previamente descrito, se plantearon los siguientes objetivos específicos.

3.3.2. Objetivos específicos

- Analizar el efecto de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla.
- Analizar el efecto de la duración del pulso eléctrico sobre el proceso de mezcla.

3.4. Metodología

Para conseguir todos y cada uno de los objetivos que se han planteado en el presente trabajo, se ha planteado la siguiente metodología:

- 1) Puesta a punto de la instalación experimental.
- 2) Definición de las condiciones de operación.
- 3) Combustibles objetos de estudio.
- 4) Análisis de los resultados experimentales.

En la **Figura 3.1** se ilustran cada una de las etapas previamente descritas.

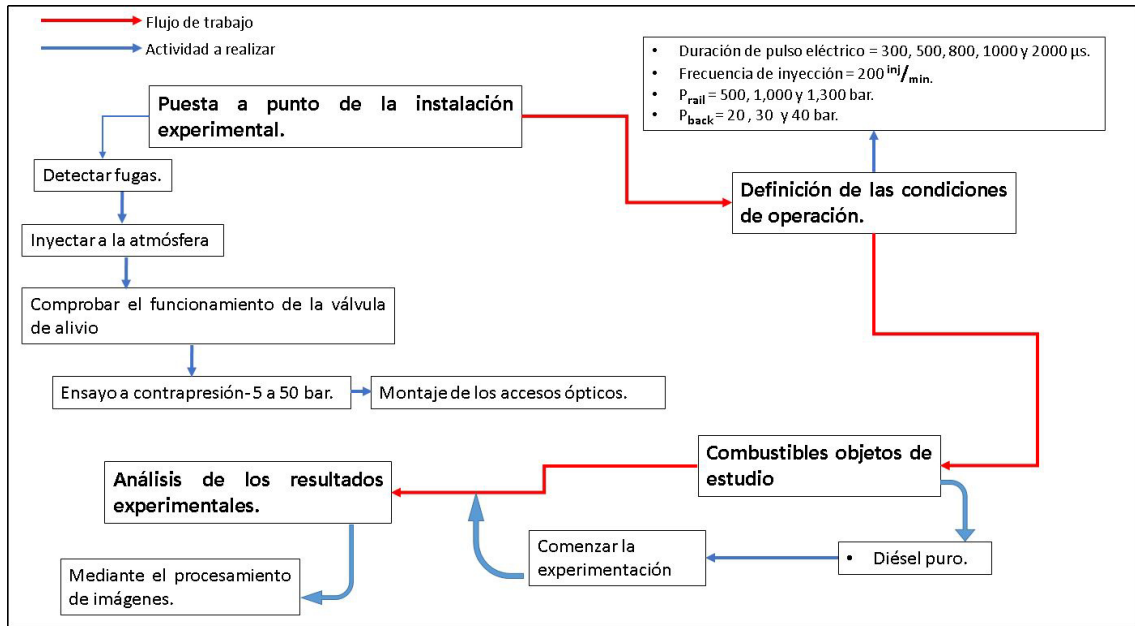


Figura 3.1: Metodología general de la Tesis.

3.4.1. Puesta a punto de la instalación experimental

Primero que nada para poder dar inicio a cualquier ensayo en la maqueta de visualización a volumen constante localizada en las instalaciones de FIME-LIITE, esta debió ponerse a punto [11]. Para ello se trabajó en el total rediseño de la maqueta de visualización a volumen constante [12], el cuál consistió en diseñar un nuevo sistema de inyección, colocar accesos ópticos de zafiro y comprobar el adecuado funcionamiento de la válvula de seguridad, después se seleccionó el inyector a utilizar en el presente estudio, posteriormente se comprobó que todo el sistema hidráulico funcionará correctamente haciendo pruebas de inyección al ambiente y por último revisar que la maqueta de visualización a volumen constante no presente fugas. Seguidamente se dan más detalles de cada una de estas etapas.

3.4.2. Definición de las condiciones de operación

Antes de comenzar los ensayos era importante el determinar las condiciones de operación del sistema de inyección y posteriormente comprobar que el equipo fuera capaz de

efectuar los ensayos sin que estos sufrieran algún daño o presentaran una falla.

Para ello se determino emplear una estrategia de diferentes tiempos de inyección utilizando el Common Rail System Tester [CRS-1200], para estudiar el proceso de mezcla del combustible mientras se fue variando la contrapresión (20, 30 y 40) bar en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante trabajando a distintas presiones de inyección (500, 1,000 y 1,300) bar con una frecuencia de $(200) \frac{inj}{min}$, mientras se fueron efectuando variaciones en la duración del pulso eléctrico (300, 500, 800, 1000 y 2000) μs .

3.4.3. Combustibles objetos de estudio

Existe una amplia variedad de biocombustibles y entre los mas prometedores es el biodiesel, derivado del aceite usado de cocina por su virtud económica y sustentable [13].

Es por ello que el biocombustible objeto de estudio sera el biodiesel derivado del aceite usado de cocina, junto con el diesel

3.4.4. Análisis de los resultados experimentales

Una vez que se inyectan los combustibles en la maqueta de visualización a volumen constante, se deben analizar a detalle el comportamiento de los parámetros macroscópicos: penetración del chorro, ángulo del chorro y el área del mismo de los combustibles objetos de estudio. Para ello se deben tomar imágenes mientras se desarrolle el proceso de inyección tanto del diésel como el biodiesel.

Concretamente se utilizó la técnica óptica-iluminación directa por dispersión MIE, la cual consiste en emplear una cámara de alta velocidad **NanoSense MkII** de la firma **RED-LAKE ALLIANCE** impulsada por **IDT**, en donde conectada a través de su puerto USB2 se manipula mediante su software y con ésta se es capaz de llegar a tomar hasta 5,000

imágenes por segundo para cada evento de inyección.

Por último las imágenes adquiridas, se deben de procesar para obtener los parámetros macroscópicos del chorro: penetración del chorro, ángulo del chorro y el área del mismo, los cuales caracterizan el proceso de mezcla. Para esto se utilizó un código matemático el cuál se desarrollo en el software **MATLAB**.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Balaji Mohan, Wenming Yang, Kun Lin Tay, Wenbin Yu**, *Experimental study of spray characteristics of biodiesel derived from waste cooking oil*, Energy Conversion and Management 88 (2014) 622-632.
- [2] **Chao He, Yunshan Ge, Jianwei Tang, Xiukun Han**, *Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel*, International Journal of Energy Research (2008), 32, 1329-1338.
- [3] **Hongzhan Xie, Lanbo Song, Yizhi Xie, Dong Pi, Chunyu Shao, Qizhao Lin**, *An experimental study on the macroscopic spray characteristics of biodiesel and diesel in a constant volume chamber*, Energies (2015), 8, 5952-5972.
- [4] **Yuan Gao, Jun Deng, Chunwang Li, Fengling Dang, Zhuo Liao, Zhijun Wu, Liguang Li**, *Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil*, Biotechnology Advances 27 (2009) 616-624.
- [5] **Dong Han, Chunhai Wang, Yaozong Duan, Zhisong Tian, Zhen Huang**, *An experimental study of injection and spray characteristics of diesel and gasoline blends on a common rail injection system*, Energy 75 (2014) 513-519.

- [6] **Avinash Kumar Agarwal, Vipul H. Chaudhury**, *Spray characteristics of biodiesel/blends in a high pressure constant volumen spray chamber*, *Experimental Thermal and Fluid Science* 42 (2012) 212-218.
- [7] **Zhiquian Zhang, Fuquan Zhao, Jun Deng, Li-Guang Li, Yuan Shen**, *Characteristics of the multiple injection diesel spray employed common rail system*, *Journal of Thermal Science and Technology* Vol 8, No. 1, (2013) 106-119.
- [8] **Ziman Wang, Hongming Xu, Changzhao Jiang, Mirosław L. Wyszynski**, *Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection*, *Fuel* 174 (2016) 140-152.
- [9] **A. B. Swantek, D. Duke, F. Z. Tilocco, N. Sovis, C. F. Powell, A. L. Kastengren**, *End of injection, mass expulsion behaviors in single hole diesel fuel injectors*, ILASS Americas 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Sprays Systems, Portland, OR, May 2014.
- [10] **R. Pos, L. Ganippa, R. Cracknell**, *Characteristics of high pressure diesel sprays at the end of injection*, Brunel University London, College of Engineering, Design and Physical Sciences, Shell Global Solutions, (UK) United Kingdom 1-12.
- [11] **Carlos Alberto Ruiz Colunga**, *Puesta a punto de instalación experimental para caracterizar chorros de combustible en condiciones termodinámicas controladas*, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca División de Ingenierías, Tesis Maestría, Junio 2011.
- [12] **Adolfo Benítez Molina**, *Estudio de los efectos de las propiedades de transporte y termo-físicas del biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre la estructura dinámica de un chorro diesel*, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Tesis Maestría, Noviembre 2015.
- [13] **Omar Masera Cenutti, Nicolás Rodríguez Martínez, Ignacio Lazcano Martínez, Luis Augusto Horta Nogueira, Isaias C. Macedo, Sergio C. Trindade, Daniela Thrän, Oliver Probst, michael Weber, Franziska Müller-Langer**, *Potencia-*

les y Viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México, Senner/BID/GTZ Proyectos ME-T1007 - ATN/DO-9375-ME y PN 04.2148.7-001.00.

CAPÍTULO 4

HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

Índice

4.1. Introducción	50
4.2. Maqueta de visualización a volumen constante	51
4.2.1. Cámara a volumen constante	52
4.2.2. Sistema de inyección	53
4.2.3. Sensores de medición	72
4.3. Técnica óptica-Iluminación directa por dispersión MIE	79
4.3.1. Cámara de alta velocidad	80
4.3.2. Iluminación	81
4.4. Procesamiento de imágenes	82
4.A. Anexo: Determinación del par de apriete óptimo de los accesos ópticos sin dañarles	83
4.A.1. Introducción	84
4.A.2. Metodología planteada para la determinación del par de apriete óptimo	84

4.A.3. Plan de trabajo desarrollado para la determinación del par de apriete óptimo	84
4.A.4. Análisis de la determinación del par de apriete óptimo y conclusión	85
4.B. Anexo: Metodología empleada para la calibración de la válvula de seguridad	88
4.B.1. Calibración de la válvula	89
4.B.2. Análisis de la calibración de la válvula de alivio durante la experimentación	89
4.B.3. Conclusión	90
4.C. Anexo: Determinación de la relación pixel/mm.	91
4.D. Anexo: Manual de operación de la maqueta de visualización a volumen constante	92
4.D.1. Precauciones	93
4.D.2. Uso del sistema de inyección	94
4.D.3. Uso de la cámara digital de alta velocidad	106
Bibliografía	111

4.1. Introducción

En este capítulo se presenta una descripción general de los instrumentos que componen la instalación experimental para la caracterización de chorros de combustible en condiciones termodinámicas controladas. Se muestra un diagrama de la instalación, enumerando todos los componentes que ésta utiliza y se explicará el uso que cada uno de éstos desempeña durante la experimentación. También se mencionará brevemente la técnica óptica que se utilizará en el presente estudio, la programación que se efectuara para la adquisición de datos y procesamiento de imágenes.

Esta instalación se tomo como referencia del trabajo de tesis de **Carlos** [1], desarrollado en el LIITE-Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética de la FIME, UANL donde se explica la puesta a punto de la instalación experimental. Por ello a continuación se detalla de una forma muy breve las características y funcionamiento de todos y cada uno de los componentes de la maqueta de visualización a volumen constante.

4.2. Maqueta de visualización a volumen constante

Año con año el estudio del proceso de inyección de los combustibles se ha ido innovando en cuanto a las técnicas de medición bajo unas normas altamente estrictas. Esto permite la construcción de modelos físicos (**maquetas**) en donde se puede experimentar bajo condiciones termodinámicas muy similares a las que se tienen en un motor de combustión interna.

Por ello para lograr analizar los efectos que provoca el biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre el proceso de mezcla, en base al trabajo de tesis de **Adolfo** [2] desarrollado en el LIITE-Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética de la FIME, UANL; se trabajó en el completo rediseño de la maqueta de visualización a volumen constante el cual se ilustra en la **Figura 4.1**.

La maqueta de visualización a volumen constante esta constituida por los siguientes componentes, los cuales todos se pueden observar en la **Figura 4.1** y de los que se darán mas detalles conforme esta sección avanza:

- Cámara a volumen constante

- Sistema de inyección

- Técnica óptica

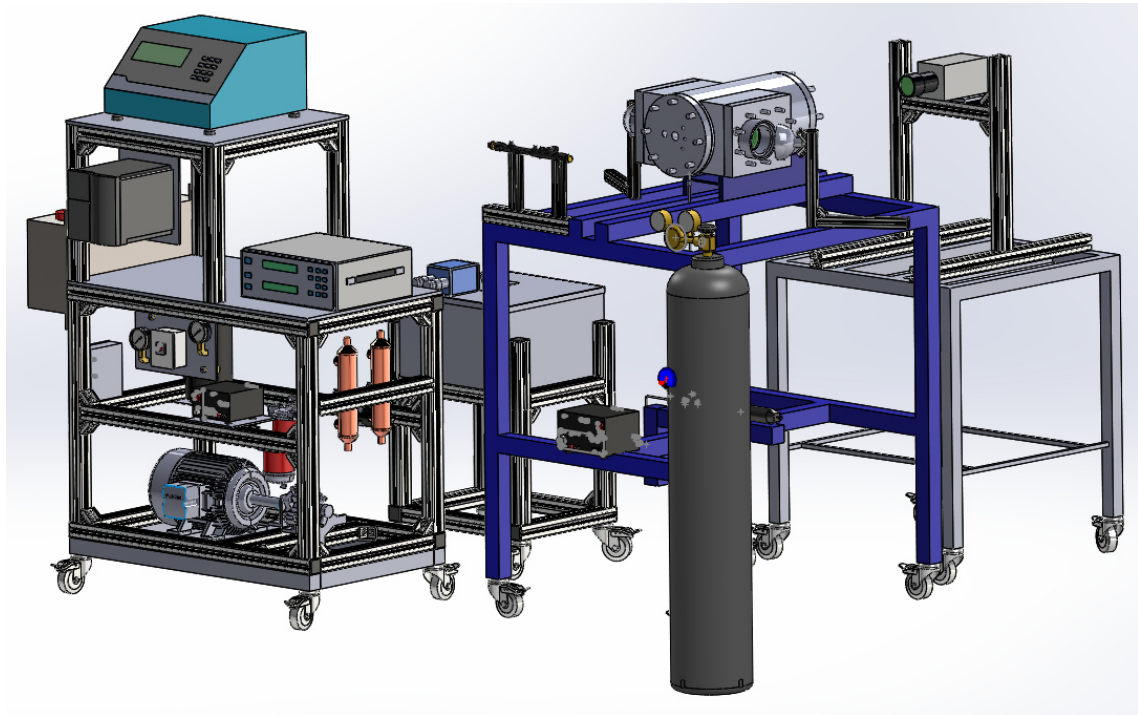


Figura 4.1: Maqueta de visualización a volumen constante.

4.2.1. Cámara a volumen constante

En lo que a los procesos de inyección de combustible se refiere, estas herramientas permiten simular las condiciones que se tienen en el interior de la cámara de combustión de un motor real, lo cual hace posible obtener los resultados más precisos y con una mayor aproximación. En la **Figura 4.2** se observa la cámara cilíndrica de visualización.

La maqueta de visualización a volumen constante desarrollada en el LIITE-Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética de la FIME, UANL; consiste en una cámara cilíndrica a volumen constante hecha de acero al carbón con un largo de 40 cm y un diámetro aproximado de 27 cm, además de dos placas laterales de 24 cm por 20.3 cm y un espesor de 8 cm también tiene una tapa frontal de un diámetro aproximado de 27 cm y un espesor de 10 cm; estos tres componentes cuentan cada uno con un acceso óptico de 8 cm, los cuáles se utilizan para la visualización del chorro diesel, en donde se utilizan unas ventanas de zafiro las cuáles están diseñadas para soportar una presión máxima de

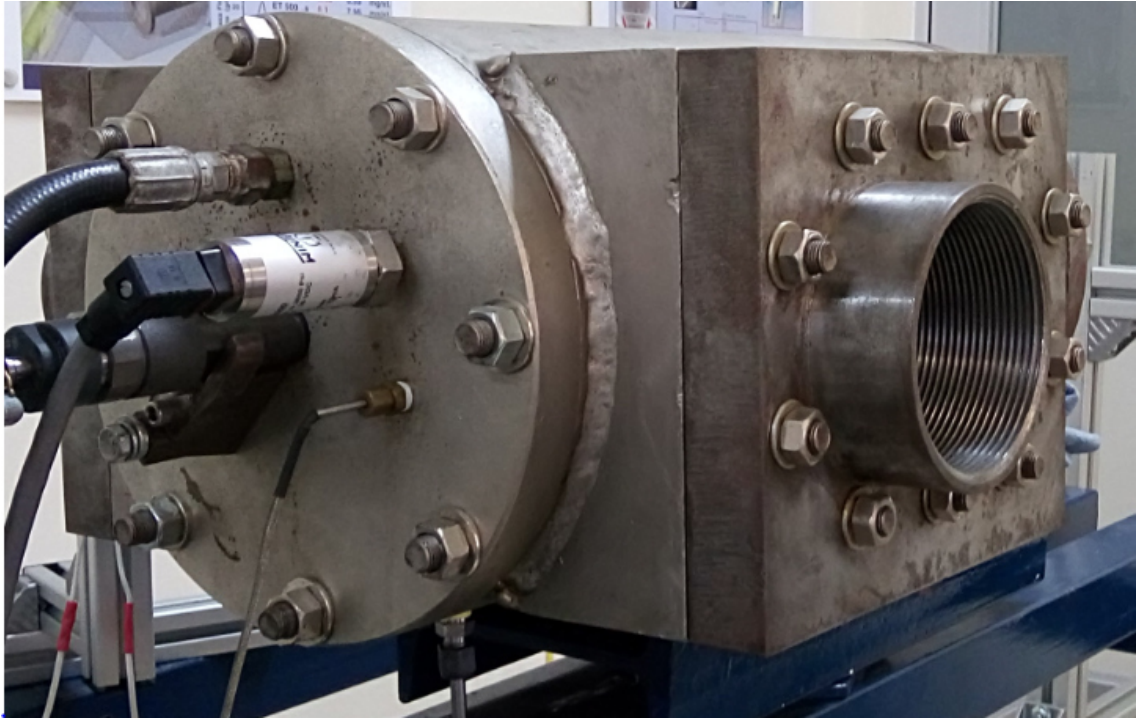


Figura 4.2: Cámara de volumen constante.

180 bar y donde se les aplico un τ de $20 \text{ N} \cdot \text{m}$ explicando con detalles en el anexo 4.A la manera en como se determinó el par de apriete óptimo de los accesos ópticos. La tapa frontal es muy similar a la tapa trasera, a excepción que esta no cuenta con acceso óptico ya que en ésta va ubicado el inyector de combustible, la alimentación para el nitrógeno, un sensor de temperatura y un sensor de presión (**WINTERS 1963**) con el cual se puede medir la presión en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante.

4.2.2. Sistema de inyección

En la **Figura 4.3** se ilustra el esquema hidráulico del sistema de inyección, el cuál consta de dos diferentes circuitos, el primero trabaja con alta presión, mientras en el otro se trabaja a baja presión; los cuales forman parte del sistema de inyección de combustible de la maqueta de visualización a volumen constante.

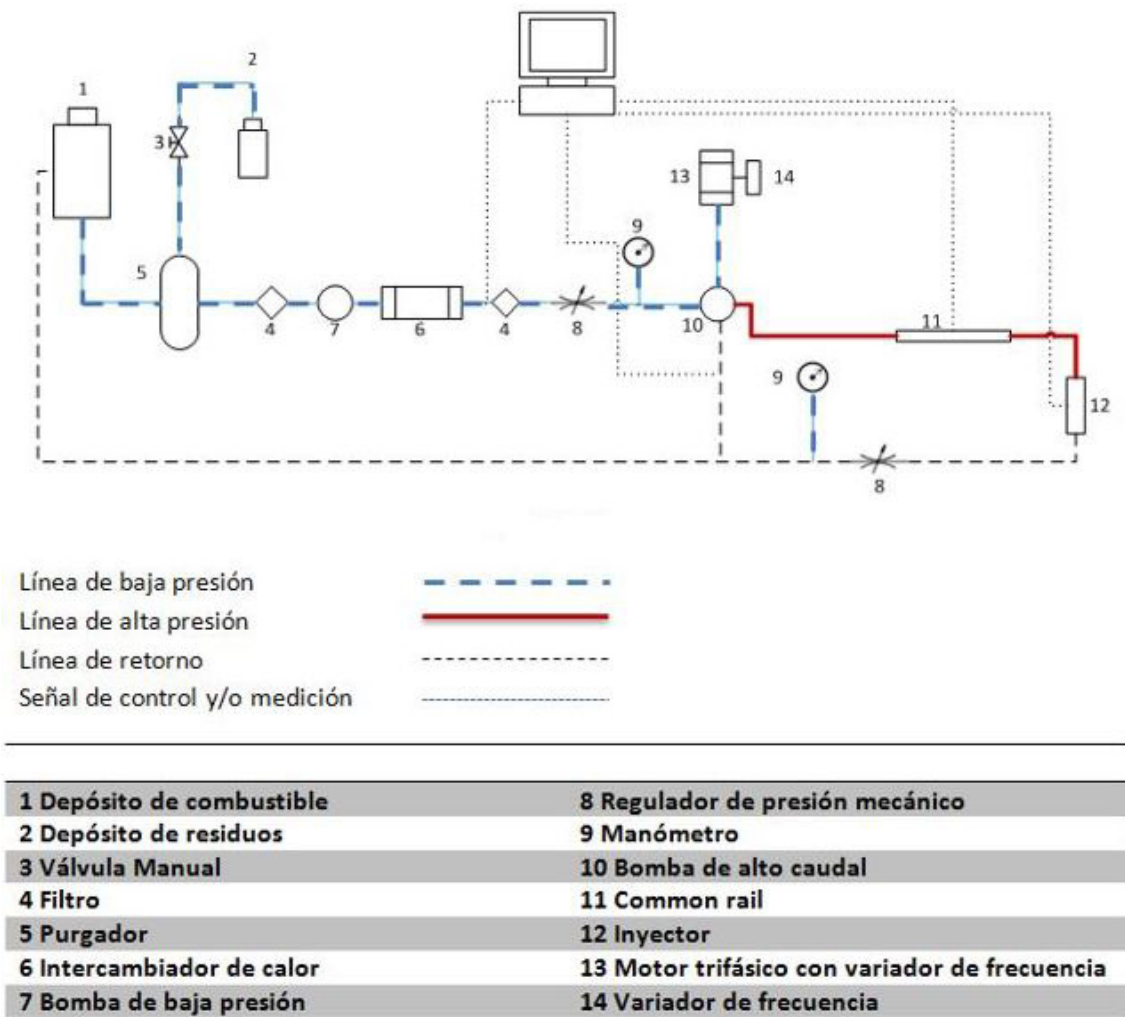


Figura 4.3: Esquema hidráulico del sistema de inyección.

En la **Tabla 4.1** se describen todos los componentes que conforman el circuito de baja presión; mientras que en la **Tabla 4.2** se describen los componentes que conforman el circuito de alta presión.

Tabla 4.1: Componentes del circuito de baja presión

Depósito de combustible
Depósito para combustible purgado de aire
Filtro de combustible
Bomba de combustible de flujo continuo
Intercambiador de calor
Regulador de control de flujo

Tabla 4.2: Componentes del circuito de alta presión

Motor eléctrico de régimen constante
Variador de frecuencia
Bomba de inyección de alta presión
Manguera de alta presión
Sistema de inyección common-rail
Inyector diesel
Common-rail system tester

Circuito de baja presión

Depósito de combustible y purgador

Se tiene un depósito de combustible de aproximadamente 21 litros ubicado en el costado superior izquierdo de la instalación hidráulica. Éste tiene una línea de ingreso hacia un purgador de aire, tal como se puede observar en la **Figura 4.4**, asimismo éste cuenta

con una válvula manual que expulsa el aire que pueda estar dentro del sistema y pueda provocarle un fallo a la bomba de alta presión.



Figura 4.4: Acumulador de succión.

Filtro de combustible

En la **Figura 4.5** se ilustran los dos filtros de combustible que fueron instalados en el sistema de inyección, con el fin de evitar el ingreso de partículas sólidas al inyector. Estos cuentan con una superficie filtrante de 5.3cm^2 y $5\mu\text{m}$ de grado de filtración, ambos son de cartucho, uno de ellos fue instalado a la entrada de la bomba de gasolina (**baja presión**) y el otro a la salida del flujo del intercambiador de calor

Bomba de Gasolina

Se prosigue con una electrobomba volúmetrica de rodillos, la cuál cuenta con un motor de escobillas y una excitación producida por una corriente eléctrica. En la **Figura 4.6** se puede observar la bomba de baja presión, la cuál trabaja con un voltaje continuo de 12 V a una corriente que no supera los 3 A generando como máximo una presión de 7 bar.

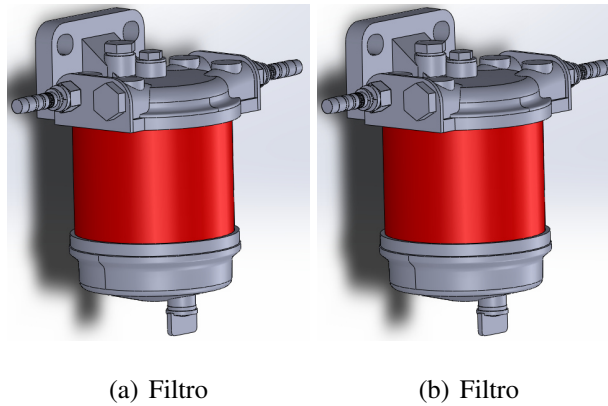


Figura 4.5: Filtros de combustible DELPHI HDF296.

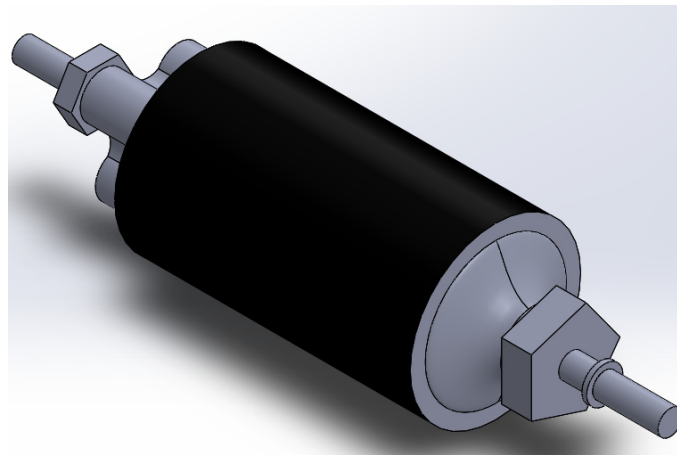


Figura 4.6: Electrobomba de baja presión.

Esta bomba cuenta con un rotor (1) que gira arrastrado por el motor eléctrico, (2) creando unos volúmenes, los cuáles son desplazados desde el hueco de aspiración (3) hacía el de envío (4). La bomba tiene unos rodillos (5) que limitan los volúmenes; que durante la rotación del motor se adhieren al anillo exterior (6). Además de que cuenta con dos válvulas, una de retención la cuál evita que el circuito de combustible se quede vacío cuando la bomba se encuentra totalmente parada y otra de sobrepresión (7) que recircula el envío de combustible cuando existen presiones superiores a los 6 bar. En la **Figura 4.7** se ejemplifica lo previamente descrito.

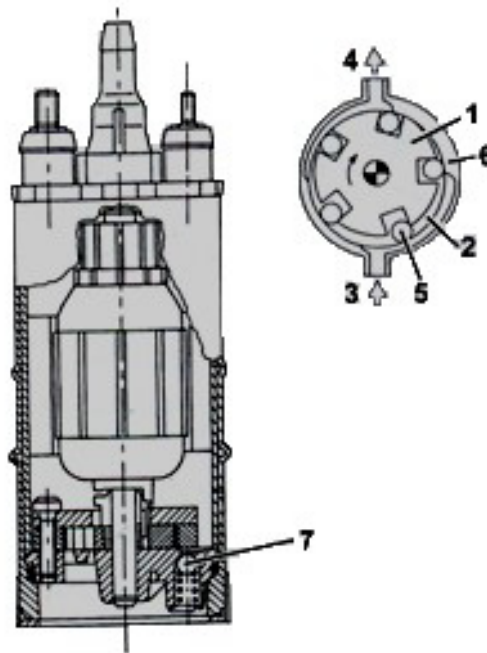
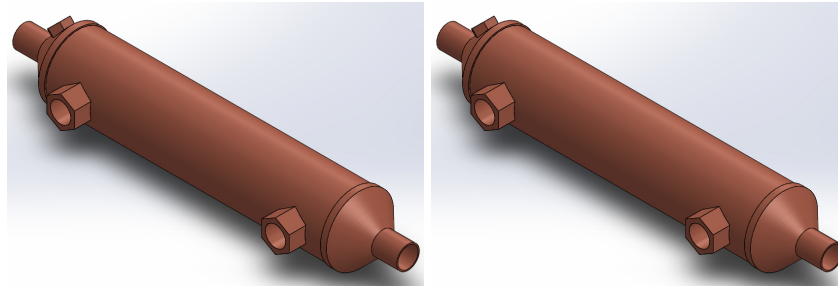


Figura 4.7: Funcionamiento de la electrobomba.

Intercambiador de calor

En la **Figura 4.8** se ilustran los dos intercambiadores de calor de tubos y coraza , que fueron instalados dentro del circuito de baja presión, con el fin de (1) evitar la aparición de cavitación en el interior de la bomba de alta presión, (2) mantener el combustible a una temperatura regulada durante el evento de la inyección y (3) evitar que cambie de fase el combustible antes de llegar al inyector. En este se colocó un termopar con el objetivo de medir la temperatura a la que saldrá el combustible del mismo.

En la **Tabla 4.3** se describen las características técnicas del intercambiador de calor de tubos y coraza. El combustible pasará a través de la coraza mientras que el refrigerante circulará en el interior de los tubos.



(a) Intercambiador

(b) Intercambiador

Figura 4.8: Intercambiadores de calor de tubos y coraza.**Tabla 4.3:** Características técnicas del intercambiador de calor de tubos y coraza.

Largo de tubo	23 cm
Diámetro del tubo	5 cm
Número de tubos	31
Diámetro de los tubos	5 mm
Número de pasos	1
Número de baffles	no tiene

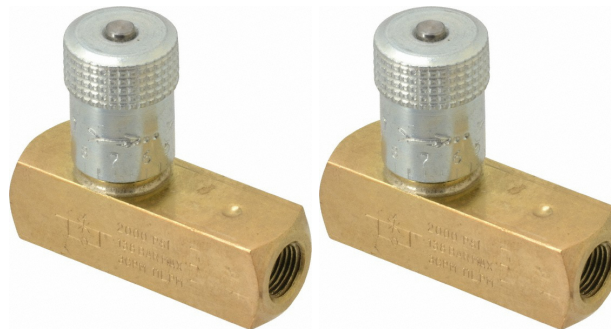
Válvula de control de flujo

En este tipo de válvula el flujo es en una sola dirección, permitiendo el flujo libre con un control de la velocidad de los cilindros y otros dispositivos hidráulicos. Cuentan además con una aguja de dos pasos que permite el ajuste de un flujo bajo. Como último dato la posición de la válvula se puede bloquear en su lugar con el tornillo de fijación de la perilla. En la **Tabla 4.4** se describen las especificaciones técnicas de las válvulas de control de flujo.

En la instalación experimental se instalaron dos válvulas de control de flujo manual hidráulico, tal y como se observa en la **Figura 4.9**, donde una de ellas se utiliza para controlar la alimentación hacia la bomba de alta presión, mientras que la otra se emplea para la presión de retorno del inyector de combustible.

Tabla 4.4: Especificaciones técnicas de la válvula de control de flujo.

Item	Material de control de flujo ColorFlow Serie F
Marca	PARKER
Modelo	F200B
Tamaño	1/8 in
Tipo	Válvula hidráulica PARKER
Cuerpo material	Latón
Material de ajuste	Acero inoxidable
Sellos	Nitrilo
Presión máxima	2,000 psi



(a) Válvula

(b) Válvula

Figura 4.9: Válvulas hidráulicas PARKER F200B.

Circuito de alta presión

Motor eléctrico y variador de frecuencia

Regularmente la bomba de alta presión en un motor Diésel convencional se impulsa por medio de un sistema de poleas conectado directamente al cigüeñal. Por ello en la instalación experimental, en el circuito de alta presión se utiliza un motor eléctrico de corriente

alterna para proporcionar el régimen de giro necesario, mismo que se ilustra en la **Figura 4.10**, este está controlado por un variador de frecuencia ver **Figura 4.11**, con el cual se es capaz de establecer su régimen de giro.



Figura 4.10: Motor eléctrico.



Figura 4.11: MicroMaster SIEMENS 420.

Para efectuar el acoplamiento entre el motor eléctrico y la bomba de alto caudal, se instalo un cople de aluminio entre ambas flechas con el fin de evitarle un daño o desgaste.

En la **Tabla 4.5** se describen las características técnicas del motor eléctrico.

Tabla 4.5: Características técnicas del motor eléctrico.

Tipo	GP100
Marca	SIEMENS
Potencia	5.595 KW
Régimen de giro	1,800 rpm
Frecuencia	60 Hz
Voltaje	208-230/460 V
Corriente	21.5-19.5/9.7 A
Eficiencia nominal	91.7 %
Peso	68 kg
Armazón	213TC

Bomba de alta presión

La instalación experimental cuenta con una bomba de alta presión BOSCH tipo CP1, la cuál se ilustra en la **Figura 4.12**, siendo esta la más común y utilizada en la mayoría de los sistemas de inyección diesel de common-rail [3]. En la **Tabla 4.6** se describen las características técnicas de la bomba, a la cuál se le instaló un termopar en su línea de retorno esto con el fin de medir la temperatura a la que sale el combustible de la bomba de alta presión hacia el retorno del sistema de inyección.

La carcasa de las bombas CP1 va dispuesta centralmente con el eje de accionamiento, la cuál consta de tres émbolos posicionados radialmente a 120° entre sí, en donde la excéntrica montada sobre el eje de accionamiento impulsa los émbolos de la bomba con un desplazamiento en ambos sentidos [4].

Tabla 4.6: Características técnicas de la Bomba de alta presión.

Tipo	CP1
Marca	BOSCH
Potencia máxima absorbida	3.5 KW
Régimen de ralenti	800 rpm
Régimen máximo de corte de inyección	5,200 rpm
Alta presión	200 a 1,350 bar

**Figura 4.12:** Bomba BOSCH CP1.

Por medio de la **bomba de baja presión** accionada de manera eléctrica, se inicia el proceso de alimentación de combustible (6), en donde si la presión de alimentación excede la presión de apertura (0.5 a 1.5 bares) el combustible es impulsado a presión al circuito de refrigeración y lubricación de la bomba de alto caudal a su orificio de estrangulación.

El eje de accionamiento (1) con la excéntrica (2) desplaza los émbolos (3) hacia arriba

y abajo en función de la carrera de la excéntrica, donde el combustible accede a través de la válvula de admisión (4), donde el émbolo se desplaza hacia abajo (carrera de aspiración). Se cierra la válvula y el combustible quedara contenido en el émbolo hasta que este se comprima, con una presión mayor a la del suministro y así se abre la de válvula de escape (5) donde el combustible comprimido accede al circuito de alta presión. Lo previamente descrito se ejemplifica en la **Figura 4.13**.

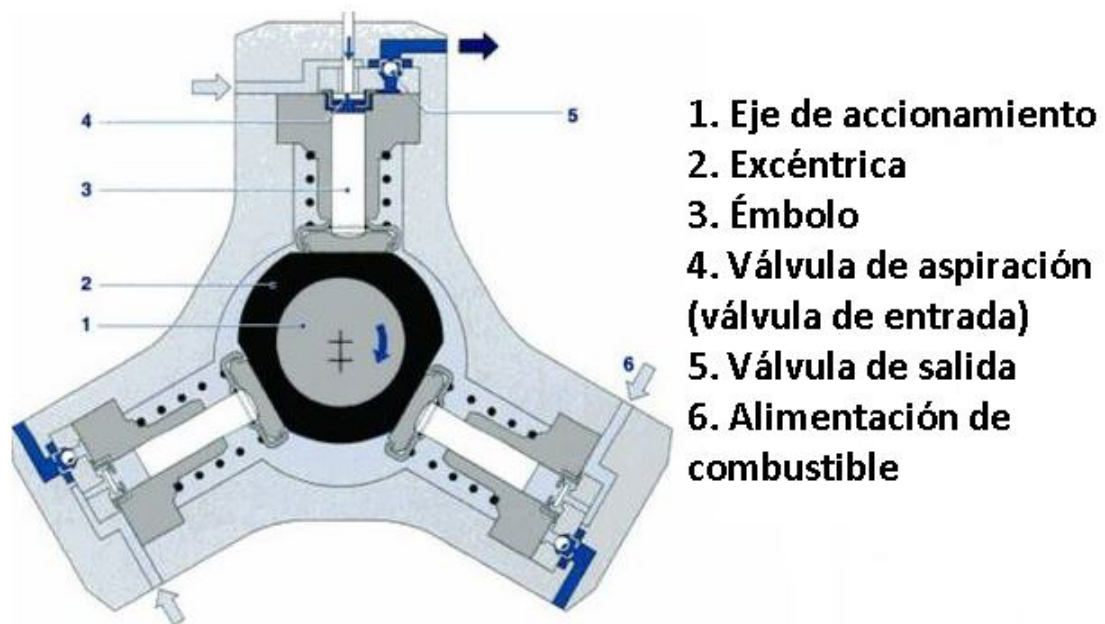


Figura 4.13: Funcionamiento de la bomba de alta presión CP1.

Manguera de alta presión

El suministro de combustible de la bomba de alta presión al sistema common-rail por lo general en los motores Diesel se efectúa a través de tubos de acero; pero en esta ocasión, para el desarrollo experimental se optó por utilizar una manguera de alta presión, la cuál tiene un núcleo interno de POM y una cubierta exterior de PA como la que se observa en la **Figura 4.14**.



Figura 4.14: Manguera Spir Star Tipo 4/6.

En la **Tabla 4.7** se describen las especificaciones técnicas de la manguera de alta presión, mas detalles sobre esto se encuentran en **Spir et al.** [5].

Sistema de inyección common rail

Este es un sistema electrónico de inyección de combustible para los motores diésel de inyección directa, el cuál se empezó a utilizar desde el año 1997 [6, 7] y fue el vehículo **Alfa Romeo 156** el primero que utilizó este moderno sistema de inyección.

Su funcionamiento consiste en aspirar combustible directamente desde el depósito de combustible hacia una bomba de alta presión, donde este pasa a través de un conducto común, el cual actúa como un acumulador de alta presión y presenta las siguientes ventajas:

Tabla 4.7: Especificaciones técnicas de la manguera de alta presión.

Núcleo interno	Polioximetileno
Cubierta exterior	Poliamida
Color	Azul
Temperatura de operación	-30 °C a 60 °C
Diámetro interior	4 mm
Diámetro exterior	11.5 mm
Presión máxima	2,800 bares
Presión ruptura	7,000 bares
Peso	0.365 kg/m

- La inyección de combustible es mas eficiente y limpia debido a las distancias extremadamente cortas de pulverización y la inyección múltiple.
- La potencia del motor es mas alta y mejora su funcionamiento con respecto al nivel de consumo y presenta bajas emisiones de gases de la combustión.
- Se puede utilizar con una gran cantidad de vehículos gracias a su diseño modular.

El common-rail ilustrado en la **Figura 4.15** es el mismo que se utilizó en la instalación hidráulica, localizado actualmente en las instalaciones del LIITE-Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética de la FIME, UANL; ya que este sistema es muy similar al que tienen los motores diesel se puede observar que este cuenta con cuatro salidas para inyectores; en el presente estudio solo se utilizará una de las cuatro salidas, en donde se montará un inyector diesel de la firma **BOSCH**.

Este acumulador de conducto común esta fabricado a base de acero para soportar las elevadas presiones de funcionamiento, es un cilindro alargado de forma hueca con un diámetro de 11 mm a lo largo de todo el rail y tiene un volumen aproximado de 18cm^3 . Cuenta además con una cavidad donde se le monta un sensor de presión de combustible,

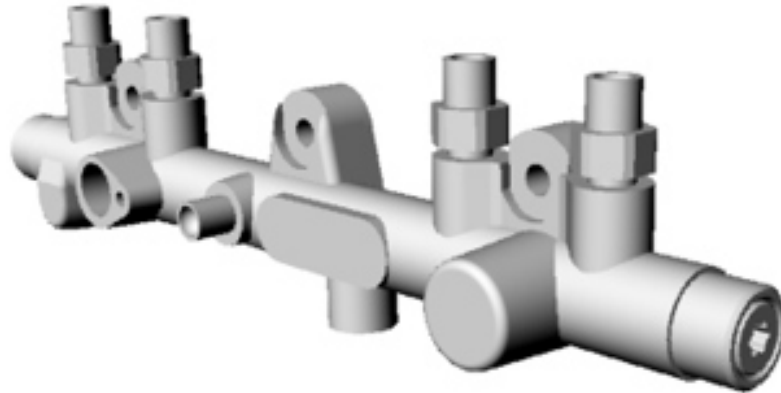


Figura 4.15: Common-Rail.

la conexión hidráulica (**alta presión**) entre el electro inyector y common rail se efectúa con unos tubos de un diámetro externo de 6 mm y uno interno de 2 mm fabricados estos en acero. La presión que maneja el common rail utilizado en la experimentación va desde los 1,100 bar hasta los 2,200 bar aproximadamente.

Inyector diésel

Un inyector esta constituido por una válvula electromagnética, un porta-inyector y una tobera; los cuales se pueden observar en la **Figura 4.16**, la función de éste es controlar e inyectar el combustible hacia el interior de la cámara de combustión.

- *Válvula electromagnética* esta constituida por dos válvulas reguladoras una de entrada por donde ingresa el combustible, otra de salida la cuál es para el retorno del combustible y también cuenta con una bobina a la que se le envía un pulso eléctrico el cuál determina el tiempo que se abre el inyector.
- *Porta-inyector* o también llamado cuerpo del inyector, cuenta con el acceso de entrada del combustible.
- *Tobera* permiten el paso de combustible a una determinada presión que envía la bomba inyectora.

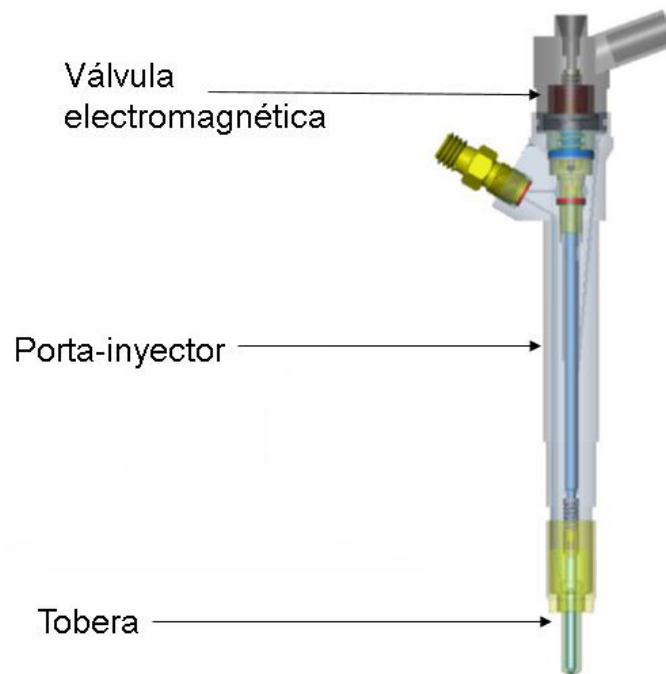
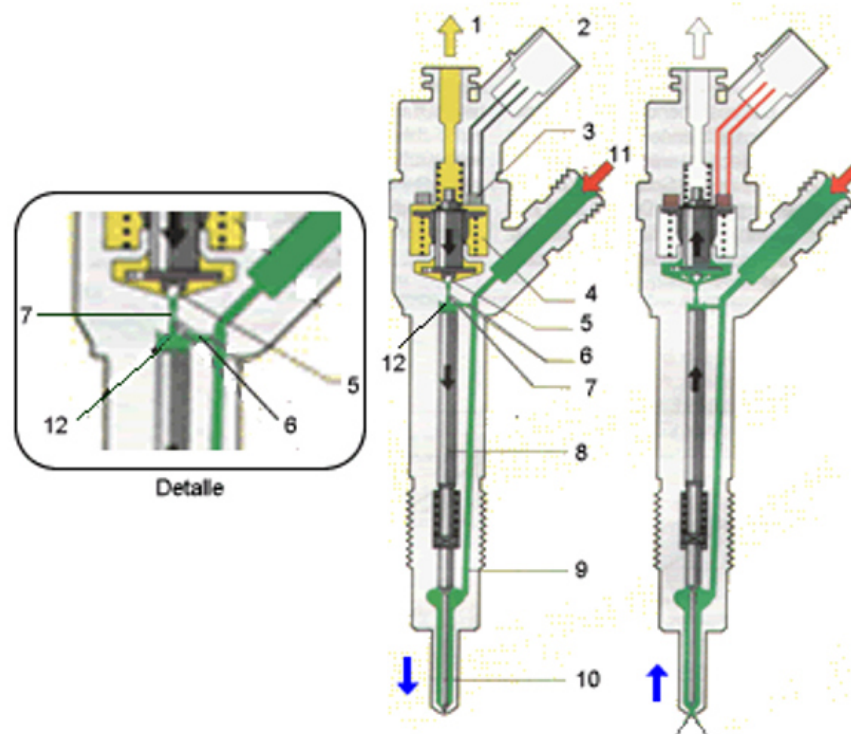


Figura 4.16: Componentes de un inyector diesel tipo solenoide.

Este tipo de inyectores se comenzó a utilizar a partir del año 1998, en una gran cantidad de automóviles producidos en serie de la marca **Fiat**; donde a partir de ello con el transcurso de los años todos los vehículos de motor diesel en el mundo de igual forma fueron utilizándolo.

El inyector Diésel que se utilizó en la instalación hidráulica, es uno de la firma **BOSCH** con un número de serie 0 445 120 002, el cual cuenta con cinco orificios de $110\mu\text{m}$ aproximadamente y se utiliza normalmente en los automóviles de la marca **Citroën, Fiat, Iveco, Peugeot, Renault**, en la **Figura 4.17** se puede observar un esquema de un inyector con todos y cada uno de sus componentes.

En la **Figura 4.18** se muestra el principio de funcionamiento de un inyector diesel, el cual se describe a continuación. Los inyectores diesel cuentan normalmente con dos cámaras (2 y 3), donde el combustible proveniente del circuito de alta presión; ingresa por el acceso (1) y toma los caminos de ambas cámaras. Por ello como ambas presiones son



1.- Retorno de combustible a depósito	2.- Conexión eléctrica
3.- Electroválvula	4.- Muelle
5.- Bola de válvula	6.- Estrangulador de entrada
7.- Estrangulador de salida	8.- Embolo de control de válvula
9.- Canal de afluencia	10.- Aguja del inyector
11.- Entrada de combustible a presión	12.- Cámara de control

Figura 4.17: Esquema de un inyector diesel.

similares en el vástago que obstruye la tobera, existe igualmente una presión en el resorte (4) y para lograr que el inyector abra debe existir una caída de presión mayor en la cámara superior (3).

Donde la caída de presión se consigue accionando un solenoide que retrae el resorte observado en (3) y así es como la esfera permite el paso del combustible que se encuentra en la cámara superior hacia el retorno (depósito) y con esto la alta presión queda enfrentada a la presión que ejerce el resorte (4) para vencerlo y desplazar la tobera que permite el paso del combustible al interior (2) de la cámara de combustión.

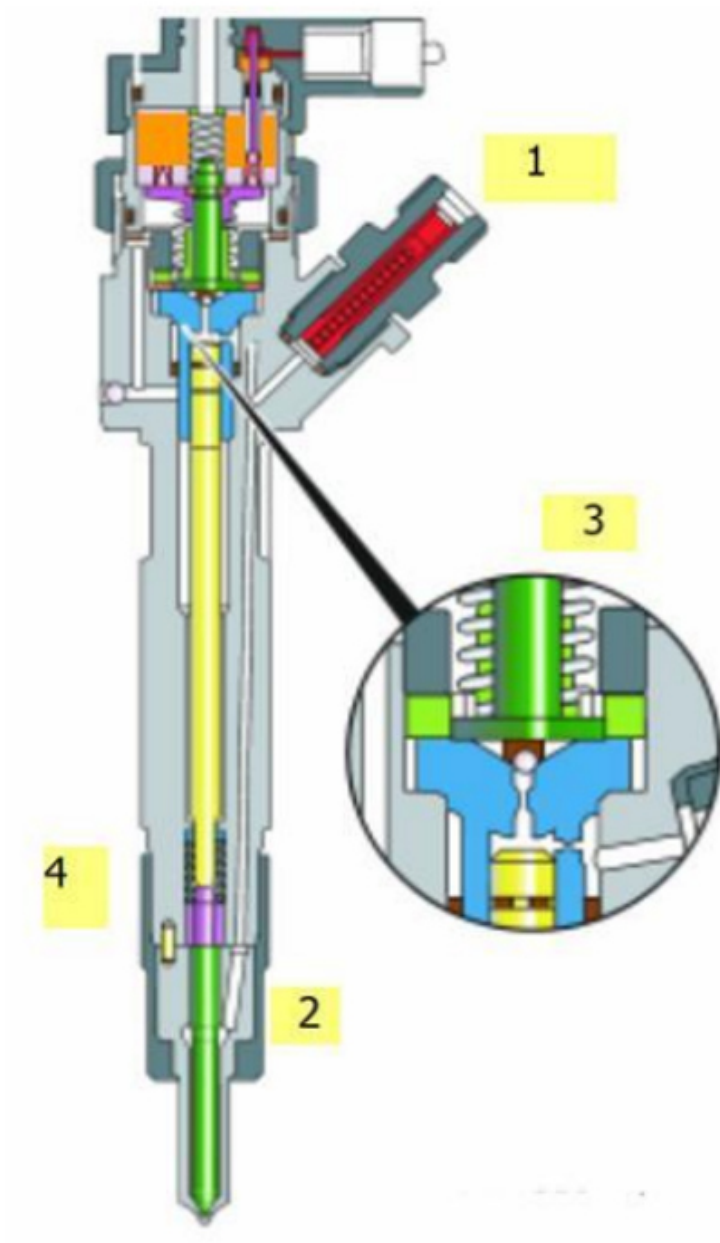


Figura 4.18: Funcionamiento del inyector diesel.

Common rail system tester

El sistema de pruebas common rail ha aumentado recientemente su popularidad para los motores diesel, ya que es capaz de simular las salidas de control de la ECU [8], además de mejorar la presión generada en una bomba de alta presión y de controlar el funciona-

miento del inyector; todo esto de forma manual [9, 10]. Además, la capacidad de control del inyector se ha vuelto independiente de la bomba de alta presión, aumentando así su grado de flexibilidad y permitiendo un más preciso control de los siguientes parámetros:

- P_{rail} - presión de inyección [bar] es la presión generada por la bomba de alta presión, enviada hacia el common rail.
- W - pulso eléctrico [μs] es el tiempo que el inyector permanece abierto.
- N - frecuencia de inyección [$\frac{inj}{min}$] es el número de inyecciones que hay por minuto.

Además, de permitir un decremento en las emisiones de los NOx, partículas de hollín, ruido de la combustión y retardo de la inyección, se es capaz de manipular la duración del pulso eléctrico y frecuencia con que se inyectara; destacando que el equipo debido a una limitación física no es capaz de trabajar bajo inyecciones de manera simultanea (inyección múltiple), para finalizar en la **Figura 4.19** se ilustra el common rail system tester utilizado para la experimentación.

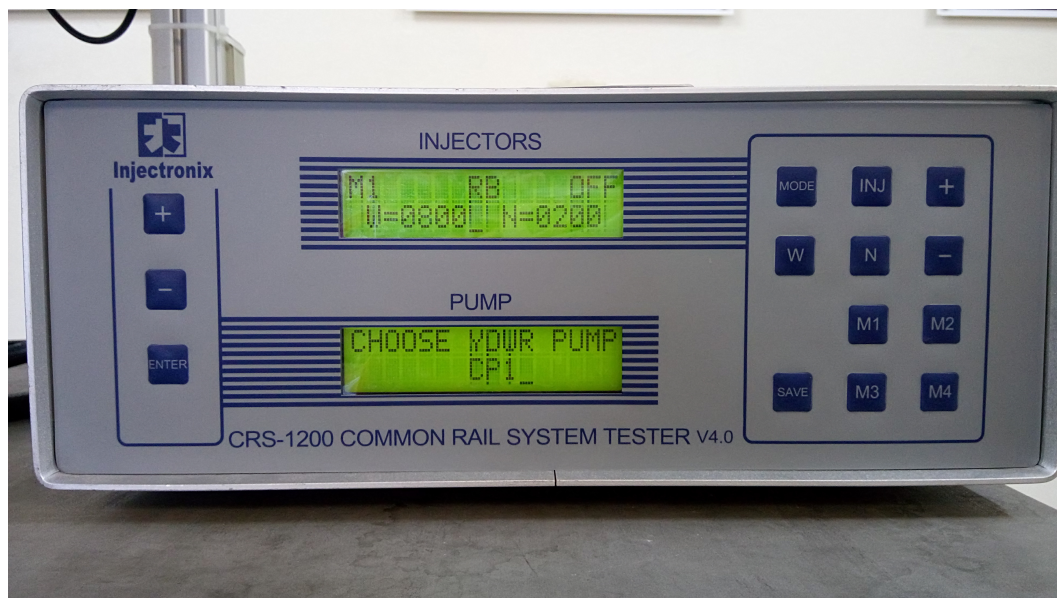


Figura 4.19: CRS-1200 Common Rail Tester System.

4.2.3. Sensores de medición

La maqueta de visualización a volumen constante además de toda la instalación hidráulica necesaria para efectuar el ciclo de inyección en ella, es de suma importancia el poder medir tanto la presión dentro de ella como la temperatura. En la **Tabla 4.8** se describen los aparatos de medición que instrumentaron dicha maqueta.

Tabla 4.8: Instrumentos de medición.

Transductor de presión
Termopar
Conexión de cuatro vías
Manómetro
Válvula de aguja
Válvula de alivio

Transductor de presión

A veces también llamado **transmisor de presión**, es un transductor que convierte la presión en una señal eléctrica analógica. Estos por lo general se encuentran con tres tipos de salida eléctrica:

- Mili voltios
- Voltaje amplificado
- **4-20 mA**

En la **Figura 4.20** se observa el tipo de transductor de presión que se utilizará en la maqueta de visualización a volumen constante. En la **Tabla 4.9** se describen las especificaciones técnicas de dicho sensor.



Figura 4.20: Sensor de la firma WINTERS.

Tabla 4.9: Especificaciones técnicas del transductor de presión.

Código	PT 3000
Rango	0-3,000 psi
Marca	Winters
Señal de salida eléctrica	4-20 mA
Voltaje de alimentación	8-36 VDC

Termopar

Este tipo de sensores son los más empleados para medir la temperatura ya que éstos tienen una amplia variedad de aplicaciones, son relativamente económicos, vienen en una variedad de sondas y son además de mucha exactitud. Éstos consisten en dos distintos metales unidos por un extremo; donde al calentarse o enfriarse su unión produce un voltaje el cual se puede correlacionar con la temperatura.

El termopar utilizado en la maqueta de visualización a volumen constante se ilustra en la **Figura 4.21**, el cual es del tipo K, cuenta con dos puntas, una de una aleación de cromel (*Ni-Cr*) y la otra de alumel (*Ni-Al*), tiene un rango de temperatura entre $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ y $1,372\text{ }^{\circ}\text{C}$, y poseen una excelente resistencia a la oxidación.



Figura 4.21: Termopar tipo K.

Este se colocó en el acceso de la inyección de combustible y suministro de Nitrógeno (N_2) a la maqueta de visualización a volumen constante con el objetivo de conocer la temperatura del gas dentro de ésta.

Conexión de cuatro vías

Como medida de seguridad se le hizo un maquinado a la maqueta de visualización a volumen constante para la salida del gas dentro de ésta, el cual circula hacia una conexión de cuatro vías de acceso, como la que se observa en la **Figura 4.22**.

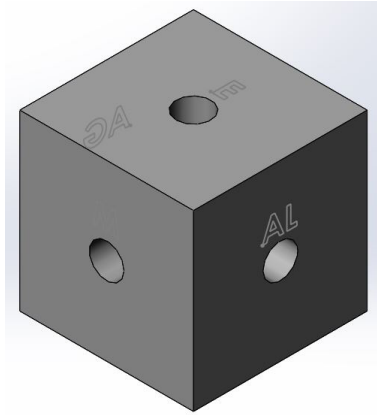


Figura 4.22: Bloque de acero con conexión de 4 vías.

Esta tiene un acceso superior que es la salida de la maqueta, en el frontal se posiciona un manómetro, mientras que en los laterales lleva una válvula de aguja y otra de alivio, mas detalles sobre ésta se describen en la **Figura 4.23**.

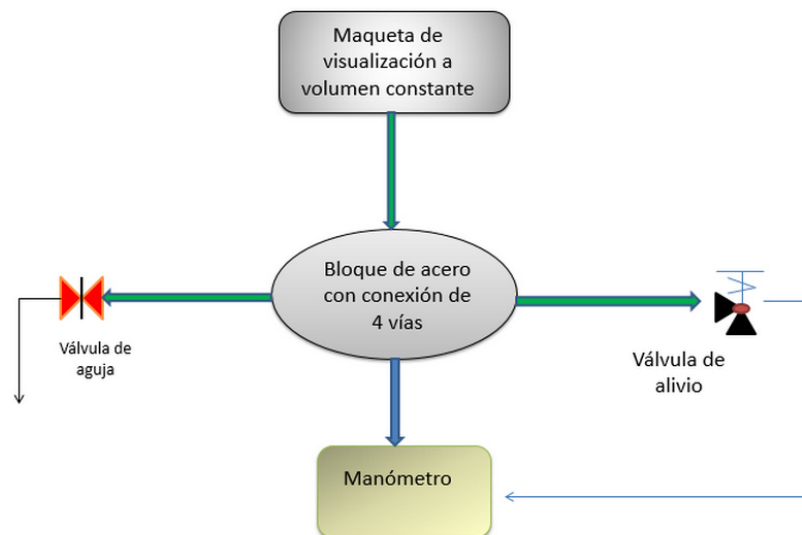


Figura 4.23: Esquema hidráulico de la conexión de cuatro vías.

Manómetro

En la parte frontal se le colocó un manómetro con glicerina como el mostrado en la **Figura 4.24** el cual trabaja en un rango de presión entre 0 y 70 bar (*0 a 1,000 psi*), con el fin de medir la contra-presión de nitrógeno (N_2) en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante.

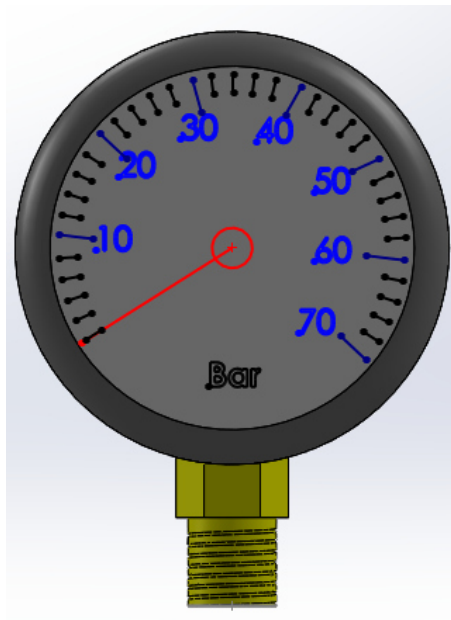


Figura 4.24: Manómetro con glicerina.

Válvula de aguja

Para efectuar tanto el drenado como el direccionamiento de flujo del gas se tiene una válvula de aguja de tipo roscado cónico de acuerdo con la norma básica para roscas de tubos (*americana*) *ANSI B2.1*, la cuál tiene 1/4" de diámetro, ésta puede operar hasta una presión máxima de aproximadamente 6,000 psi (*414 bar*) y una temperatura de servicio que llega hasta las 300 °C (*572 °F*).

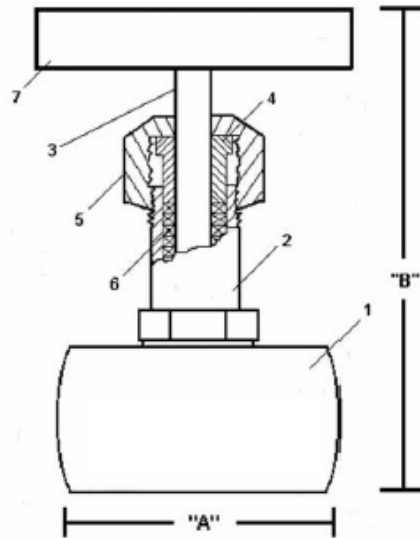


Figura 4.25: Válvula de aguja.

En la **Figura 4.25** se muestra un esquema de la válvula la cual tiene un A de 2 pulgadas y 1/4 y una B de 3 pulgadas y 5/8, adicionalmente en la **Tabla 4.10** se muestra la descripción de todos los materiales que la conforman de acuerdo a la norma del grado de maquinaria del acero *AISI 1018*.

Tabla 4.10: Descripción de materiales que conforman la válvula de aguja.

Parte	Descripción	Material
1	Cuerpo	Acero al carbón
2	Bonete	Acero al carbón
3	Flecha	Acero inoxidable
4	Prensa estopa	Acero al carbón
5	Tuerca opresora	Acero al carbón
6	Estopero	Grafito con fibra de vidrio
7	Manivela	Acero al carbón

Válvula de seguridad

En la **Figura 4.26** se muestra la válvula de alivio, ésta opera con un resorte, el cual se opone constantemente a la presión ejercida en el vástago, misma que continua comprimiendo el resorte hasta llegar a equilibrar la fuerza de presión que actúa en contra del vástago. Así cuando la presión de entrada supera a la de ajuste, se abrirá la válvula de retención para aliviar el exceso de presión.



Figura 4.26: Válvula de alivio.

La válvula cuenta con un tornillo de seguridad, el cuál se utiliza para calibrar la presión a la que desee abrir el exceso de presión, donde originalmente se encontraba calibrada hasta un valor aproximado de 35 bar; pero para la experimentación se requirió el calibrar dicha válvula hasta los 50 bar, donde en el anexo 4.B se explican todos los detalles de cuál

fue el procedimiento desarrollado para la correcta calibración de la válvula de alivio. En la **Tabla 4.11** se describen por un tanto las condiciones de operación, como los materiales empleados para la fabricación de ésta.

Tabla 4.11: Especificaciones técnicas de la válvula de alivio.

Condición	Rango
Presión máxima	5,000 psi
Temperatura de servicio	400 °F
Presión de operación	500 a 3,500 psi
Pieza	Material
Tuerca de bloqueo	Acero
Cuerpo de la válvula	Acero inoxidable
Tornillo de ajuste	Acero

4.3. Técnica óptica-Iluminación directa por dispersión MIE

Para lograr determinar la longitud líquida de evaporación del chorro, la cual es un parámetro característico del proceso de mezcla, en un motor Diésel, se utilizó la técnica óptica iluminación directa por dispersión MIE.

La cual consiste en la obtención de imágenes de un chorro diesel al ser iluminado de manera directa por un haz de luz, obtenido éste de una fuente de luz continua [11]. En la **Figura 4.27**, se muestra el montaje óptico para aplicar dicha técnica óptica, a partir de la cuál se puede ver que esta compuesto una cámara de alta velocidad y un sistema de iluminación.

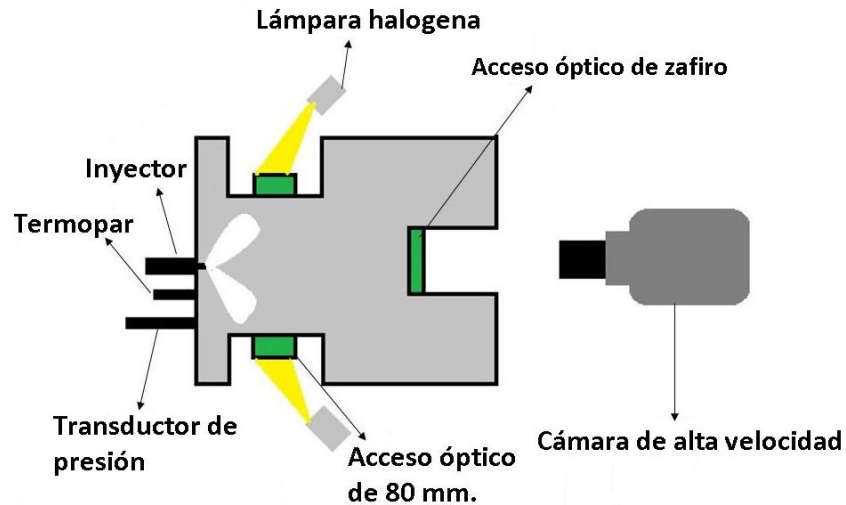


Figura 4.27: Técnica óptica-Iluminación directa por dispersión MIE.

4.3.1. Cámara de alta velocidad

Para lograr capturar las imágenes del evento de inyección en la maqueta de visualización a volumen constante, se empleó una cámara digital de alta velocidad [12]. En la **Tabla 4.12** se observan las características técnicas de la cámara.

Tabla 4.12: Características técnicas de la cámara digital de alta velocidad.

Modelo de la cámara	Motion PRO X4
Imágenes por segundo	5,130
Tipo de sensor	CMOS
Rango dinámico máximo	8 bit

Como información adicional a la presentada en la **Tabla 4.12**, cabe señalar que se ha utilizado un objetivo modelo *Nikon 60mm* como el que se ilustra en la **Figura 4.28**. En la **Tabla 4.13** se describen las condiciones de operación de la cámara.

La resolución de las imágenes que se utilizaron para los ensayos fueron de 512 x 512 pixels respectivamente. Por otro lado antes de la realización de los ensayos se tomo una

Tabla 4.13: Parámetros de operación de la cámara digital de alta velocidad.

Sensor Gain	No Gain
Rate	5,000 Hz.
Exposure	100 μs
Frames	5,000 fps

imagen de referencia en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante. Donde a partir de esta imagen se calcula la resolución espacial, parámetro necesario para obtener las medidas reales de los parámetros macroscópicos del chorro. Este valor esta en torno a 4.28 pixel/mm, describiendo en el anexo 4.C los detalles de como se determino esta relación espacial.

**Figura 4.28:** Lente de enfoque.

4.3.2. Iluminación

Como fuente de iluminación se utilizó una lámpara halogena lateral colocada a 6 cm de distancia del acceso óptico de zafiro inclinada aproximadamente 38° para iluminar adecuadamente el fondo y los chorros del combustible. La lámpara utilizada es de corriente directa, contando con una potencia de 100 W y un voltaje de 12 V, por tanto esta se conecta a una fuente de poder la cuál tiene una corriente máxima de 10 A.

Una vez presentada la maqueta de visualización a volumen constante así como la técnica óptica, es necesario conocer el procedimiento de operación de dichos equipos experimentales, éste ha sido descrito en el Anexo 4.D que lleva por nombre "*manual de operación de la maqueta de visualización a volumen constante*".

4.4. Procesamiento de imágenes

Una vez que se han obtenido las imágenes, como las que se observan en la **Figura 4.29** en las que se aprecia la evolución de la inyección con respecto al tiempo, estas deben de ser procesadas para poder obtener la información necesaria para estudiar los parámetros macroscópicos del chorro.

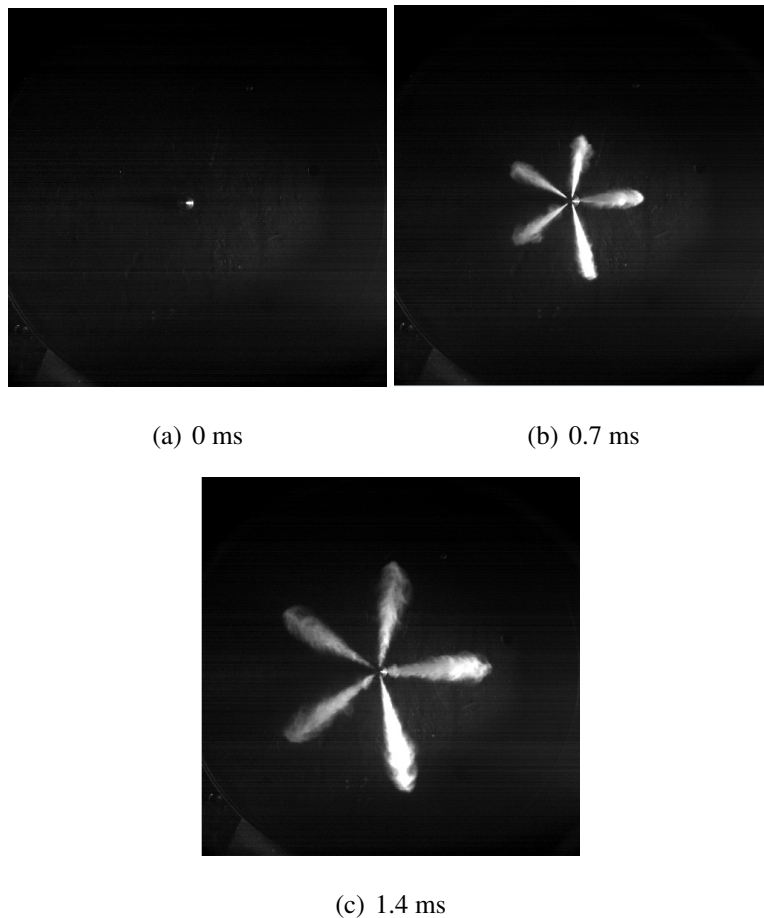


Figura 4.29: Imágenes obtenidas por medio de la técnica óptica utilizada.

Para esto se utilizó el software matemático MATLAB, el cuál tiene una gran capacidad para el procesado de imágenes. Las imágenes que se observan en la **Figura 4.29** son unos resultados obtenidos en la maqueta de visualización a volumen constante con anterioridad. Así que para obtener la información del chorro netamente, se tiene que aislar el mismo de la imagen y es necesario tener una foto de fondo antes de realizar la inyección haciendo una resta de imágenes y el resultado se muestra en la **Figura 4.30**.

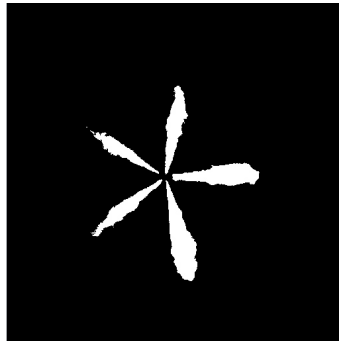


Figura 4.30: Imagen binarizada.

Cuando se obtiene la resta de imágenes, el siguiente paso es en obtener trozos de imagen para cada chorro; lo cuál de igual forma se determino con el código introducido en MATLAB para poder determinar el contorno del chorro [13], por tanto el resultado ilustrado en la **Figura 4.31** es el contorno del chorro y de este se pueden obtener:

- El ángulo del chorro
- La penetración del chorro
- El área del chorro



Figura 4.31: Contorno de chorro binarizado.

4.A. Anexo: Determinación del par de apriete óptimo de los accesos ópticos sin dañarles

4.A.1. Introducción

En el presente anexo se proporcionan los detalles, sobre la metodología que se ha seguido para la determinar el par de apriete óptimo de los accesos ópticos, el plan de trabajo que se desarrollo y los resultados que se obtuvieron.

A continuación de una manera breve se mencionan los apartados que componen el presente anexo: en el apartado 4.A.2 se describe la metodología que se planteó para la determinación del par de apriete óptimo de los accesos ópticos. En el apartado 4.A.3 se describe el plan de trabajo desarrollado para la determinación del óptimo par de apriete. Y finalmente en el apartado 4.A.4 se sintetizan los resultados obtenidos y la conclusión alcanzada.

4.A.2. Metodología planteada para la determinación del par de apriete óptimo

Consistió en ir variando poco a poco el τ en un rango a partir de los 8 N·m hasta encontrar el par de apriete óptimo, mientras en paralelo se vario la P_{back} de la maqueta de visualización a volumen constante entre un rango de los 20 a los 40 bar aproximadamente, las cuales son las condiciones de operación del presente estudio.

4.A.3. Plan de trabajo desarrollado para la determinación del par de apriete óptimo

Consistió en realizar la cantidad de ensayos necesarios hasta que se lograra determinar el par de apriete óptimo de los accesos ópticos sin dañarlos mientras se iba variando la P_{back} en la maqueta de visualización a volumen constante para comprobar que esta no presentará fugas.

Primero para poder aplicar el τ , se requiere contar con la herramienta correcta la cual se ilustra en la **Figura 4.32** un torquimetro de caratula de 3/8'', con el cual se le pueden aplicar rangos de torque relativamente bajos empezando desde 1 hasta los 150 N·m aproximadamente.



Figura 4.32: Torquimetro de caratula de 3/8''.

Para los ensayos del primero al sexto respectivamente, se utilizó la herramienta ilustrada anteriormente ya que el τ aplicado fue a partir de los 8 N·m hasta los 18 N·m como máximo.

Por último para los dos ensayos restantes, como el τ que se le aplicó sería aproximadamente de 20 N·m utilizó un torquimetro de trueno de 3/8'' ilustrado en la **Figura 4.33**, el cual tiene un rango de operación entre 20 y 110 N·m.



Figura 4.33: Torquimetro de trueno de 3/8''.

4.A.4. Análisis de la determinación del par de apriete óptimo y conclusión

Se analizaron un total de ocho ensayos hasta lograr determinar el par de apriete óptimo de los accesos ópticos tratando de cumplir las condiciones de operación de la P_{back} de la maqueta de visualización a volumen constante apoyándose con un programa de LabVIEW para saber la P_{back} que se tiene a la hora de comenzar la experimentación del presente estudio de tesis.

- Para los ensayos del uno al cuarto respectivamente se presentó una fuga en el acceso óptico frontal; debido a que el par de apriete no era el óptimo, alcanzando en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante como máximo hasta 34.12 bar.
- En el quinto ensayo se aplicó un τ de 18 N·m en los accesos ópticos pero solamente se llegó a una P_{back} de 34.27 bar porque se presentó una fuga ahora en el acceso óptico lateral, entonces se retiró el acceso óptico y se observó que se había movido el empaque por lo que se volvió a colocar en su sitio y aplicar el mismo par de apriete al acceso óptico pero nuevamente el empaque no llegó a ajustarse correctamente en el acceso óptico y se presentó una fuga al alcanzar los 22.94 bar.
- Ya para el séptimo ensayo se utilizó el torquimetro ilustrado en la **Figura 4.32** para aplicarle a los accesos ópticos de zafiro un τ de 20 N·m evitándoles un daño y que

estos fugaran nuevamente, pero solamente se llego a una P_{back} de 23.47 bar por una fuga de gas nitrógeno justo en el punto donde va instalado el inyector en la rosca trasera de la maqueta de visualización a volumen constante ya que no estaba acoplado correctamente.

- Así entonces para el octavo y último ensayo no se modifico el par de apriete en los accesos ópticos ya que no presentaron una sola fuga, puesto que solo se retiro cuidadosamente el inyector y se le aplicó un τ de un rango de 7 a 10 N·m para no afectarle su comportamiento hidráulico volvió a colocar en su sitio, para comenzar la presurización y logrando alcanzar hasta los 43.6 bar de contrapresión en la maqueta de visualización a volumen constante.

En la **Tabla 4.14** se ilustran los resultados obtenidos durante cada uno de los ensayos, mientras en la **Figura 4.34**, se representa el tiempo estimado que tardo cada ensayo en alcanzar el máximo valor de contrapresión.

Tabla 4.14: Resultados obtenidos sobre el torque aplicado y la P_{back} alcanzada.

Número de experimento	τ (N·m)	P_{back} (bar.)
1	8	13.86
2	10	13.99
3	12	21.44
4	15	34.12
5	18	34.27
6	18	22.94
7	20	23.47
8	20	43.6

Con esto se llego a la conclusión que el par de apriete óptimo para no dañar los accesos ópticos de zafiro debe ser de 20 N·m.

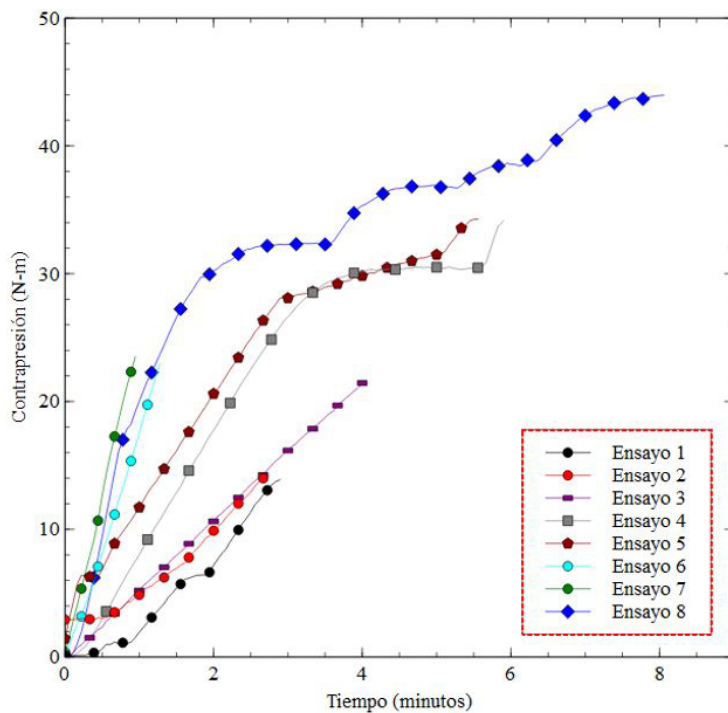


Figura 4.34: Valores de contrapresión alcanzados a determinados tiempos, con los distintos torques aplicados para cada ensayo.

4.B. Anexo: Metodología empleada para la calibración de la válvula de seguridad

En el presente anexo, se proporcionan los detalles del procedimiento que se siguió para la calibración de la válvula de alivio y los resultados obtenidos.

A continuación a modo de resumen se mencionan los apartados de los que esta compuesto el presente anexo: en el apartado 4.B.1 se realiza una breve descripción del método que se ha utilizado para lograr calibrar la válvula de alivio. Mientras que en el apartado 4.B.2 se analizan las presiones que se alcanzaron en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante conseguidas. Y finalmente en el apartado 4.B.3 se describen las

conclusiones alcanzadas.

4.B.1. Calibración de la válvula

En la **Figura 4.26** se observa la válvula de alivio la cual cuenta con un tornillo de ajuste con el que se es capaz de aumentar o disminuir la presión de apertura de la válvula al girarlo tanto a la derecha como a la izquierda. Con 1/4 de vuelta del tornillo se calibra la presión de apertura de la válvula se calibra aproximadamente 7.5 bar. La cuál en un principio se encontraba calibrada a una presión de apertura de 35 bar, pero de acuerdo a las condiciones de operación de inyección que se manejaron para los estudios fue necesario el calibrar la válvula de alivio a una presión de apertura de 49.42 bar.

Donde se optó por aplicarle 1/2 vuelta en el sentido de las manecillas del reloj para calibrar la válvula, para que está abriera al llegar a los 50 bar en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante.

4.B.2. Análisis de la calibración de la válvula de alivio durante la experimentación

Para comprobar que la calibración de la válvula de alivio se desarrollo correctamente, se utilizó además del manómetro, un programa diseñado en LabVIEW al cual se le enviaba la señal de un transductor de presión, el cual se encuentra conectado en la maqueta de visualización a volumen constante.

Donde se desarrollaron cuatro diferentes ensayos, en los los primeros dos no se aplico un giro al tornillo de seguridad de la válvula, para el tercero se le dio 1/4 de vuelta a la derecha y para el cuarto se giro el tornillo 1/2 vuelta al sentido de las manecillas del reloj. En la **Tabla 4.15** se muestran los resultados de las lecturas de presión tanto del transductor de presión como del manómetro que va conectado en la maqueta de visualización a volumen

constante.

Tabla 4.15: Lectura del manómetro versus el transductor de presión.

Presión Manómetro (bar)	Presión Transductor (bar)
31	31.63
35	36.85
43	43.99
50	49.42

Luego de observar en la **Figura 4.35** los rangos de presión alcanzados en un tiempo estimado para cada uno de los ensayos mediante el desarrollo de esta metodología para la calibración de la válvula de alivio se concluyo:

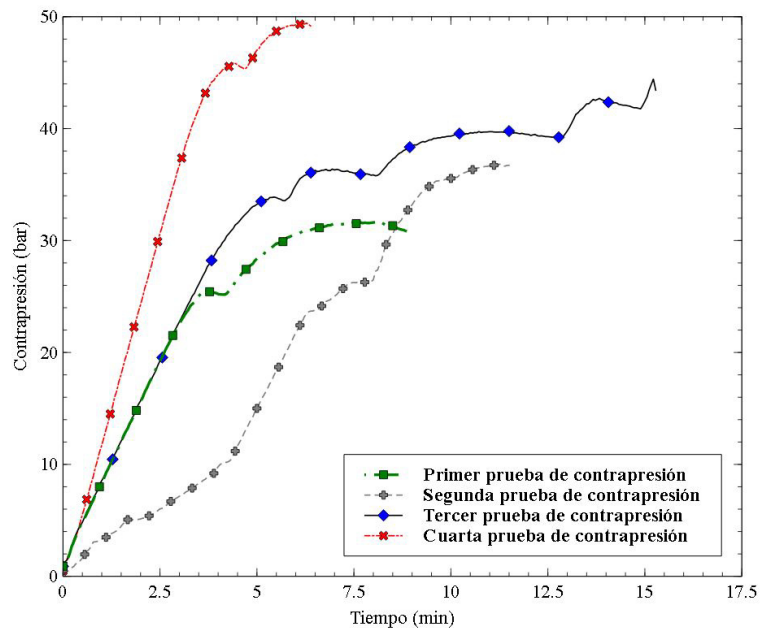


Figura 4.35: Contrapresiones alcanzadas en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante.

4.B.3. Conclusión

- El programa diseñado en el LabVIEW es muy confiable y riguroso para la lectura de la P_{back} en la maqueta de visualización a volumen constante que nos da el transductor de presión.
- Al aplicar un giro de vuelta a la derecha al tornillo de seguridad la presión de apertura de la válvula de alivio se incrementa. Mientras que un giro al sentido contrario la tiende a disminuir su presión de apertura.
- Por cada 1/4 de vuelta del tornillo a favor o en contra de las manecillas de reloj el rango de presión tiende a modificarse aproximadamente 7.5 bar. Fue por ello que solamente fue necesario el aplicarle 1/2 vuelta al tornillo en el sentido de las manecillas del reloj desde su posición original.

4.C. Anexo: Determinación de la relación pixel/mm.

En el presente anexo se dan los detalles, del procedimiento que se siguió para determinar la relación pixel/mm y por otro lado, de cual es la finalidad de obtener dicha relación.

Al adquirir las imágenes del evento de inyección por default la medida se da en pixeles, por tal motivo es necesario la cantidad de pixeles que hay en un milímetro. Donde a continuación se describe el metodo que se seguirá para determinar la relación pixel/mm:

- Primeramente la posición de la cámara debe ser similar a la de los ensayos realizados, ya que si está llega a desenfocarse no será de utilidad dicha relación espacial.
- Después se colocó una cuadrícula de dimensiones medidas en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante centrada con la punta del inyector y cuidando no obstruirla.

- Seguidamente es necesario abrir el objetivo de la cámara digital hasta un punto en el que se pueda observar claramente la punta del inyector con la hoja de cuadrícula, tal y como se ilustra en la **Figura 4.36**, para tomar una serie de imágenes.
- Y por último se toman las coordenadas de referencia de ambos puntos de la hoja de cuadrícula que arroja el software de la cámara ($X1, X2, Y1, Y2$), observando que éstos se encuentran en el mismo plano horizontal, al no cumplirse esta condición se aplica el Teorema de Pitágoras para obtener la distancia correcta en pixeles, una vez obtenido este valor se cuentan las cuadrículas entre un punto y el otro para obtener distancia en milímetros y así obtener la relación pixel/mm; dando esto un valor en torno a los 4.28 pixel/mm.

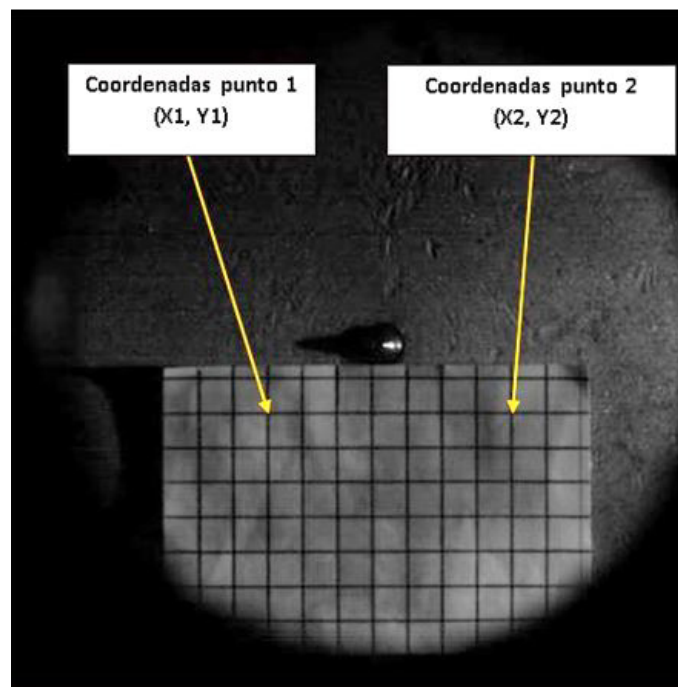


Figura 4.36: Coordenadas de la relación pixel/mm.

La finalidad de determinar la relación pixel/mm, se desarrollo para poder introducir la calibración adecuada en el código matemático de MATLAB y con ello conocer las medidas reales de los parámetros macroscópicos del chorro.

4.D. Anexo: Manual de operación de la maqueta de visualización a volumen constante

La información de este manual muestra las instrucciones paso por paso que se deben seguir a detalle para utilizar correctamente el sistema de inyección en la maqueta de visualización a volumen constante en sus condiciones actuales. Se recomienda al lector que opere este equipo; el no ignorar ni uno solo de los puntos y sugerencias para darle el correcto uso a la instalación experimental, donde para ello se incluyen imágenes para indicar claramente donde se localizan los interruptores, válvulas, tornillos, equipo y herramientas que deben de usarse.

Principalmente se mencionaran ciertas precauciones que se deben tomar si se va a operar el sistema de inyección, continuando con los procedimientos tanto para el encendido como el apagado del sistema de inyección, después como efectuar la presurización y despresurización de la maqueta de visualización a volumen constante y por último se explica cómo se desarrolla tanto el montaje como el desmontaje de la cámara digital de alta velocidad.

4.D.1. Precauciones

- Prohibido el operar las instalaciones sin la supervisión de algún profesor o experto del área.
- Leer detalladamente el manual de operación antes de encender las instalaciones.
- Por seguridad mantenerse en todo momento detrás de la línea amarilla, si no se está capacitado para operar los equipos.
- Antes de operar la instalación revisar que todas las válvulas se encuentren totalmente cerradas, que no haya ninguna manguera con una ruptura y sobre todo verificar que ningún tornillo este flojo o alguna pieza suelta.

4.D.2. Uso del sistema de inyección

Para hacer un correcto uso del sistema de inyección, es necesario conocer bien los componentes del sistema en general y cuál es la forma correcta tanto para encender como apagar la instalación evitándose el riesgo de que ocurra una falla con algún componente o la instalación en general.

Procedimiento para el arranque de la instalación

A continuación se explicaran todos los pasos requeridos para operar adecuadamente la instalación experimental, en donde se observaran imágenes ilustrativas para hacer de esto un procedimiento más práctico y simple.

1) En la **Figura 4.37**, se ilustra el depósito de combustible, primero se revisa el nivel del depósito de combustible, se recomienda siempre tenerlo lleno tal y como se observa en el medidor; para que conozcamos el rango de temperatura medido de forma analógica con un termómetro y de forma electrónica utilizando un termopar; pero sobre todo evitar un calentamiento considerado del combustible.



Figura 4.37: Depósito de combustible

2) En la **Figura 4.38**, se muestra el baño térmico, comprobando que este cuenta con la cantidad adecuada de refrigerante para luego encenderlo desde la parte trasera, se espera a que este se configure y en la pantalla aparezca "La Reserva" para luego pulsar el botón de encendido y una vez hecho esto se presiona la perilla y se gira para establecer la temperatura deseada.



Figura 4.38: Baño térmico.

3) En la **Figura 4.39**, se ilustra el acumulador de succión al que le llega el combustible directo del depósito y que además cuenta con una válvula de llave para purgar el sistema de inyección.

4) En la **Figura 4.40**, se muestra el cable de alimentación de cuatro clavijas del motor eléctrico que va conectado al contacto de 220V aplicándole un pequeño giro a la derecha,



Figura 4.39: Sistema de purga.

como un sistema de seguridad evitando que este sea desconectado.



Figura 4.40: Cable de alimentación del motor eléctrico.

5) En la **Figura 4.41**, se muestra el sistema de alimentación del motor eléctrico el cuál consta de una pastilla de alimentación que debe accionarse y posteriormente se acciona el

interruptor de emergencia lo que energiza al variador de frecuencia.



(a) Pastilla de alimentación

(b) Interruptor de emergencia

Figura 4.41: Sistema de alimentación del motor eléctrico.

6) En la **Figura 4.42**, se ilustra el sistema de pruebas common rail *CRS-1200*, que debe encenderse desde la parte posterior para empezar la configuración con los parámetros con que se vaya a trabajar, pulsando *Mode* para seleccionar el tipo de inyector, *W* para cambiar el ancho de pulso, *N* la frecuencia de inyección y *Enter* para seleccionar el tipo de bomba de alta presión (Todo viene explicado en el manual de usuario del CRS-1200).

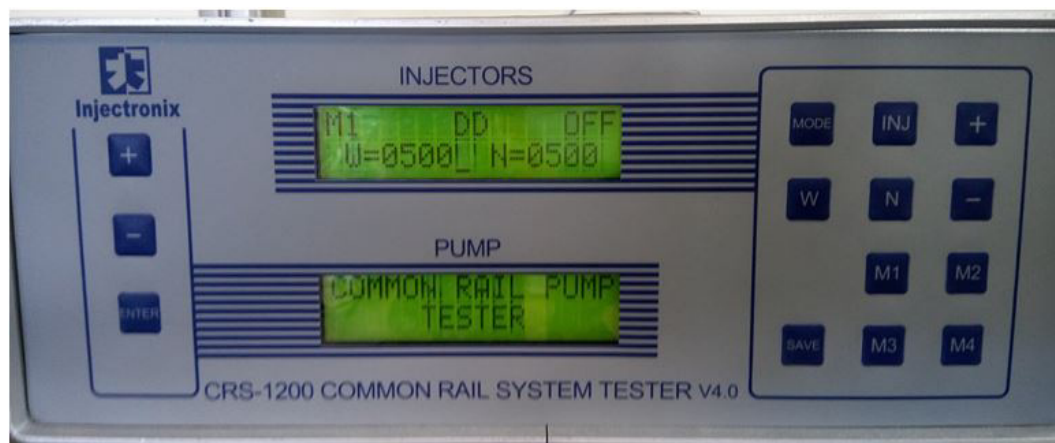


Figura 4.42: Common rail system tester.

7) En la **Figura 4.43**, se ilustra la fuente de alimentación de corriente directa que debe encenderse, para accionar la bomba de baja presión y esta pueda circular combustible a través de todo el circuito.



Figura 4.43: Fuente de alimentación de la bomba de baja presión.

8) En la **Figura 4.44**, se muestra el variador de frecuencia el cuál al presionar el botón verde enciende el motor eléctrico a 5 Hz, porque así esta programado por lo que poco a poco se incrementa la frecuencia hasta como mínimo alcanzar los 27.2 Hz lo cual le aplica un régimen de giro de 800.12 rpm al motor eléctrico y este mismo le llega a la bomba de alta presión *BOSCH CPI* el cual es su régimen de ralentí.

9) En la **Figura 4.45**, se muestran a la izquierda del *CRS-1200* los botones que se deben utilizar para ir aumentando el *LDI* el cual es la carga que se envía a la válvula solenoide para ir abriendo el retorno de la bomba de alta presión y a su vez se incrementa la P_{rail} y una vez desarrollado esto se pulsa el botón *Inj* el cuál comienza el proceso de inyección.

10) Por último ya establecida la presión de inyección, tal y como se ilustra en la **Figura 4.46**, esta llega por medio de una línea de alta presión al common rail, en donde se mantiene constante y al momento de pulsar *Inj* en el *CRS-1200* se le envía el pulso eléctrico al inyector y este comienza la inyección.



Figura 4.44: Encendido del variador de frecuencia.



Figura 4.45: Comandos del common rail system tester.

Presurización de la maqueta de visualización a volumen constante

Cuando ya se tiene totalmente arrancado el sistema y preparado para iniciar la inyección de combustible, antes debe de presurizarse la maqueta de visualización a volumen constante con nitrógeno comprimido ya que el combustible se trabajara en condiciones no evaporativas a elevados niveles de contrapresión.

Para esto se debe seguir el siguiente procedimiento paso a paso tomando todas las precauciones posibles, al final se ilustra la **Figura 4.47** para hacer más sencilla esta explicación:

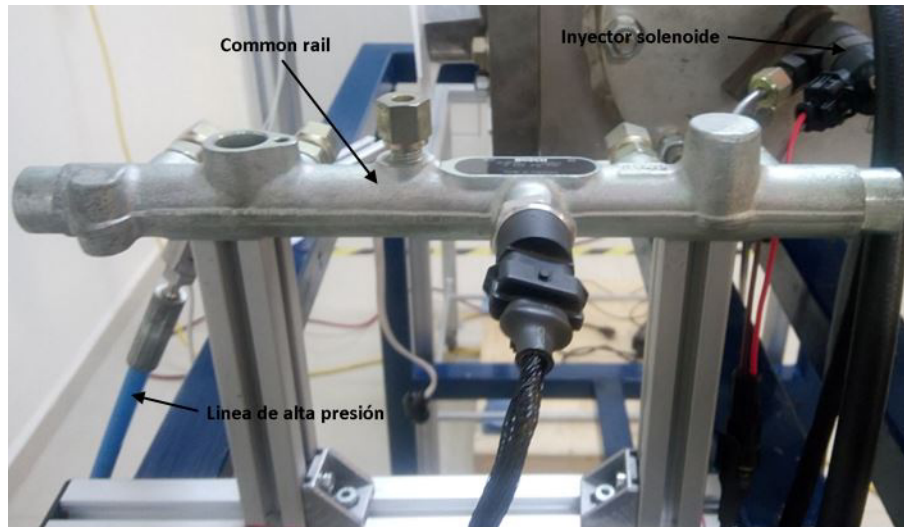


Figura 4.46: Sistema de inyección common rail.

- Primero se deben de tener cerradas todas las perillas.

- Lo siguiente es abrir el tanque de nitrógeno girando la perilla principal poco a poco hacia el lado derecho para conocer la presión máxima de nitrógeno que se tiene en el tanque.

- Ahora la válvula central se gira levemente hacia el sentido opuesto de las manecillas del reloj para ir incrementando la presión del manómetro ubicado en la parte izquierda.

- Por último la válvula más pequeña se gira con extrema precaución hacia el sentido de las manecillas del reloj, lo que permite la liberación del nitrógeno hacia la maqueta de visualización a volumen constante; solamente hasta el rango que se tenga establecido en el segundo manómetro.

Nota: para conocer de manera exacta el nivel contrapresión que hay en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante se desarrolló un programa en LabVIEW al cual le llega la señal mediante un transductor de presión conectado a un CompactDAQ-9174 y además se cuenta con un manómetro ubicado en la parte inferior de la maqueta; la contrapresión nunca será superior a los 50 bar por cuestiones de seguridad y además que a ese rango se tiene calibrada la válvula de seguridad.

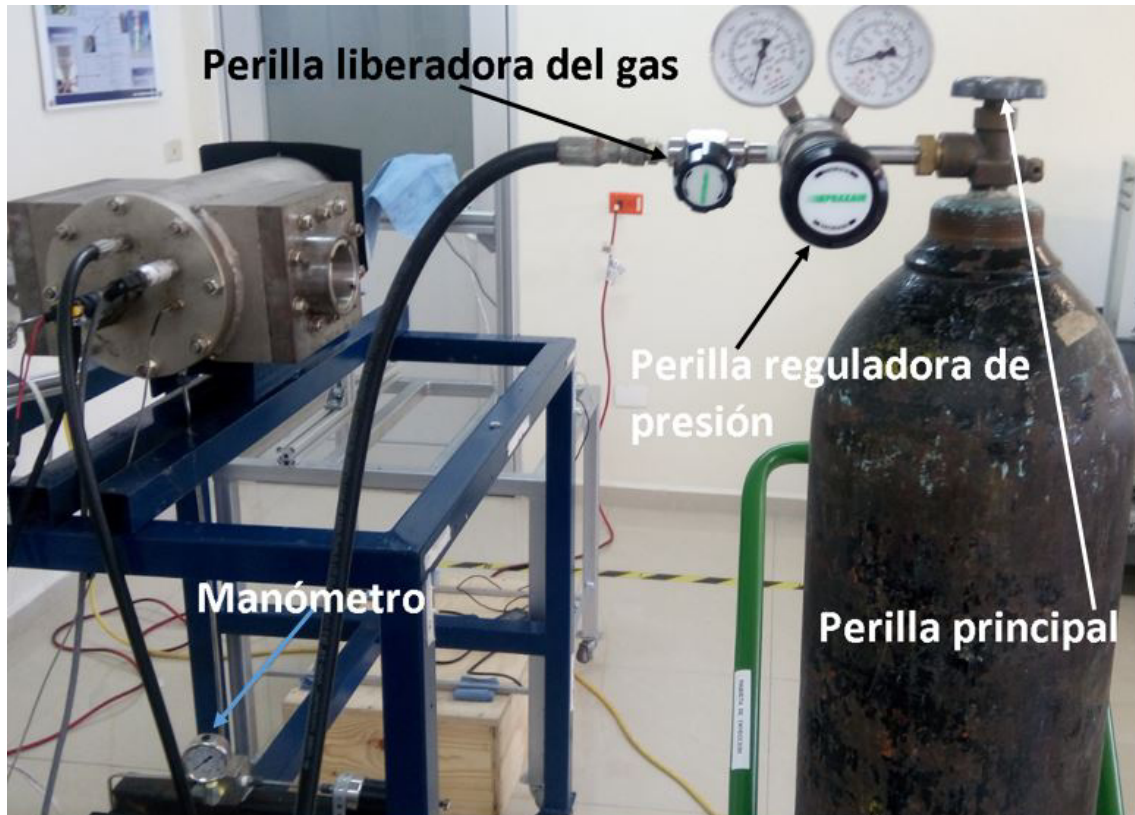


Figura 4.47: Sistema regulador de presión del tanque de nitrógeno.

Procedimiento para el apagado de la instalación

Una vez que se ha hecho el proceso de inyección de combustible en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante, es necesario el apagar todo el sistema para evitarle un daño o desgaste mayor a cualquiera de los componentes y evitar que se sobrecaliente el combustible. Por ello se explica cuidadosamente el procedimiento que se debe de seguir paso a paso y es obligatorio el no saltarse ni un solo paso; ya que al hacerlo se

podría dañar un componente o el sistema en general:

1) Lo primero es dejar de mandarle el pulso eléctrico al inyector, pulsando el botón *Inj* que se observa en el panel de control de *Common Rail System Tester*, donde al observar en la pantalla superior la leyenda *ON* se inyecta combustible y al aparecer *OFF* el inyector no recibe pulso eléctrico; por lo que está totalmente cerrado y no hay inyección de por medio.

2) En la **Figura 4.48**, se muestra el panel de control del common rail system tester, donde con los botones ubicados en la parte izquierda, se debe abrir el retorno de la bomba de alta presión *BOSCH CPI*, reduciendo a cero la carga que se le envía a la válvula solenoide *LD1* lo que al mismo tiempo disminuye la P_{rail} .



Figura 4.48: Tipo de inyector, presión del rail indicados en el panel del common rail tester.

3) En la **Figura 4.49**, se ilustra el botón con símbolo de flecha hacia abajo en el panel de control del variador de frecuencia para ir disminuyendo la frecuencia poco a poco hasta alcanzar los 5 Hz y al hacerlo se pulsara el botón rojo para apagar el variador lo que a su vez detendrá el motor eléctrico y la bomba de alta presión, mostrados en la **Figura 4.50**.

4) El interruptor de emergencia debe girarse a *OFF* para posteriormente bajar la pasti-



Figura 4.49: Apagado del variador de frecuencia.



Figura 4.50: Motor eléctrico y bomba de alta presión.

Illa de alimentación, lo que a su vez apagará completamente el variador de frecuencia.

5) Apagar la fuente de poder, lo que a su vez desactivara la bomba de baja presión y dejara de fluir combustible a través de todo el sistema.

6) Girar ligeramente hacia la izquierda el cable de alimentación de alta tensión del motor eléctrico para desconectarlo.

7) En la **Figura 4.51**, se ilustra el baño térmico que al final se debe de apagar pulsando el botón de color azul que se encuentra a la derecha en la parte inferior y ya después se baja el switch ubicado en la parte trasera.



Figura 4.51: Apagado del baño térmico.

Despresurización de la maqueta de visualización a volumen constante

Una vez que hayan concluido los ensayos de inyección, es necesario liberar la contrapresión de nitrógeno que se encuentra en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante; donde para ello se deben de tomar todas las precauciones posibles y hacerlo de la siguiente manera:

- Primero se deben de cerrar las tres válvulas ilustradas en la **Figura 4.52**, cerrando las de los costados al sentido de las manecillas del reloj, mientras la ubicada en el centro cierra girándola hacia el sentido contrario, cuidando principalmente que la presión de gas nitrógeno marque cero en el manómetro que se encuentra ubicado a la izquierda.



Figura 4.52: Válvulas de operación del tanque de nitrógeno.

- Luego se gira levemente hacia el sentido opuesto de las manecillas del reloj la válvula de aguja ilustrada en la **Figura 4.53**, para que así pueda comenzarse la despresurización con extrema precaución del nitrógeno atrapado en la maqueta de visualización a volumen constante.



Figura 4.53: Válvula de aguja.

- Por último en la **Figura 4.54**, se muestra el manómetro con el que se verifica además del programa desarrollado en LabVIEW, que el nivel de contrapresión vaya disminuyendo hasta que este llegue a estar completamente en cero.



Figura 4.54: Manómetro lector de la contrapresión de la maqueta.

4.D.3. Uso de la cámara digital de alta velocidad

En el siguiente apartado se describirá el procedimiento que se debe seguir para desarrollar el correcto montaje y desmontaje de la cámara digital de alta velocidad.

Montaje de la cámara digital de alta velocidad

A continuación se enumeran los pasos que se siguen para hacer un correcto montaje de la cámara digital de alta velocidad, donde para ello se observaran imágenes ilustrativas para hacer de esto un procedimiento más sencillo y práctico.

1) Lo primero que debe hacerse es montar la cámara sobre la placa base con un tornillo que requiere el uso de una llave allen milimétrica 4 mm para posteriormente montar la placa sobre la estructura BOSCH utilizando una llave allen milimétrica 5 mm, tal y como se ilustra en la **Figura 4.55**.



Figura 4.55: Cámara digital de alta velocidad.

2) Posteriormente se le retira el tapón que mantiene cubierto el sensor de la cámara para a la par montar la lente girándolo hacia el sentido de las manecillas del reloj.

3) En la **Figura 4.56**, se muestra la parte posterior de la cámara digital de alta velocidad donde se colocan en su respectivo lugar el cable de alimentación y el cable de interfaz digital USB, tomando la precaución de que se encuentren alineados los puntos rojos para ambos cables.



Figura 4.56: Parte posterior de la cámara.

4) Por último se enciende la cámara pulsando el botón de encendido y por medio del software MotionPRO X Studio se comprueba que la lectura de la cámara es correcta.

Para saber a detalle el cómo se debe operar y apagar la cámara digital de alta velocidad, revisarse el manual de usuario [12].

Desmontaje de la cámara digital de alta velocidad

En la siguiente sección se enumera la serie de pasos que deben ir siguiéndose para hacer un correcto desmontaje del equipo sin ocasionarle un daño permanente.

1) Lo primero que debe hacerse es cerrar el software de la cámara MotionPRO X Studio, para posteriormente apagar la cámara digital de alta velocidad; al no hacerse esto correctamente puede provocar un fallo grave a la cámara.

2) Continuamente el lente de enfoque ilustrado en la **Figura 4.57**, debe cerrarse totalmente y colocarle su tapa, para posteriormente retirarle los cables de alimentación y de interfaz digital USB.



Figura 4.57: Lente de la cámara.

3) Desmontarle el lente de enfoque girando al sentido opuesto de las manecillas del reloj, para a la par cubrir el sensor de la cámara con su tapa especial.

4) En la **Figura 4.58**, se muestra uno de los tornillos que debe retirarse utilizando una llave allen milimétrica 5 mm para desmontar así la placa de la estructura BOSCH y posteriormente se desatornilla la cámara digital de alta velocidad de la placa base con apoyo de una llave allen milimétrica 4 mm.

Nota: antes de desmontar la placa base, se debe marcar como referencia el sitio donde esta iba colocada, para así facilitar la posición en donde la cámara esta perfectamente enfocada.

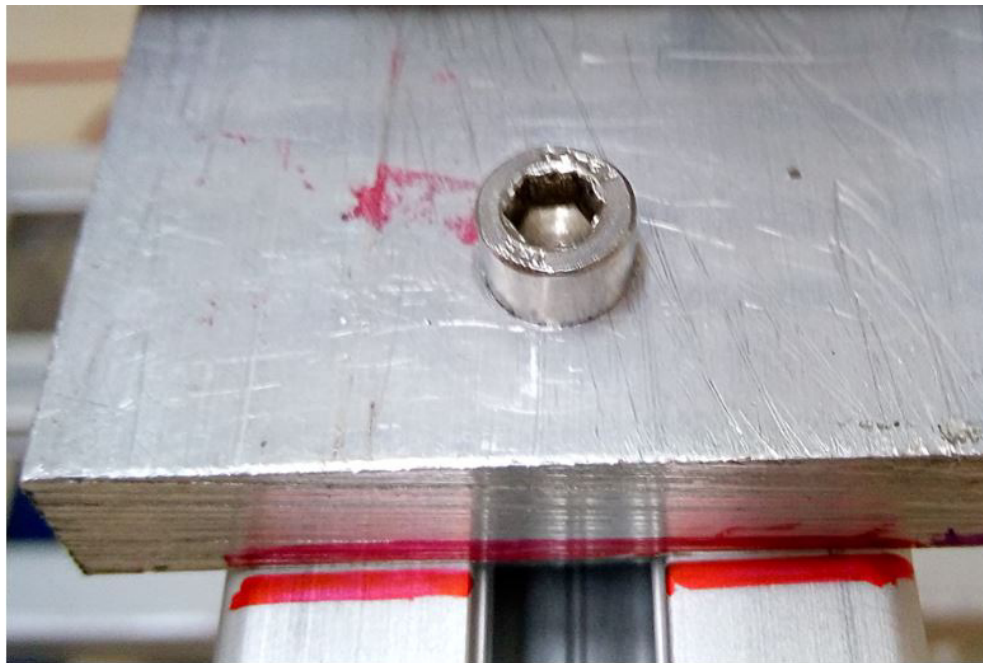


Figura 4.58: Placa base.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Carlos Alberto Ruiz Colunga**, *Puesta a punto de instalación experimental para caracterizar chorros de combustible en condiciones termodinámicas controladas*, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca División de Ingenierías, Tesis Maestría, Junio 2011.
- [2] **Adolfo Benítez Molina**, *Estudio de los efectos de las propiedades de transporte y termo-físicas del biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre la estructura dinámica de un chorro diesel*, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Tesis Maestría, Noviembre 2015.
- [3] **Manuel Gallego Santos**, *Inyección directa diesel sistema Çommon Rail”*, Auto-IES Barajas (2015) 1-109.
- [4] **Citroën Xsara Picasso 2.0 HDi**, *Estudio técnico V manual do tallar*, Revista técnica del automóvil (2001) 1-88.
- [5] **Spir Star**, *Your Specialists in High-Pressure Hose*, Product Catalogue 08 (2015) 1-270.

-
- [6] **Bosch**, *Sistema de inyección diésel por acumulador Common Rail*, Robert Bosch GMBH (2002) 1-96.
- [7] **Piezas de automóviles BOSCH**, *Inyección Common Rail: tecnología avanzada para motores diésel*, Robert Bosch España, S.L.U.
- [8] **Ulrich Flaig, Wilhelm Polach, Gerhard Ziegler**, *Common rail system (CR-System) for passenger car DI diesel engines; experiences with applications for series production projects*, International Congress and Exposition, SAE Technical Paper Series, March 1999.
- [9] **Piezas de automóviles BOSCH**, *Sistema inyector-bomba: presión óptima en todos los cilindros*, Robert Bosch España, S.L.U.
- [10] **Kourosch Karimi**, *Characterisation of multiple-injection diesel sprays at elevated pressures and temperatures*, School of Engineering, University of Brighton, Doctoral Thesis, May 2007.
- [11] **Oscar Alejandro de la Garza de León**, *Estudio de los efectos de la cavitación en toberas de inyección diésel sobre el proceso de inyección y el de formación de hollín*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de máquinas y motores térmicos, Tesis Doctoral, Noviembre 2012.
- [12] **MotionPRO X Camera**, *Cross-platform User Manual, High-speed CMOS Digital Camera (For Windows and MAC)*, REDLAKE ALLIANCE, Powered by Integrated Design Tools, Inc. (2000-2006).
- [13] **Alberto Antonio Viera Sotillo**, *Estudio del chorro diésel producido por un inyector de actuación directa en condiciones no reactivas*, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Tècnica Superior D'Enginyeria Industrial de Barcelona, Tesis Maestría, Julio 2013.

CAPÍTULO 5

EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA

Índice

5.1. Introducción	114
5.2. Plan de trabajo	114
5.3. Efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla .	117
5.3.1. Contrapresión	120
5.3.2. Presión de inyección	125
5.3.3. Duración del pulso eléctrico	129
5.A. Anexo: Metodología para determinar la frecuencia de inyección ópti- ma para evitar el ensuciamiento en los accesos ópticos	142
5.A.1. Objetivo	142
5.A.2. Plan de trabajo desarrollado para la determinación de la frecuen- cia de inyección óptima	142

5.A.3. Análisis y conclusiones de la determinación de la frecuencia de inyección óptima	143
5.B. Anexo: Determinación de la configuración óptima de iluminación . .	144
Bibliografía	150

5.1. Introducción

Con el fin de conseguir los objetivos planteados para dicha investigación el presente capítulo se centrara en los efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla. Donde a continuación se exponen los apartados presentes en este capítulo. En el primer apartado, se dará una breve descripción del plan de trabajo que se desarrollará. En el segundo apartado, se expondrá el efecto de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla. Mientras que en el tercer apartado, se explicara el efecto de la duración del pulso eléctrico sobre el proceso de mezcla.

5.2. Plan de trabajo

Para lograr estudiar los efectos del biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel se desarrollara el siguiente plan de trabajo:

Primeramente para lograr estudiar los efectos del biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre el proceso de mezcla, se retomo el trabajo de tesis de **Adolfo** [1] el cuál consistió en trabajar en el re-diseño de la maqueta de visualización a volumen constante para posteriormente poner a punto la instalación tomado esto como referencia del trabajo de tesis de **Carlos** [2] el cuál se desarrollo en el LIITE-Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética de la FIME, UANL; descrito previamente en la Sección 4.2 y así determinar de forma experimental los parámetros macroscópicos del chorro utilizando la técnica óptica de iluminación directa por dispersión MIE [3, 4, 5], la cuál ha

sido descrita en la Sección 4.3.

En la **Tabla 5.1** se describen las condiciones de operación del sistema de inyección concretamente: pulso eléctrico, frecuencia de inyección, presión de inyección y contrapresión seguidamente se justificaran los valores que se emplearan para cada uno de estos parámetros.

Debido a la limitación física del common rail system tester no es posible el uso de una estrategia de inyección múltiple, pero si es posible manipular el pulso eléctrico para efectuar una inyección principal [7] e incluso una inyección piloto [6, 8] y cumplir así con uno de los objetivos específicos de la presente investigación.

Después en el anexo 5.A. se dan más detalles sobre como se determinó el uso de la frecuencia de inyección de $200 \frac{inj}{min}$ esto con el fin de evitar un ensuciamiento en los accesos ópticos hechos de zafiro; luego se plantearon las presiones de inyección: 500, 1,000 y 1,300 bar, niveles de presión representativos de los motores diesel actuales [9], no se ensayo un nivel de presión superior a los 1,300 bar, por la limitación física de la bomba de alta presión BOSCH CP1 [10] y finalmente en cuanto a los niveles de contrapresión en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante se establecieron los siguientes: 20, 30 y 40 bar, no se utilizaron niveles superiores de contrapresión por seguridad de los operarios de la instalación experimental [11].

Tabla 5.1: Condiciones de operación de inyección.

W_p (Pulso eléctrico)	300, 500, 800, 1000 y 2000 μs
N (Frecuencia de inyección)	200 [$\frac{inj}{min}$]
P_{rail}	500, 1000 y 1300 bar
P_{back}	20 , 30 y 40 bar

Tal y como se justificó en el capítulo 1 los biocombustibles son una gran alternativa

para usarse en los motores diesel hoy en la actualidad; ya que estos reducen considerablemente las emisiones de los gases de la combustión [12], por ello en la presente investigación como objeto de estudio se emplearan los combustibles que a continuación se mencionaran y justificara el porque se decidió el uso de estos:

- Diesel (*Combustible de referencia*)
- Biodiesel derivado del aceite usado de cocina *Se ha elegido este por su viabilidad de adquisición y bajo costo de las materias primas*

Para la adquisición de las imágenes del evento de inyección, se empleará la técnica óptica de iluminación directa por dispersión MIE, la cual ha sido descrita en la Sección 4.3.1. En la **Figura 5.1** se muestra una imagen bruta del chorro líquido.

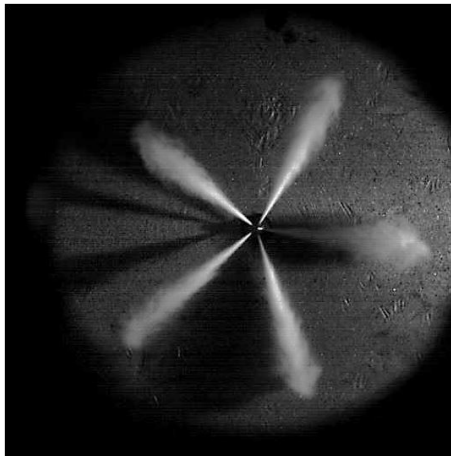


Figura 5.1: Imagen bruta de chorro líquido a una $P_{rail}=80$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $800 \mu s$.

Seguidamente a partir de las imágenes obtenidas y utilizando un código desarrollado en el software matemático MATLAB [13], el cual ha sido descrito en la Sección 4.4, se determinan los parámetros macroscópicos del chorro: penetración del chorro, ángulo del chorro y el área del mismo.

5.3. Efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla

En esta sección se ilustrarán primeramente las imágenes brutas adquiridas del evento de inyección con la técnica óptica de iluminación directa por dispersión MIE, donde en el anexo 5.B se dan detalles sobre la configuración óptica empleada y el chorro que se analizará, después se expondrán los resultados obtenidos sobre el análisis de los parámetros macroscópicos del chorro y finalmente se sintetizan las conclusiones alcanzadas. En la **Figura 5.2** se muestra una secuencia de imágenes de chorro líquido, la cual corresponde al nivel de $P_{rail}=50\text{MPa}$, $P_{back}=2\text{MPa}$ y duración del pulso eléctrico de $2,000\ \mu\text{s}$.

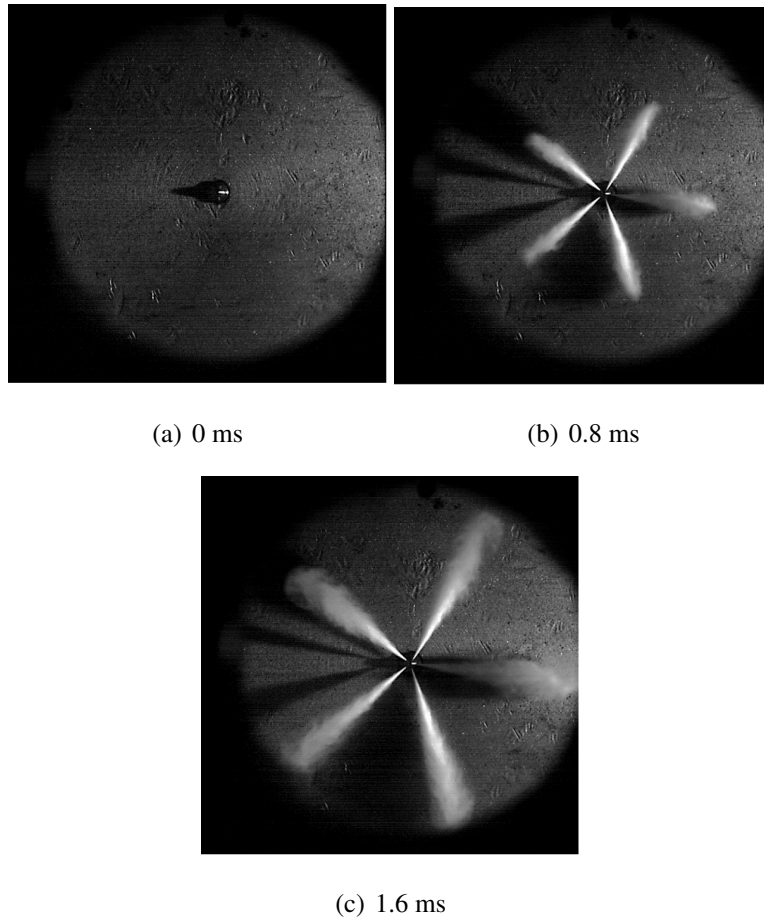


Figura 5.2: Imágenes brutas adquiridas a una $P_{rail}=50\ \text{MPa}$, una $P_{back}=2\ \text{MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de $2,000\ \mu\text{s}$.

Como se puede observar las imágenes adquiridas cuentan con una buena iluminación lo que permite diferenciar claramente los chorros de combustible con el fondo a excepción del chorro 5, el cuál no se puede distinguir claramente, por la causa de que este se ilumina directamente con la lámpara halogena y al comenzar la inyección se observa la sombra del chorro lo que provoca que este se pierda en la imagen bruta, dicho esto se enfocara el análisis en los chorros 1, 2, 3 y 4, seguidamente como se explicó en la Sección 4.4 éstas se introducen en el código para ser procesadas y obtener las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro.

En la **Figura 5.3** se muestra la evolución temporal de la penetración del chorro del evento de una inyección principal, estas evoluciones son consistentes con la bibliografía [14].

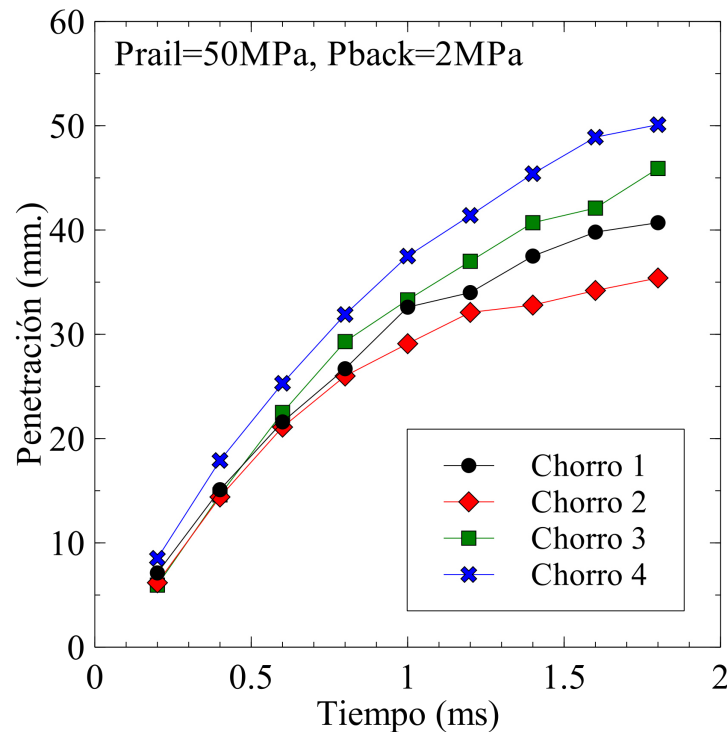


Figura 5.3: Evolución temporal de la penetración del chorro obtenida al utilizar una $P_{rail}=50\text{MPa}$, una $P_{back}=2\text{MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de $2000\ \mu\text{s}$.

Ahora en la **Figura 5.4** se muestra la evolución temporal del ángulo del chorro de los cuatro chorros, donde se puede observar que no existe una gran dispersión entre ellos. Estas evoluciones son consistentes con la bibliografía [15].

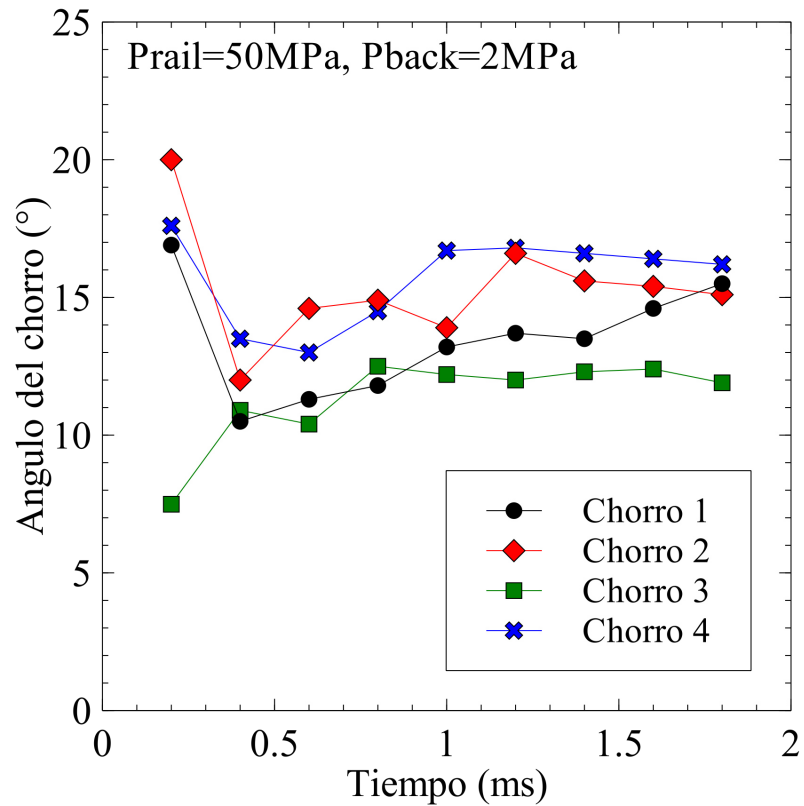


Figura 5.4: Evolución temporal del ángulo del chorro obtenida al utilizar una $P_{rail}=50\text{MPa}$, una $P_{back}=2\text{MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de $2000\ \mu\text{s}$.

Finalmente en la **Figura 5.5** se muestran las evoluciones temporales del área de los chorros, donde claramente se puede observa que no existe una gran dispersión en los chorros. Arrojando resultados consistentes con la bibliografía [16].

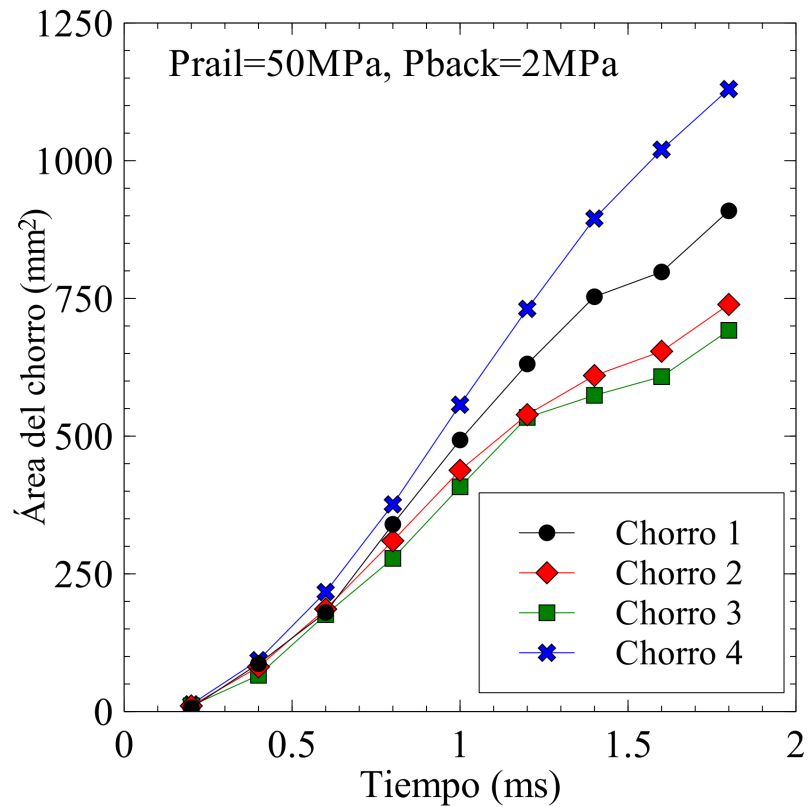
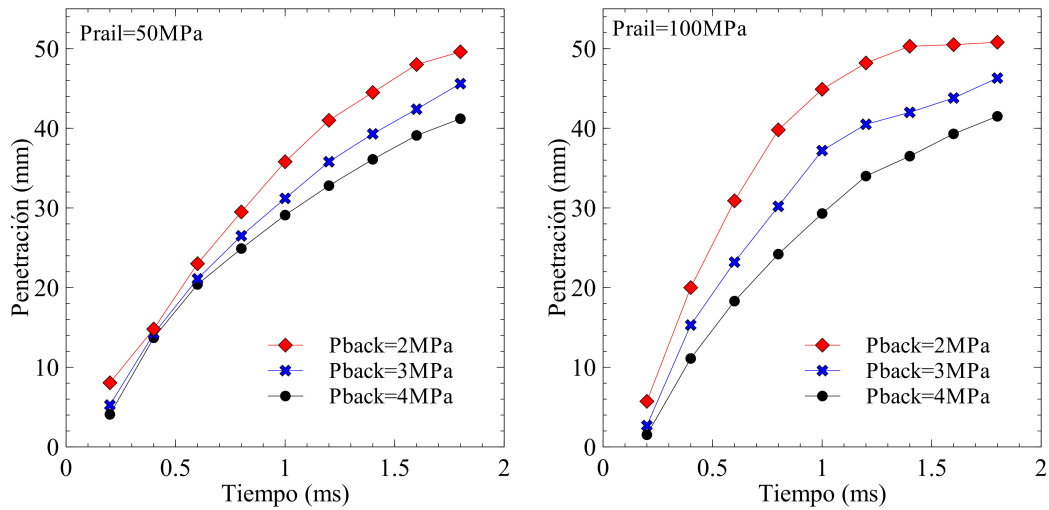


Figura 5.5: Evolución temporal del área del chorro obtenida al utilizar una $P_{rail}=50\text{MPa}$, una $P_{back}=2\text{MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de $2000\ \mu\text{s}$.

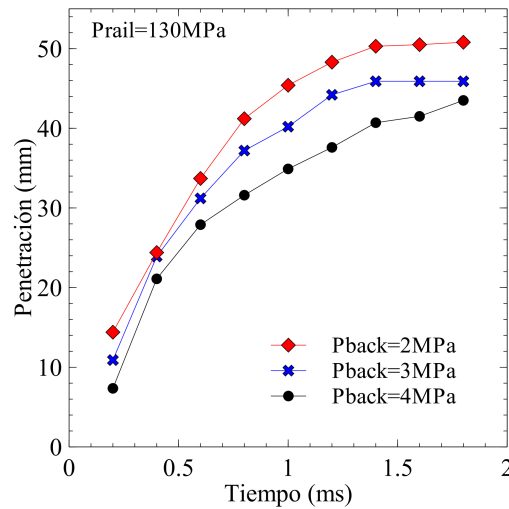
5.3.1. Contrapresión

Como se describió previamente en el capítulo 2 para los efectos del diesel sobre el proceso de mezcla la contrapresión juega un papel muy importante, ya que afecta de manera considerada los parámetros macroscópicos del chorro.

En la **Figura 5.6** se muestran las evoluciones temporales de la penetración del chorro para los niveles de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130 MPa y niveles de P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa y finalmente utilizando un pulso eléctrico de $2000\ \mu\text{s}$.



(a) Combustible diesel inyectado a una P_{rail} de 50 MPa (b) Combustible diesel inyectado a una P_{rail} de 100 MPa

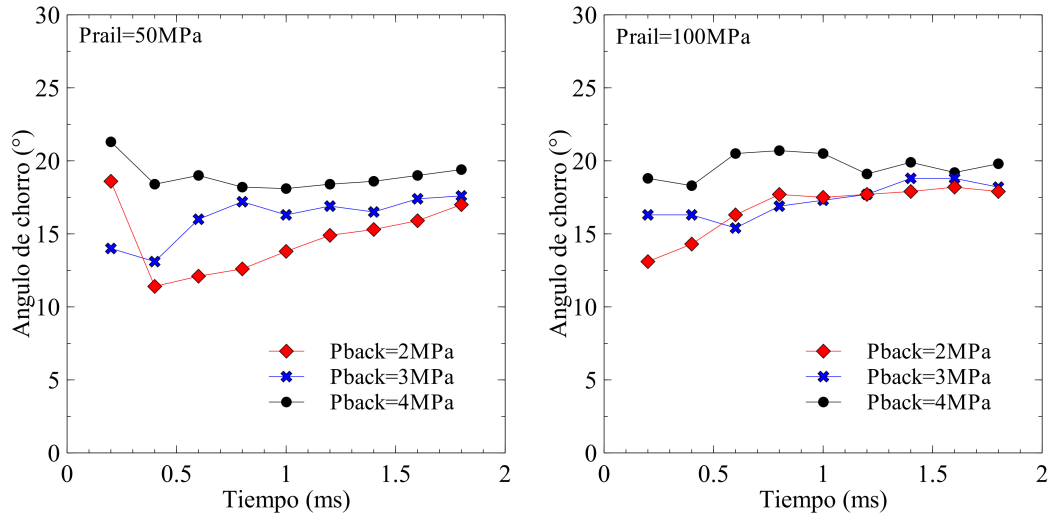


(c) Combustible diesel inyectado a una P_{rail} de 130 MPa

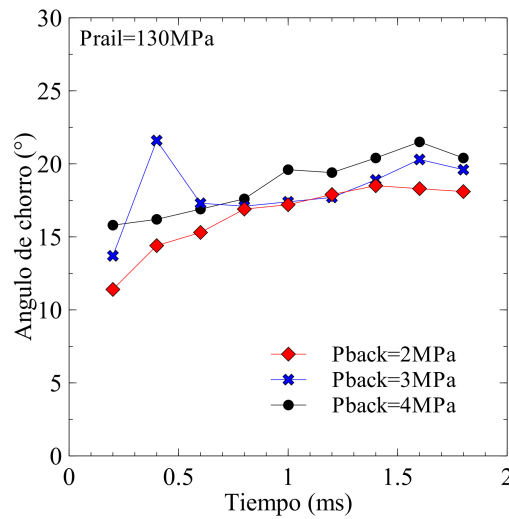
Figura 5.6: Efectos en la evolución temporal de la penetración del chorro a varios niveles P_{rail} y P_{back} .

La penetración del chorro presenta un comportamiento similar a lo reportado por **Chao et al.** [14], notificando que mientras mayor sea el nivel de contrapresión que se utiliza en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante esto resulta en un decremento de la penetración del chorro y además mientras mayor sea la presión de inyección hay un incremento mas acelerado en la penetración del chorro.

En la **Figura 5.7** se muestran las evoluciones temporales del ángulo del chorro en donde se puede observar que mientras mayor sean los niveles de contrapresión esto conlleva a que el ángulo del chorro sea mayor exhibiendo un mejoramiento en el proceso de mezcla, estas conclusiones son consistentes con las de **Mohan et al.** [15].



(a) Combustible diesel inyectado a un nivel de P_{rail} de 50 MPa (b) Combustible diesel inyectado a un nivel de P_{rail} de 100 MPa



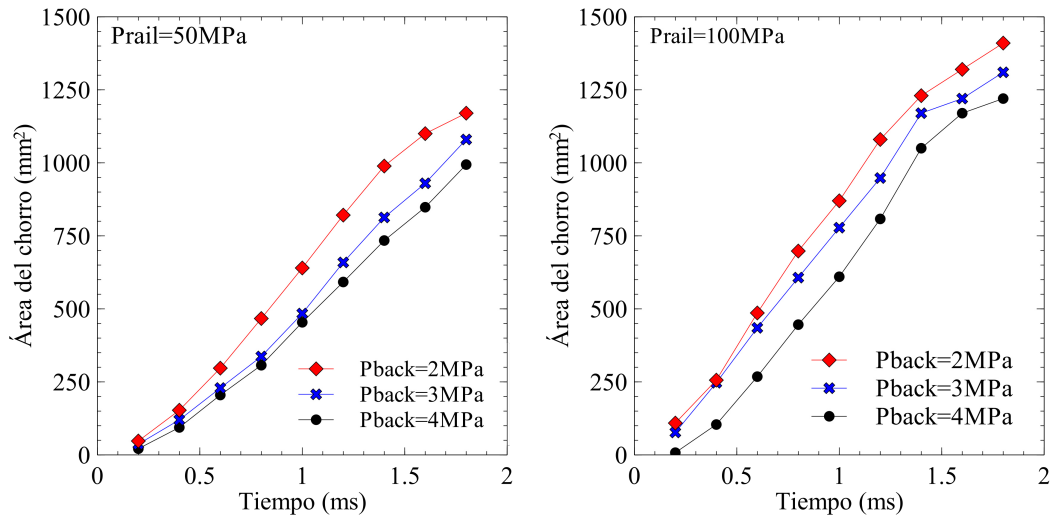
(c) Combustible diesel inyectado a un nivel de P_{rail} de 130 MPa

Figura 5.7: Evolución temporal del ángulo del chorro para los niveles de P_{rail} de 50, 100 y 130 MPa y una P_{back} de 2, 3 y 4 MPa.

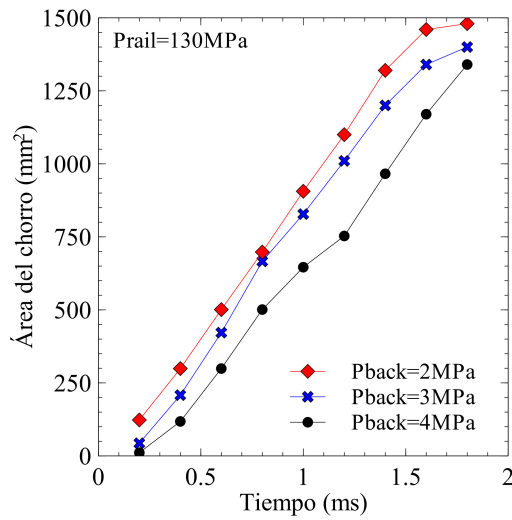
El ángulo del chorro presenta un comportamiento similar a lo reportado por **Chao et al.** [14] concluyendo que 0.8 ms después de haberse iniciado la inyección a cualquier nivel de contrapresión que se utilice en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante se observa mejor estabilidad del ángulo del chorro, adicionalmente **Mohan et al.** [15] concluyeron que mientras mayor sea la presión de inyección y el nivel de contrapresión existe un mejor proceso de mezcla.

La evolución temporal del área del chorro está influenciada por el incremento de la contrapresión en la maqueta de visualización a volumen constante, tal y como se muestra en la **Figura 5.8**, por consiguiente se puede concluir que a mayor contrapresión se tiene un decremento en el área del chorro, esta conclusión es consistente con la de **Hongzhan et al.** [16].

Tal y como lo reporto **Jai et al.** [17] concluyeron que el área del chorro está afectado con la variación de la contrapresión, concluyendo que mientras mayor sea la presión de inyección se incrementa el área del chorro esto debido a que se inyecta una mayor cantidad de masa de combustible.



(a) Combustible diesel inyectado a un nivel de P_{rail} de 50 MPa (b) Combustible diesel inyectado a un nivel de P_{rail} de 100 MPa

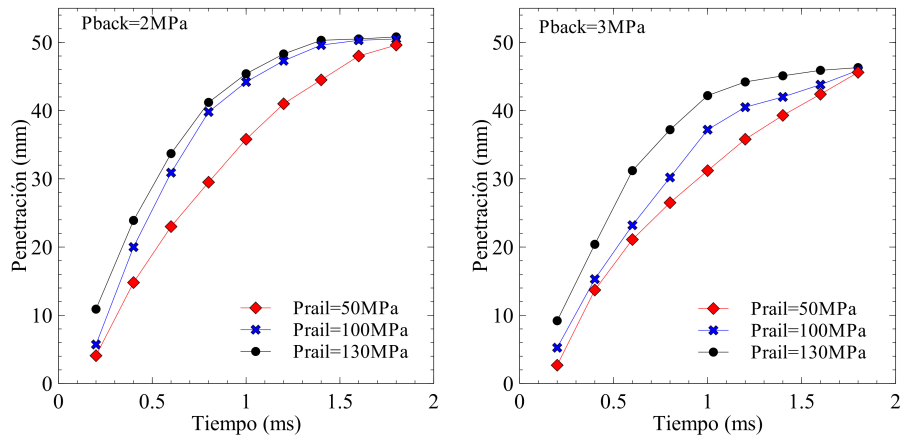


(c) Combustible diesel inyectado a un nivel de P_{rail} de 130 MPa

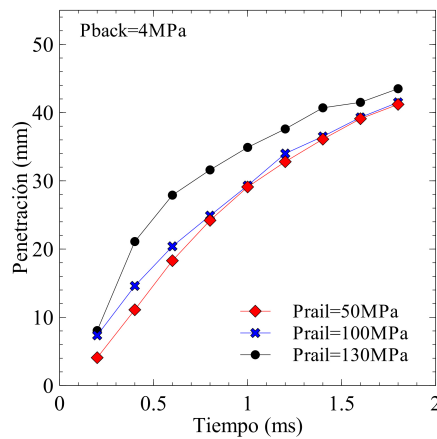
Figura 5.8: Evolución temporal del área del chorro para los niveles de P_{rail} de 50, 100 y 130 MPa y una P_{back} de 2, 3 y 4 MPa.

5.3.2. Presión de inyección

De acuerdo a la información recabada se tiene conocimiento suficiente, para comprender que la presión de inyección no afecta a la penetración del chorro, parámetro característico de la mezcla en la **Figura 5.9** se muestra la evolución temporal de la penetración del chorro para los tres niveles de P_{rail} objetos de estudio, es decir P_{rail} : 50 MPa, 100 MPa y 130 MPa. a los tres niveles de presión de inyección.



(a) Nivel de contrapresión en la maqueta de 2 MPa (b) Nivel de contrapresión en la maqueta de 3 MPa



(c) Nivel de contrapresión en la maqueta de 4 MPa

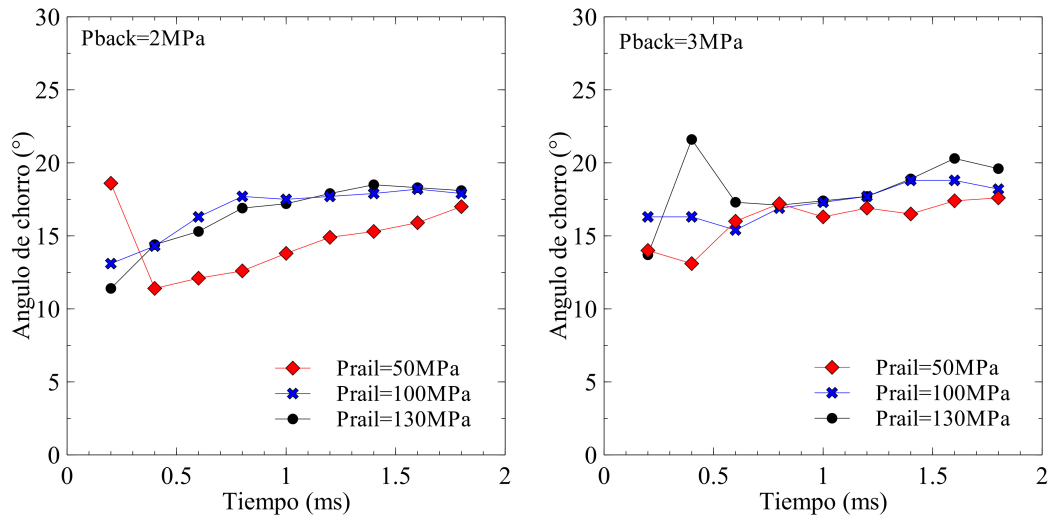
Figura 5.9: Evolución temporal de la penetración del chorro para un nivel de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130 MPa y P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa.

Se observa claramente que en cada una de las pruebas desarrolladas la penetración del chorro es similar a los tres niveles de presión de inyección [20], siendo esto coherente con el trabajo de **Xiangang et al.** [18] en donde concluyeron que mientras mayor sea la presión de inyección menor tiempo le tomara llegar a una estabilidad la penetración del chorro.

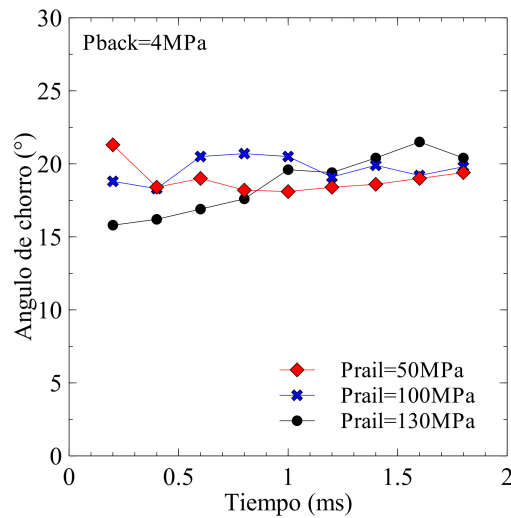
En la **Figura 5.10** se analizan los comportamientos de los ángulos del chorro bajo distintas presiones de inyección y niveles de contrapresión encontrando que parámetros afectan el proceso de mezcla, algo muy similar a lo expuesto por **Song et al.** [19] en donde concluyeron que con una mayor presión de inyección y a elevados niveles de contrapresión se tiene un incremento en el ángulo del chorro.

La presión de inyección afecta los ángulos del chorro desde el comienzo del evento de inyección mostrando un mayor ángulo del chorro, esto depende considerablemente de la contrapresión que se haya tenido en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante, observándose una similitud con lo descrito por **Chao et al.** [14] mientras que el diesel exhibe un comportamiento similar al expuesto por **Mohan et al.** [15].

De acuerdo con la bibliografía se sabe que existe una gran cantidad de información en donde se estudian los parámetros de inyección que afectan el proceso de mezcla, concretamente a la penetración del chorro y el ángulo del mismo pero hay pocos en donde se enfoquen en el análisis del área del chorro. En la **Figura 5.11** se muestra la evolución temporal del área del chorro conforme se fue incrementando la presión de inyección, reflejándose esto en una mayor área del chorro este comportamiento es consistente con el de **Jai et al.** [17].



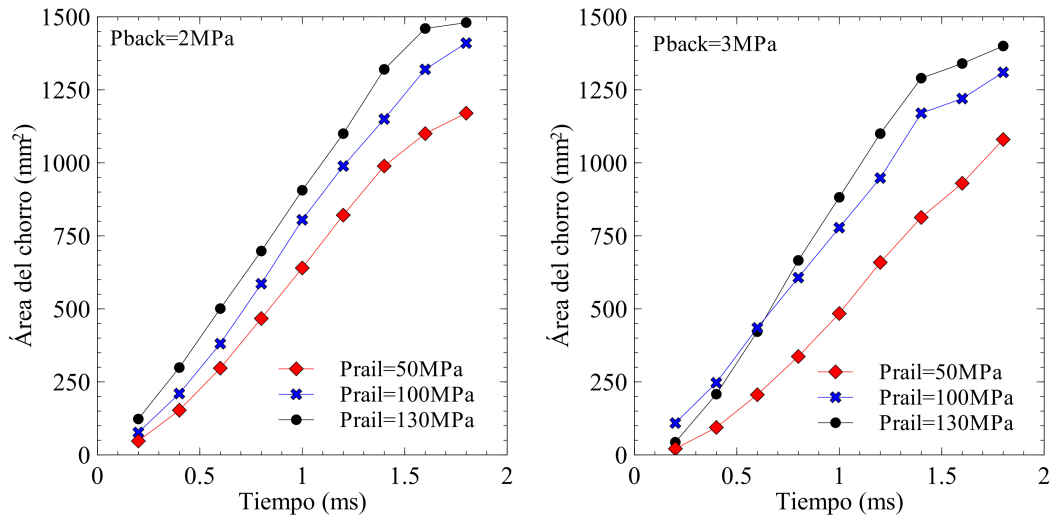
(a) Nivel de contrapresión en la maqueta de 2 MPa (b) Nivel de contrapresión en la maqueta de 3 MPa



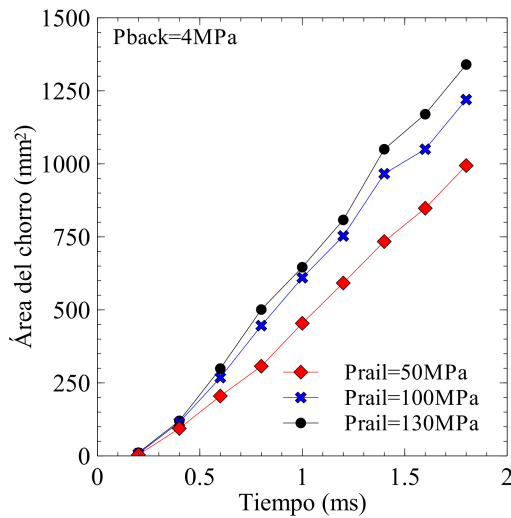
(c) Nivel de contrapresión en la maqueta de 4 MPa

Figura 5.10: Evolución temporal del ángulo del chorro para los niveles de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130 MPa y P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa.

El incremento del área del chorro es similar a lo reportado por **Jai et al.** [17] concluyendo que entre mayor sea la presión de inyección, mayor será la masa inyectada de combustible, reflejándose esto en un incremento del área del chorro; considerando también el efecto que tiene la contrapresión con la disminución de dicho parámetro.



(a) Nivel de contrapresión en la maqueta de 2 MPa (b) Nivel de contrapresión en la maqueta de 3 MPa



(c) Nivel de contrapresión en la maqueta de 4 MPa

Figura 5.11: Evolución temporal del área del chorro para los niveles de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130 MPa y P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa.

5.3.3. Duración del pulso eléctrico

La mayoría de los investigadores se enfoca en analizar el proceso de mezcla, empleando una inyección principal, es por ello que como una aportación del presente trabajo de tesis se planteó el uso de una estrategia de inyección múltiple para analizar el proceso de mezcla; en la **Figura 5.12** se muestran las imágenes adquiridas empleando una duración de pulso eléctrico de $300 \mu s$, la cuál es una duración típica de una inyección piloto [6].

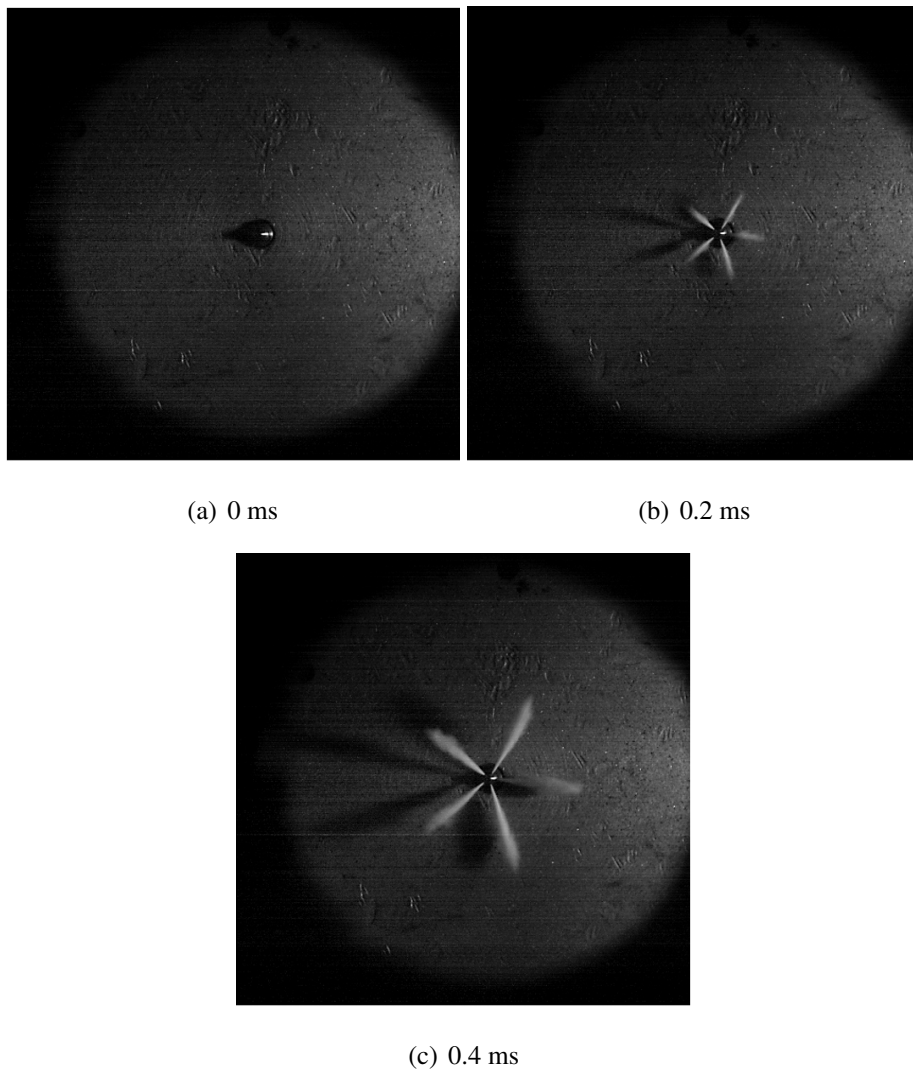


Figura 5.12: Imágenes brutas adquiridas para un nivel de $P_{rail}=50$ MPa, $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $300 \mu s$.

Debido a que solamente se tienen dos imágenes del evento de inyección, se determinó que será totalmente imposible el realizar un análisis robusto de los parámetros macroscópicos del chorro. En las **Figuras 5.13, 5.14 y 5.15** se muestran las evoluciones temporales de la penetración del chorro, el ángulo del chorro y el área del mismo.

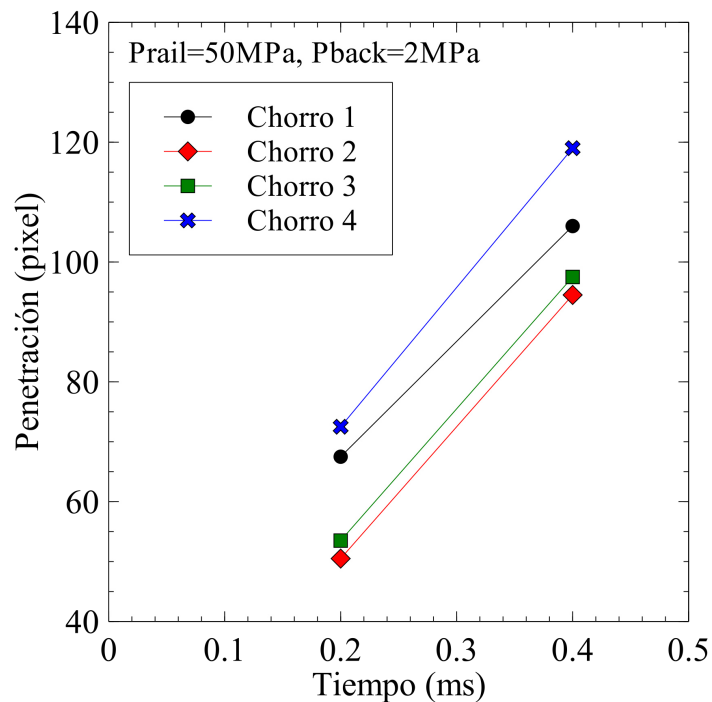


Figura 5.13: Penetración del chorro diesel a una $P_{rail}=50$ MPa y una $P_{back}=2$ MPa.

Por lo tanto se puede concluir que no puede desarrollarse un análisis cualitativo para los cuatro chorros mediante el uso de una inyección piloto con una duración de pulso eléctrico de $300 \mu s$, debido a una limitación física de la cámara digital de alta velocidad.

En base a este detalle como una aportación del presente trabajo de tesis se planteó en desarrollar un análisis cualitativo para una duración de pulso eléctrico de $500 \mu s$ y compararla con una duración de $2000 \mu s$, para estudiar el efecto que la duración del pulso eléctrico tiene sobre el proceso de mezcla.

En base a esto para una duración de pulso eléctrico de $500 \mu s$ se desarrollo un proce-

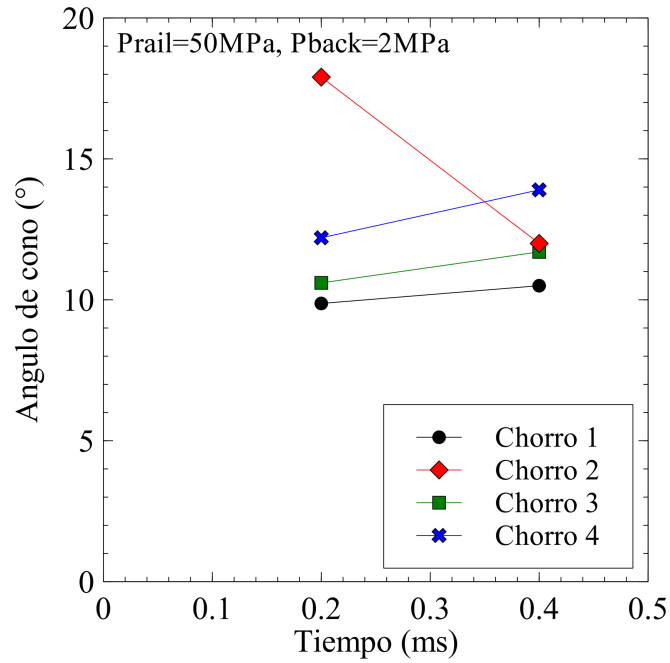


Figura 5.14: Angulo del chorro diesel a una $P_{rail}=50$ MPa y una $P_{back}=2$ MPa.

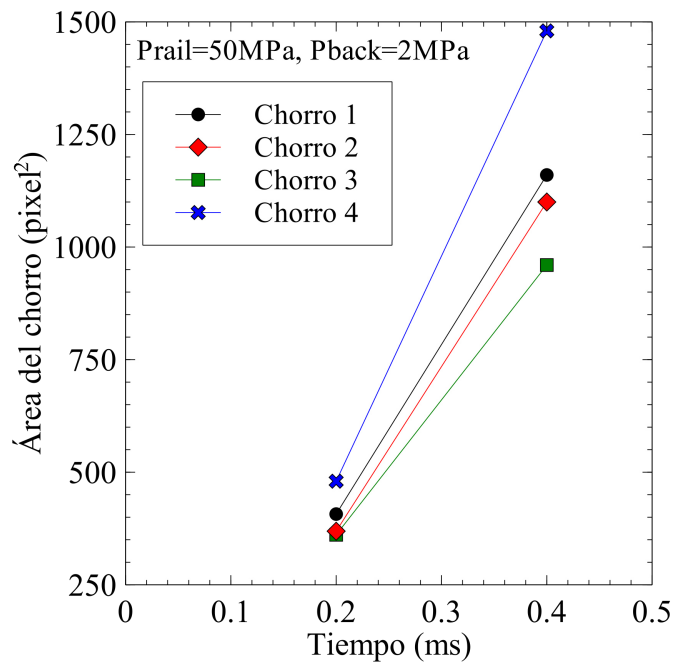


Figura 5.15: Área del chorro diesel a una $P_{rail}=50$ MPa y una $P_{back}=2$ MPa.

dimiento similar al de una duración de pulso eléctrico de $300 \mu s$, mostrando primero la secuencia de imágenes adquiridas del evento de inyección y posteriormente se ilustraran los análisis de los parámetros macroscópicos del chorro, penetración del chorro, ángulo del chorro y área del mismo.

En la **Figura 5.16** se muestran la secuencia de imágenes adquiridas para una duración de pulso eléctrico de $500 \mu s$. En comparación con la duración de pulso eléctrico de $300 \mu s$ que solo se adquirieron dos imágenes del evento de inyección ahora se adquirieron una secuencia de tres imágenes para una duración de pulso eléctrico de $500 \mu s$. En la **Figura 5.16** se muestran la secuencia de imágenes adquiridas para una duración de pulso eléctrico de $500 \mu s$.

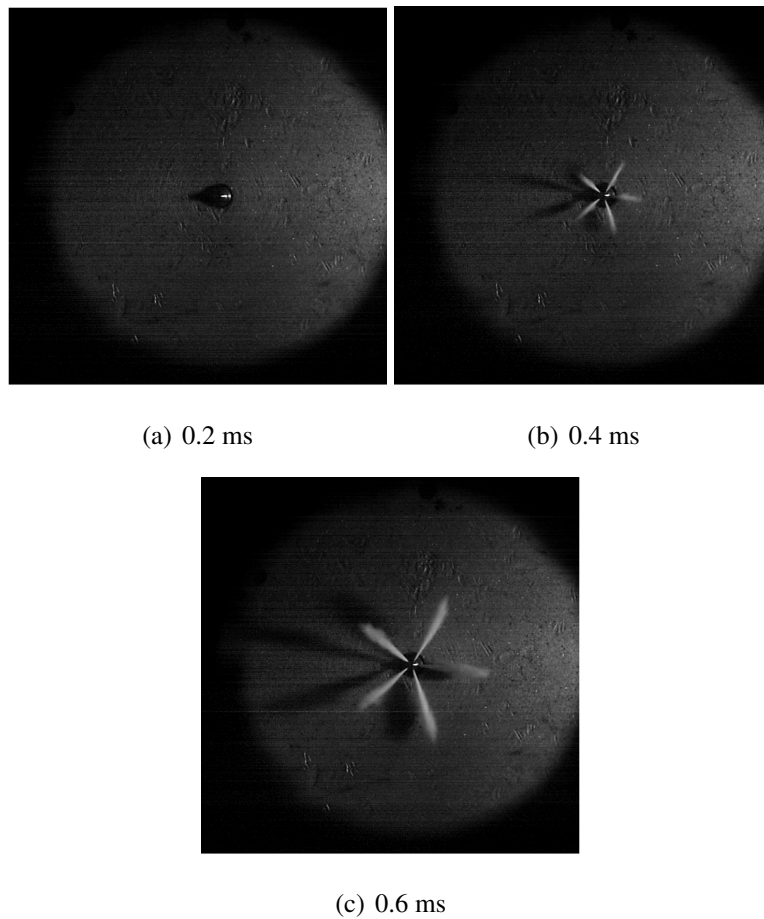


Figura 5.16: Imágenes brutas adquiridas para un nivel de $P_{rail}=50 \text{ MPa}$, $P_{back}=2 \text{ MPa}$ y una duración de pulso eléctrico de $500 \mu s$.

Por tanto, en las **Figuras 5.17, 5.18 y 5.19**, se muestran las evoluciones temporales de la penetración del chorro, ángulo del chorro y el área del mismo, observando un mejor comportamiento en cada parámetro a comparación del pulso eléctrico de una inyección piloto.

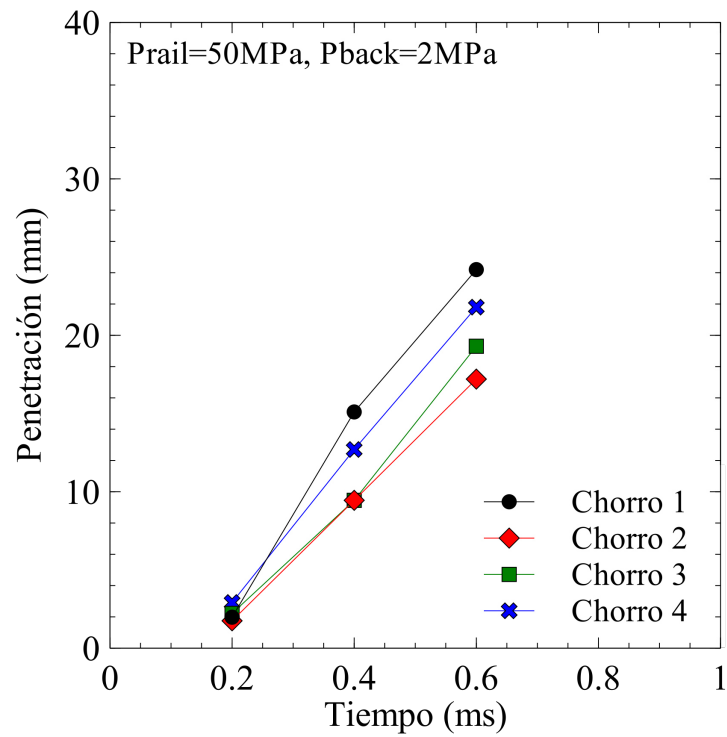


Figura 5.17: Penetración del chorro diesel a una $P_{rail}=50$ MPa y una $P_{back}=2$ MPa.

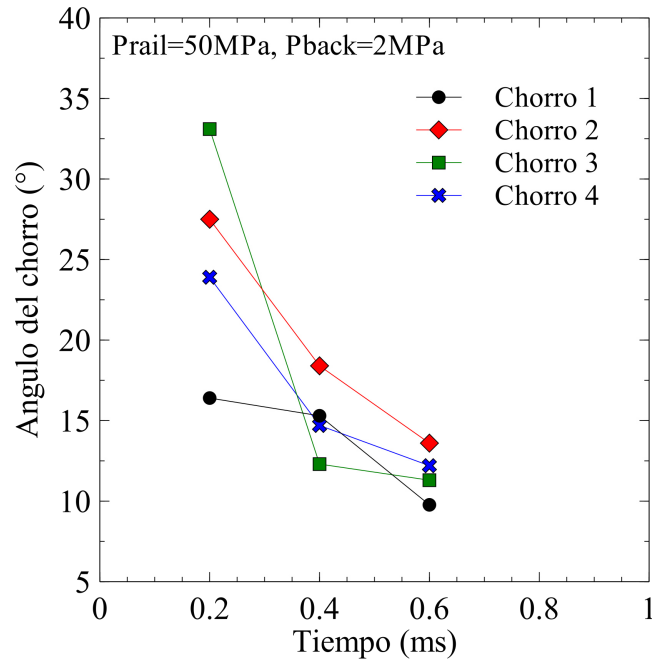


Figura 5.18: Angulo del chorro diesel a una $P_{rail}=50$ MPa y una $P_{back}=2$ MPa.

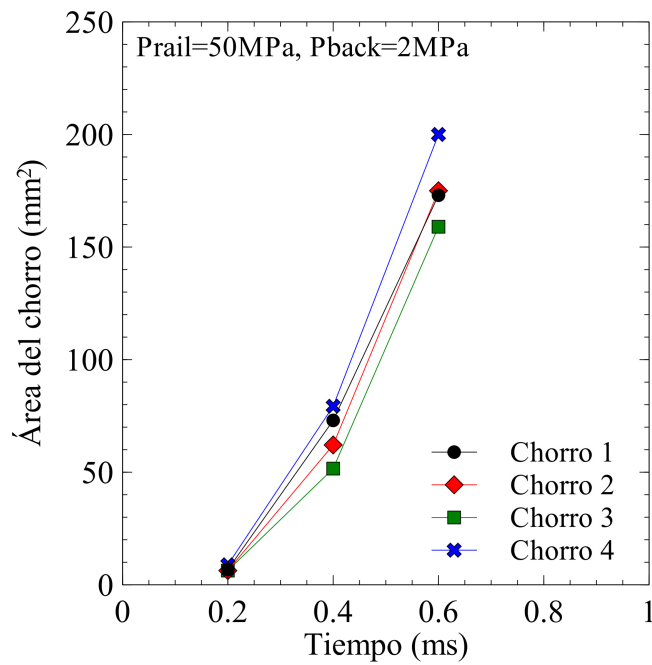


Figura 5.19: Área del chorro diesel a una $P_{rail}=50$ MPa y una $P_{back}=2$ MPa.

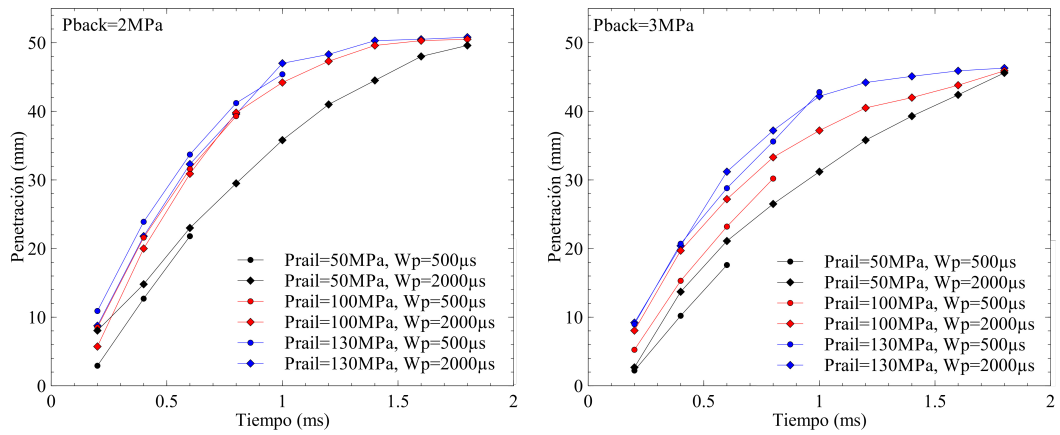
Análisis del efecto de la duración del pulso eléctrico sobre el proceso de mezcla

Actualmente no existe una gran cantidad de estudios en donde se haya analizado el efecto de la duración del pulso eléctrico sobre el proceso de mezcla, por lo tanto como una aportación del presente trabajo de tesis a continuación se muestra un análisis comparativo de dos distintas duraciones del pulso eléctrico (500 y 2000 μs) a una presión de inyección de 130 MPa y un nivel de contrapresión de 4 MPa.

En la **Figura 5.20** se muestran las evoluciones temporales de la penetración del chorro para los niveles de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130MPa a tres niveles de P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa utilizando dos duraciones de pulso eléctrico (500 y 2000 μs).

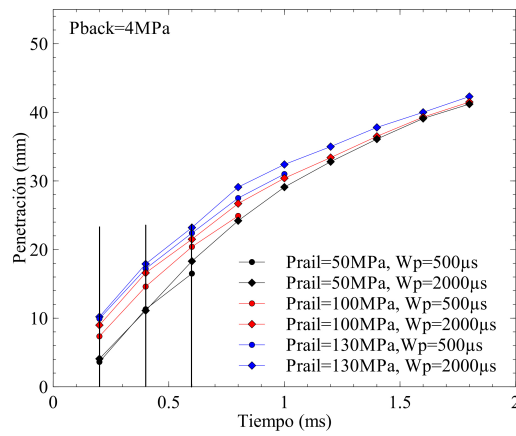
A partir de la **Figura 5.20**, inciso c) ésta concretamente se dividió en tres secciones las cuales representan la penetración del chorro a un iso-tiempo de 200, 400 y 600 μs (penetraciones cerca de la sección de salida del inyector) respectivamente. Ahora en la **Figura 5.21** se representa la penetración del chorro para cada uno de los iso tiempos y para una P_{rail} de 130 MPa, una P_{back} de 4 MPa y las dos duraciones del pulso eléctrico (500 y 2,000 μs).

A partir de la **Figura 5.21**, se observa que empleando una duración de pulso eléctrico de 500 μs se tiene un valor menor de la penetración del chorro en comparación al que se observa para una duración de pulso eléctrico de 2,000 μs .



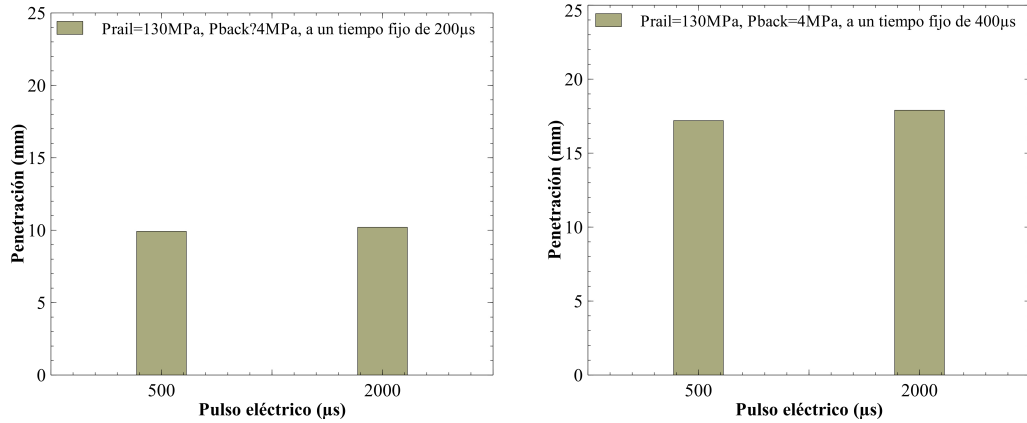
(a) Nivel de P_{back} de 2 MPa

(b) Nivel de P_{back} de 3 MPa



(c) Nivel de P_{back} de 4 MPa

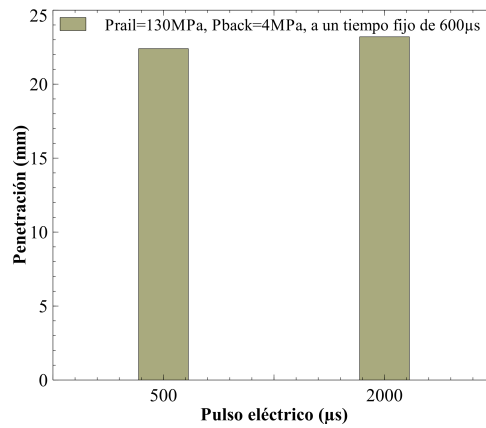
Figura 5.20: Efectos en la evolución temporal en la penetración del chorro a distintas duraciones de pulso eléctrico y a varios niveles de P_{rail} y P_{back}



(a) Penetración del chorro a un tiempo fijo de 200 (b) Penetración del chorro a un tiempo fijo de 400

μs

μs



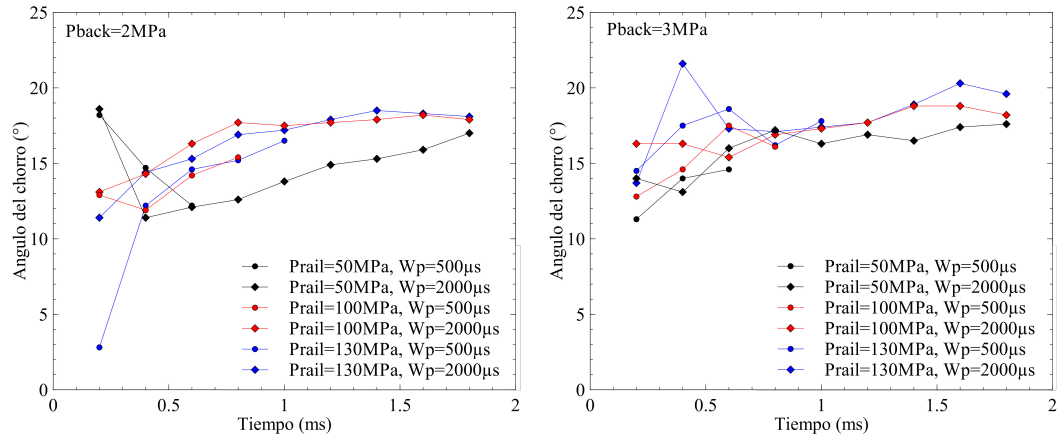
(c) Penetración del chorro a un tiempo fijo de 600

μs

Figura 5.21: Efectos de la duración del pulso eléctrico en la penetración del chorro con una $P_{rail}=130\text{MPa}$ y una $P_{back}=4\text{MPa}$.

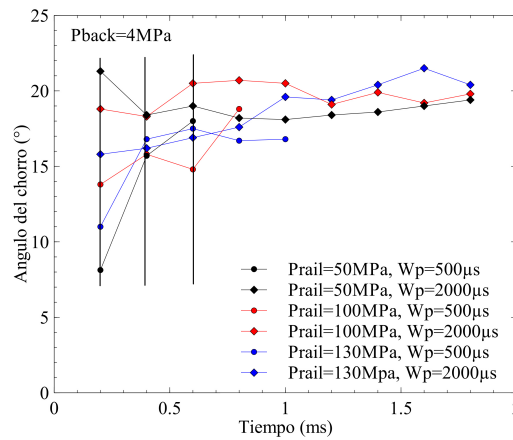
En la **Figura 5.22** se muestran las evoluciones temporales del ángulo del chorro para los niveles de P_{rail} de 50 MPa, 100 MPa y 130MPa a los tres niveles de P_{back} de 2 MPa, 3 MPa y 4 MPa que se emplearon en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante utilizando dos duraciones de pulso eléctrico de (500 y 2000 μs).

En base a la **Figura 5.22**, inciso c) se observan tres líneas verticales las cuales representan el ángulo de chorro a tres iso-tiempos 200, 400 y 600 μs (ángulos cerca de la



(a) Nivel de P_{back} de 2 MPa

(b) Nivel de P_{back} de 3 MPa

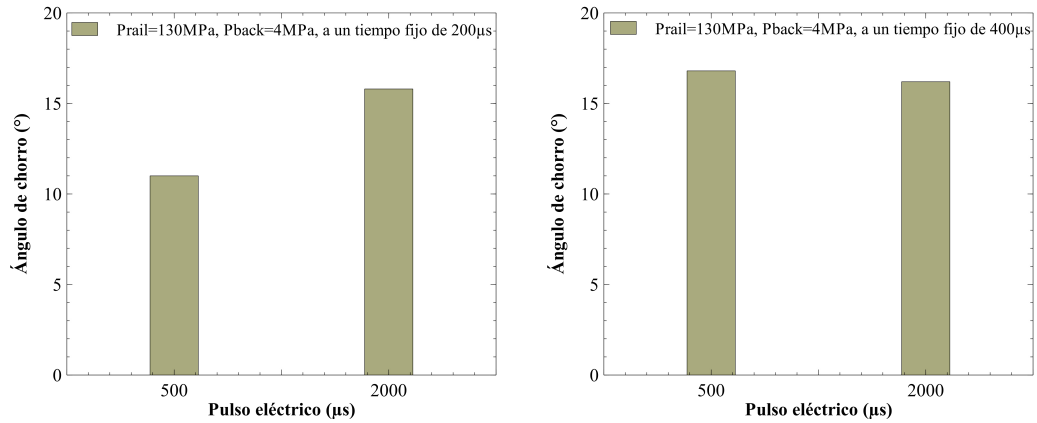


(c) Nivel de P_{back} de 4 MPa

Figura 5.22: Efectos en la evolución temporal del ángulo del chorro a distintas duraciones de pulso eléctrico y a varios niveles de P_{rail} y P_{back}

sección de salida del inyector) respectivamente. Ahora en la **Figura 5.23** se muestra el ángulo del chorro para los tres iso tiempos y para una P_{rail} de 130 MPa, una P_{back} de 4 MPa a las dos duraciones de pulso eléctrico (500 y 2,000 μs).

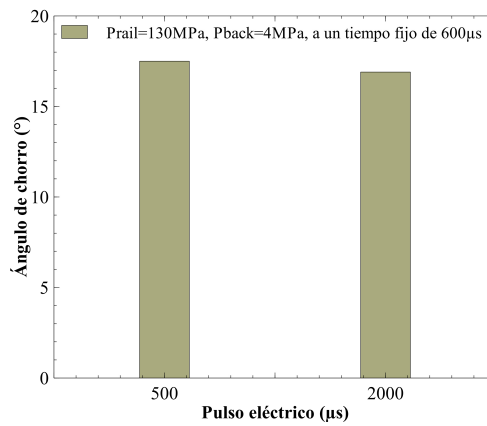
En base a la **Figura 5.23**, se observa que al emplear una duración de pulso eléctrico de 2,000 μs se tiene un menor ángulo del chorro en comparación al observado a una duración de pulso eléctrico de 500 μs , concluyendo que se mejora el proceso de mezcla a duraciones de pulso eléctrico cortas.



(a) Evento de inyección a un tiempo fijo de 200 (b) Evento de inyección a un tiempo fijo de 400

μs

μs



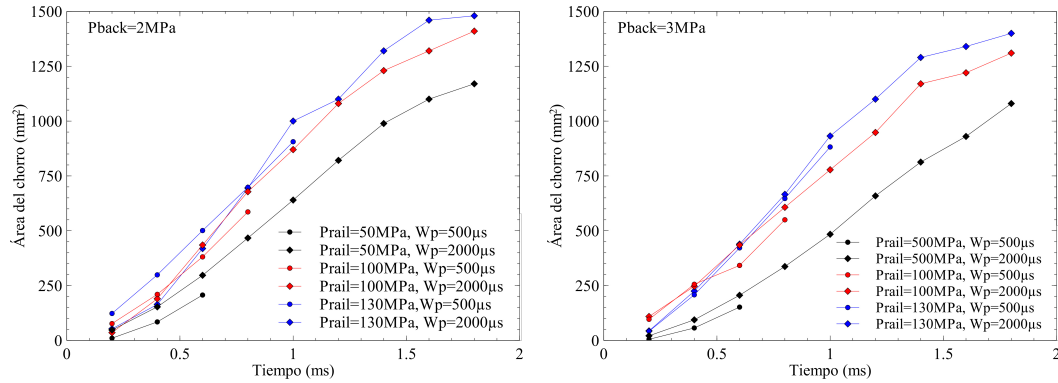
(c) Evento de inyección a un tiempo fijo de 600

μs

Figura 5.23: Efectos de la duración del pulso eléctrico en el ángulo del chorro con una $P_{rail}=130\text{MPa}$ y una $P_{back}=4\text{MPa}$.

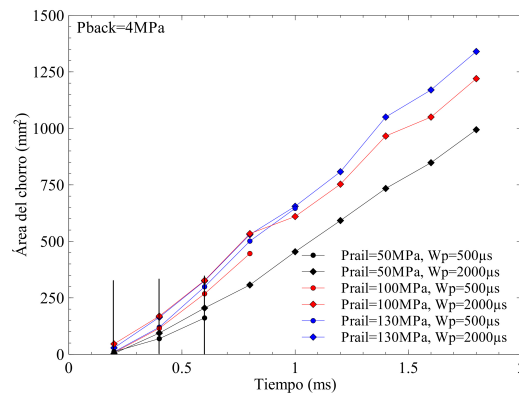
En la **Figura 5.24**, se muestran las evoluciones temporales del área del chorro a los tres distintos niveles de presión de inyección (50, 100 y 130 MPa), para las duraciones de pulso eléctrico de 500 y 2,000 μs con tres niveles de contrapresión (2, 3 y 4 MPa).

A partir de la **Figura 5.24**, inciso c) ésta concretamente se separo en tres secciones las cuales representan el área del chorro a un iso-tiempo de 200, 400 y 600 μs (área cerca de la sección de salida del inyector) respectivamente. Seguidamente en la **Figura 5.25** se



(a) Nivel de P_{back} de 2 MPa

(b) Nivel de P_{back} de 3 MPa

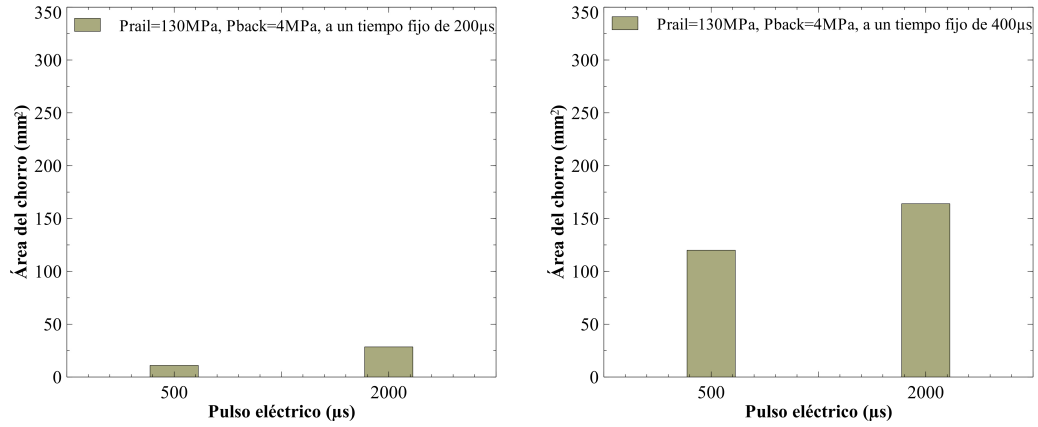


(c) Nivel de P_{back} de 4 MPa

Figura 5.24: Efectos en la evolución temporal del área del chorro a distintas duraciones de pulso eléctrico y a varios niveles de P_{rail} y P_{back}

representa el área del chorro para cada uno de los iso-tiempos empleando una P_{rail} de 130 MPa, una P_{back} de 4 MPa y a dos duraciones del pulso eléctrico (500 y 2,000 μs).

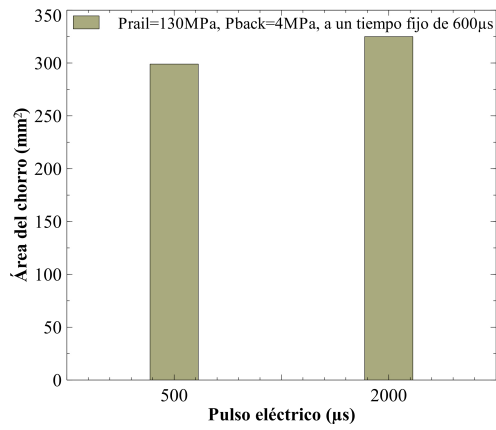
En la **Figura 5.25**, se observa que a una duración de pulso eléctrico de 500 μs se tiene una menor área del chorro en comparación con una duración de pulso eléctrico de 2,000 μs .



(a) Evento de inyección a un tiempo fijo de 200 (b) Evento de inyección a un tiempo fijo de 400

μs

μs



(c) Evento de inyección a un tiempo fijo de 600

μs

Figura 5.25: Efectos de la duración del pulso eléctrico en el área del chorro con una $P_{rail}=130\text{MPa}$ y una $P_{back}=4\text{MPa}$.

5.A. Anexo: Metodología para determinar la frecuencia de inyección óptima para evitar el ensuciamiento de los accesos ópticos

En el presente anexo se proporcionan mas detalles, por un lado, del procedimiento que se siguió para determinar le frecuencia de inyección óptima y por otro lado de los resultados que se han obtenido.

A continuación a modo de resumen se mencionan los apartados de los que esta compuesto el presente anexo: en el apartado 5.A.1 se describe el objetivo que se ha planteado. En el apartado 5.A.2 se describe el plan de trabajo que se seguirá para la realización de los ensayos. En el apartado 5.A.3 se analizaran los resultados obtenidos, complementando al apartado anterior y por último se describirán las conclusiones que se obtuvieron.

5.A.1. Objetivo

El objetivo principal de estas pruebas consiste en averiguar la frecuencia de inyección óptima para evitar el ensuciamiento en los accesos ópticos. Para lograr dicho objetivo se ha planteado el siguiente plan de trabajo.

5.A.2. Plan de trabajo desarrollado para la determinación de la frecuencia de inyección óptima

Consiste en una serie de ensayos aplicando las condiciones de operación descritas en la **Tabla 5.3** hasta determinar la frecuencia de inyección óptima para evitar el ensuciamiento de los accesos ópticos.

Tabla 5.2: Condiciones de trabajo del circuito de inyección

W_p (Pulso eléctrico)	800 μs
N (Frecuencia de inyección)	150 y 250 [$\frac{inj}{min}$]
P_{rail}	300, 400 y 500 bar
P_{back}	20 y 30 bar

Donde para aplicar las condiciones de operación descritas se utilizó el common rail system tester el cual se empleó para los estudios de la presente tesis.

5.A.3. Análisis y conclusiones de la determinación de la frecuencia de inyección óptima

Solamente se requirió el desarrollar una serie de cinco ensayos los cuáles se muestran en la **Tabla 5.4**, en donde los parámetros que se variaron fueron la presión de inyección, la contrapresión y la frecuencia de inyección.

Tabla 5.3: Resultados de la determinación de la frecuencia de inyección

Ensuciamiento	W_p [μs]	N [$\frac{inj}{min}$]	P_{rail} [bar]	P_{back} [bar]
NO	800	250	300	20
NO	800	250	400	20
SI	800	250	500	20
SI	800	150	500	20
NO	800	150	500	30

A partir de la información descrita en la **Tabla 5.3** se puede observar que al ir incrementando la presión de inyección con un bajo nivel de contrapresión; se presenta un mayor ensuciamiento en los accesos ópticos en la maqueta de visualización a volumen constante debido a la masa de combustible inyectada.

Las veces que se presentó ensuciamiento en los accesos ópticos, únicamente fue en el acceso lateral donde se encuentra localizada la iluminación; por lo tanto no afecta en gran parte cuando se vaya a efectuar la adquisición de imágenes del evento de inyección.

También es importante recalcar que no debe dejarse el inyector tanto tiempo abierto; porque se inyecta una gran masa de combustible lo que a su vez implica la formación de nube en la maqueta de visualización a volumen constante y un mayor ensuciamiento en los accesos ópticos.

5.B. Anexo: Determinación de la configuración óptima de iluminación

En el presente anexo se proporcionan más detalles de las distintas configuraciones de iluminación empleadas para determinar cuál de todas es la más óptima para visualizar claramente el evento de inyección.

Por ello a continuación se mencionarán brevemente los cuatro diferentes escenarios que se analizaron; justificando primero el tipo de iluminación que se empleó, en segundo plano observar si las imágenes brutas tienen buena iluminación y por último concluyendo cuál de los cuatro escenarios fue el más óptimo para el desarrollo de los ensayos:

- En el primer escenario consiste en emplear dos lámparas de 35 W 12 V de potencia, una colocada lateralmente a los chorros diesel y la otra frontal en dirección al acceso óptico, tal y como se ilustra en la **Figura 5.26**, mientras que en la **Figura 5.27** se muestran algunas imágenes brutas adquiridas.

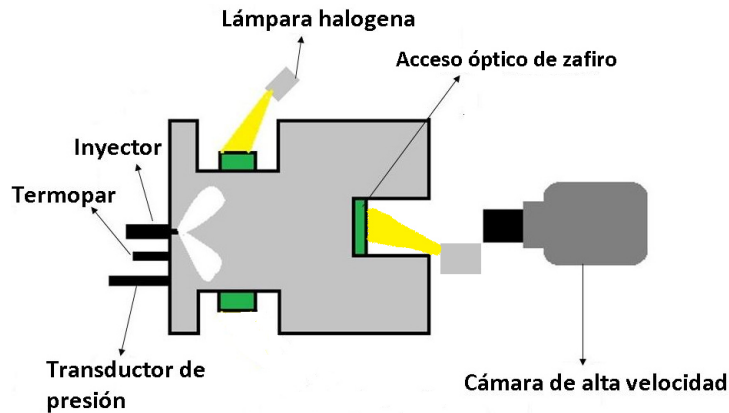


Figura 5.26: Iluminación directa por dispersión MIE empleando lámparas de 35 W y 12 V.

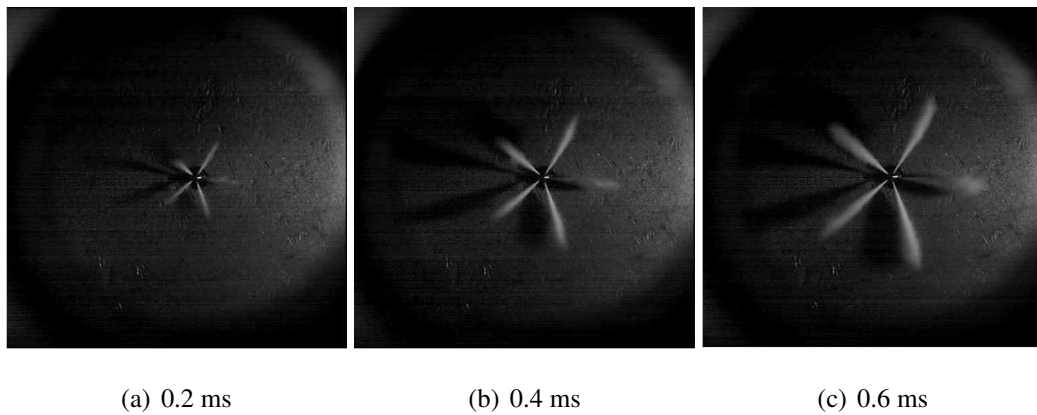


Figura 5.27: Imágenes brutas adquiridas del evento de inyección al utilizar una $P_{rail}=80$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $800 \mu s$.

No se aprecian claramente los chorros de las imágenes adquiridas para esta configuración de iluminación, por lo tanto no son capaces de procesarse y se requirió buscar otra configuración distinta.

- En el segundo escenario se empleó una lámpara lateral de 300 W y 120 V de intensidad, así como se ilustra en la **Figura 5.28**, mientras en la **Figura 5.29** se muestran algunas imágenes brutas adquiridas.

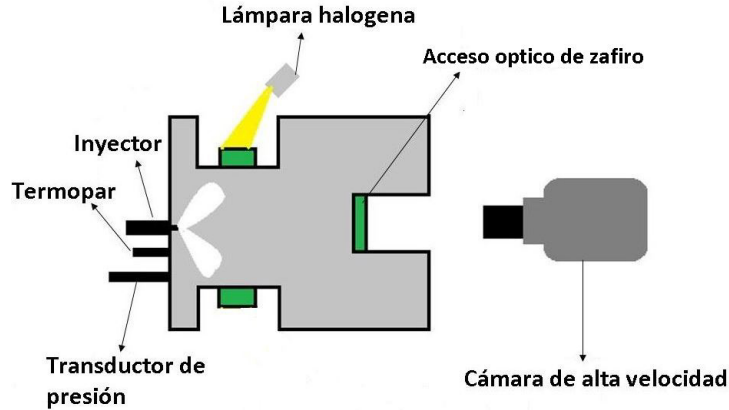


Figura 5.28: Iluminación directa por dispersión MIE empleando una lámpara de 300 W y 120 V de intensidad.

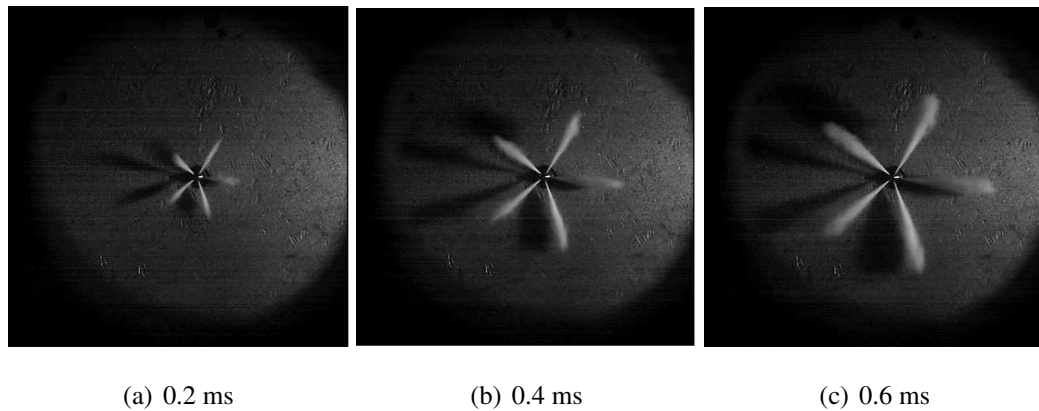


Figura 5.29: Imágenes brutas adquiridas del evento de inyección al utilizar una $P_{rail}=80$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $1,000 \mu s$.

Se mejoro el tema de iluminación para la adquisición de las imágenes pero estas aun no se pueden procesar, concluyendo que no es posible el diferenciar el chorro con el fondo. Así que fue necesario el buscar otra configuración de iluminación diferente.

- En el tercer escenario consiste en emplear dos lámparas de 50 W 12 V de potencia, una colocada lateralmente a los chorros diesel y la otra de frontal en dirección al acceso óptico, tal y como se ilustra en la **Figura 5.30**, mientras que en la **Figura 5.31** se muestran algunas imágenes brutas adquiridas.

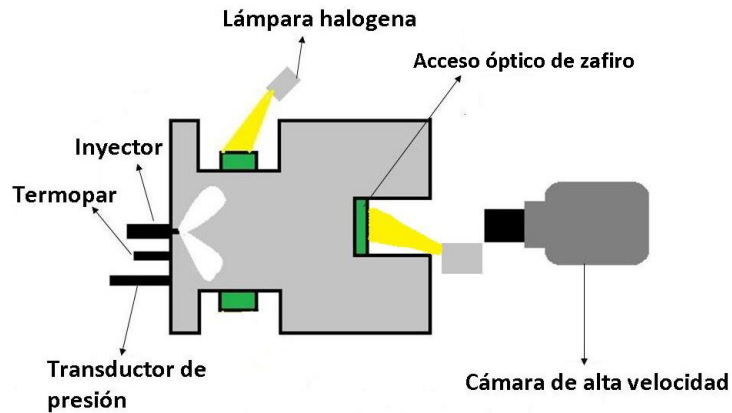


Figura 5.30: Iluminación directa por dispersión MIE empleando lámparas de 50 W y 12 V

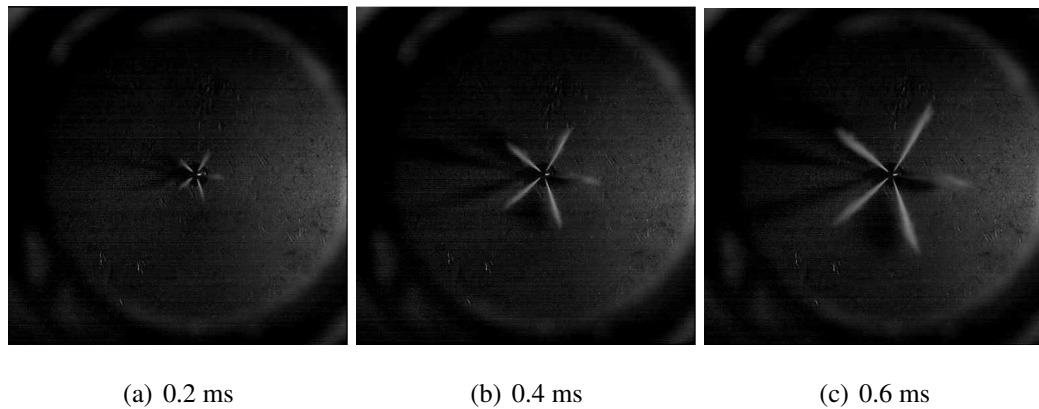


Figura 5.31: Imágenes brutas adquiridas del evento de inyección al utilizar una $P_{rail}=50$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $800 \mu s$.

Las imágenes brutas adquiridas no son capaces de procesarse al faltar iluminación para apreciar mejor los chorros, por tanto fue necesario el buscar otra configuración distinta.

- En el cuarto escenario se empleó una lámpara lateral de 100 W y 120 V de intensidad, así como se ilustra en la **Figura 5.32**, mientras en la **Figura 5.33** se muestran algunas imágenes brutas adquiridas

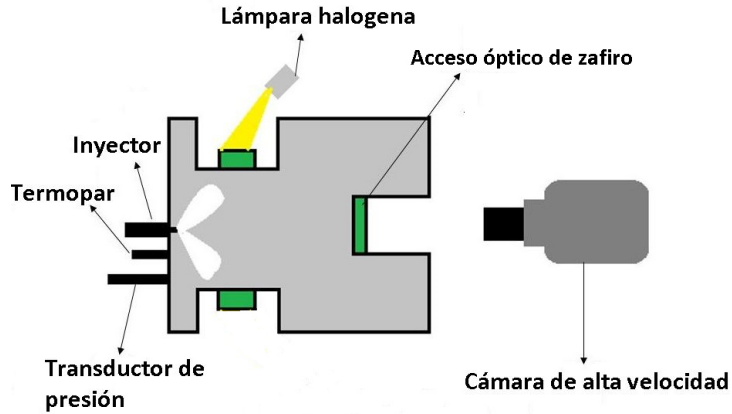


Figura 5.32: Iluminación directa por dispersión MIE empleando una lámpara de 100 W y 12 V de intensidad.

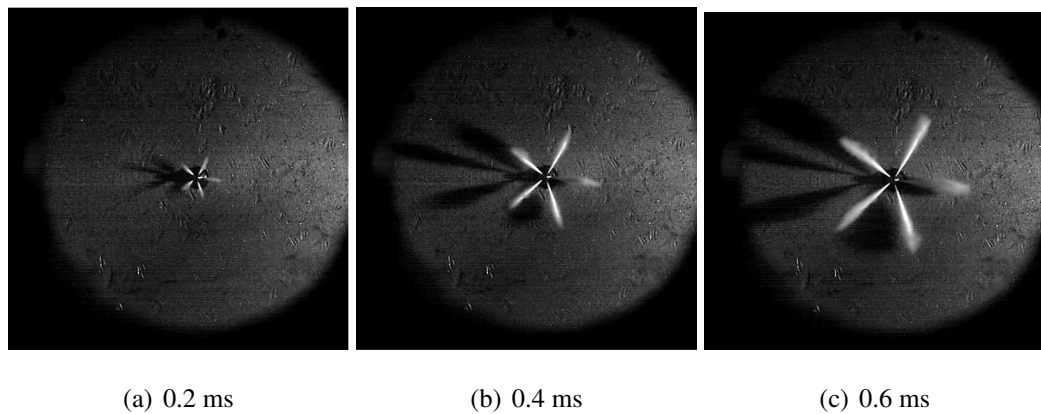


Figura 5.33: Imágenes brutas adquiridas del evento de inyección al utilizar una $P_{rail}=50$ MPa, una $P_{back}=2$ MPa y una duración de pulso eléctrico de $800 \mu s$.

Al mejorarse la iluminación se observa que los chorros están claramente iluminados, concluyendo que las imágenes pueden ser procesadas.

De todas las configuraciones empleadas, se puede concluir que la más óptima fue la del escenario cuatro; porque la iluminación utilizada permitió distinguir muy claramente

los chorros diesel con el fondo en donde se comprobó que las imágenes adquiridas son procesables.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Adolfo Benítez Molina**, *Estudio de los efectos de las propiedades de transporte y termo-físicas del biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre la estructura dinámica de un chorro diesel*, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Tesis Maestría, Noviembre 2015.
- [2] **Carlos Alberto Ruiz Colunga**, *Puesta a punto de instalación experimental para caracterizar chorros de combustible en condiciones termodinámicas controladas*, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca División de Ingenierías, Tesis Maestría, Junio 2011.
- [3] **Oscar Alejandro de la Garza de León**, *Estudio de los efectos de la cavitación en toberas de inyección diesel sobre el proceso de inyección y el de formación de hollín*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de máquinas y motores térmicos, Tesis Doctoral, Noviembre 2012.
- [4] **Luis Daniel Zapata Pemberthy**, *Caracterización de los procesos de inyección-combustión diesel mediante visualización y procesado digital de imágenes*, Univer-

- sidad Politécnica de Valencia, Departamento de máquinas y motores térmicos, Tesis Doctoral, Abril 2010.
- [5] **Alberto Adrian Palomares Chust**, *Análisis de imágenes de chorros diesel*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de máquinas y motores térmicos, Tesis Doctoral, Febrero 2001.
- [6] **Paolo Carlucci, Antonio Ficarella, Domenico Laforgia**, *Pilot injection behavior and its effects on combustion in a common rail diesel engine*, University of Lecce, Department of Engineering for Innovation, Research Center for Energy and Environment, SAE (2001).
- [7] **J. H. Jeong, D. W. Jung, O. T. Lim, Y. D. Pyo, Y. J. Lee**, *Influence of pilot injection on combustion characteristics and emissions in a DI diesel engine fueled with diesel and DME*, International Journal of Automotive Technology, Vol. 15, No. 6, (2014) 861-869.
- [8] **Octavio Armas, Carmen Mata, Simón Martínez-Martínez**, *Effect of diesel injection parameters on instantaneous fuel delivery using a solenoid operated injector with different fuels*, Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Núm. 64, Septiembre 2012, pp. 9-21.
- [9] **Hongzhan Xie, Lanbo Song, Yizhi Xie, Dong Pi, Chunyu Shao, Qizhao Lin**, *An experimental study on the macroscopic spray characteristics of biodiesel and diesel in a constant volume chamber*, Energies (2015), 8, 5952-5972.
- [10] **Citroën Xsara Picasso 2.0 HDi**, *Estudio técnico V manual do tallar*, Revista técnica del automóvil (2001) 1-88.
- [11] **Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee, Hyun Gu Roh**, *Spray and combustion characteristics of biodiesel/diesel blended fuel in a direct injection common-rail diesel engine*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 130, pp. 032807-(1-9), May 2008.

- [12] **Jairo Téllez, Alba Rodriguez, Álvaro Fajardo**, *Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental*, Revista Salud Pública. 8 (1): 108-117, 2006.
- [13] **Alberto Antonio Viera Sotillo**, *Estudio del chorro diesel producido por un inyector de actuación directa en condiciones no reactivas*, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Técnica Superior D'Enginyeria Industrial de Barcelona, Tesis Maestría, Julio 2013.
- [14] **Chao He, Yunshan Ge, Jianwei Tang, Xiukun Han**, *Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel*, International Journal of Energy Research (2008), 32, 1329-1338.
- [15] **Balaji Mohan, Wenming Yang, Kun Lin Tay, Wenbin Yu**, *Experimental study of spray characteristics of biodiesel derived from waste cooking oil*, Energy Conversion and Management 88 (2014) 622-632.
- [16] **Hongzhan Xie, Lanbo Song, Yizhi Xie, Dong Pi, Chunyu Shao, Qizhao Lin**, *An experimental study on the macroscopic spray characteristics of biodiesel and diesel in a constant volume chamber*, Energies (2015), 8, 5952-5972.
- [17] **Avinash Kumar Agarwal, Jai Gopal Gupta, Atul Dhar, Woong Il Kim, Chang Sik Lee, 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 (2014) 212-221.
- [18] **Xiangang Wang, Zuohua Huang, Olawole Abiola Kuti, Wu Zhang, Keiya Nishida**, *Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure*, International Journal of Heat and Fluid Flow 31 (2010) 659-666.
- [19] **L.B. Song, Prof. Q.Z. Lin, Y.Z. Xie, H.W. Hu, H.Q. Hu, D. Pi, D.S.M. Xu**, *Experimental study of the spray characteristics of Diesohol fuel using a high-pressure*

common-rail injection system in a Diesel engine, Energy Technology (2015) Vol. 3. pp. 896-905.

- [20] **Yuan Gao, Jun Deng, Chunwang Li, Fengling Dang, Zhuo Liao, Zhijun Wu, Liguang Li**, *Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil*, Biotechnology Advances 27 (2009) 616-624.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Índice

6.1. Introducción	154
6.2. Conclusiones	155
6.3. Trabajos futuros	156

6.1. Introducción

El presente capítulo esta compuesto de dos apartados. En el 6.2 se describen las conclusiones mas relevantes del presente estudio. Y en el 6.3, tomando en cuenta todos los nuevos conocimientos adquiridos, se proponen algunas vías alternas para continuar la presente investigación.

6.2. Conclusiones

Se puso a punto la maqueta de visualización a volumen constante para la caracterización del proceso de mezcla a través de la visualización del chorro líquido. Dicha puesta a punto consistió en el re-diseño de la cámara a volumen constante, en el diseño de un nuevo carrito del sistema de inyección y el uso de la técnica óptica de iluminación directa por dispersión MIE.

La penetración del chorro para un diesel alcanza su zona de estabilidad más rápido mientras mayor sea la presión de inyección, éste ocurre a cualquier nivel de contrapresión concluyendo que entre mayor sea la contrapresión en el interior de la maqueta de visualización a volumen constante disminuye la penetración del chorro.

El proceso de mezcla tiende a ser mejor mientras mayor sea la presión de inyección a elevados niveles de contrapresión, presentando un aumento en el comportamiento de su ángulo de chorro y una mejor estabilidad a 0.8 ms después de haber iniciado la inyección.

El área del chorro disminuye considerablemente a una elevada contrapresión, sin embargo mientras el combustible se inyecte a una mayor presión de inyección se presenta un aumento en dicho parámetro macroscópico debido a que es mayor la masa de combustible que se inyecta.

No se fue capaz de analizar los efectos de la estrategia de inyección múltiple sobre el proceso de mezcla, porque se tiene una limitación física en el common rail system tester que no permite desarrollar inyecciones de manera simultanea.

Pero a pesar de este inconveniente se desarrollaron pruebas aplicando distintas duraciones del pulso eléctrico de acuerdo al tiempo máximo permitido para una inyección piloto, sin embargo fue imposible hacer un análisis comparativo de los parámetros macroscópicos del chorro; debido a la limitaciones físicas de la cámara de alta velocidad.

El efecto de la duración del pulso eléctrico muestra una ligera dispersión sobre los parámetros macroscópicos del chorro, concluyendo que a duraciones de pulso eléctrico cortas hay un mayor ángulo del chorro, además de una menor penetración del chorro y área del mismo, en comparación con duraciones de pulso eléctrico superiores, concluyendo que se tiene un mejor proceso de mezcla a duraciones de pulso eléctrico cortas.

6.3. Trabajos futuros

En la presente tesis de maestría se han estudiado experimentalmente los efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla, empleando una maqueta de visualización a volumen constante. A continuación se proponen algunas vías para darle continuidad al trabajo presentado y complementar la presente investigación.

- Mejorar la seguridad de la maqueta de visualización a volumen constante implementando una estructura que la mantenga aislada para los operadores.
- Sincronizar el proceso de inyección con la captura de imágenes en la maqueta de visualización a volumen constante.
- Debido a los altos riesgos que existen para operar la maqueta de visualización a volumen constante sería muy conveniente que la despresurización se efectuó de un modo más efectivo y seguro, por ello sería interesante que en paralelo a la válvula de aguja se conecte una electro válvula de gas accionada con un interruptor de emergencia.
- Determinar las propiedades físicas del combustible mas relevantes (densidad, vis-

cosidad, tensión superficial y calor específico) para analizar el efecto que éstas presentan en el proceso de mezcla.

- Del mismo modo que la penetración del chorro, el ángulo del chorro y el área del mismo, la velocidad y los diámetros de las gotas son de suma importancia en el proceso de mezcla, estos dos últimos parámetros se pueden caracterizar empleando la técnica óptica de PDA (Phase Doppler Anemometer).
- Dada la importancia que tienen los efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel, es de sumo interés emplear una cámara digital de una mayor velocidad para desarrollar un análisis cualitativo mas robusto de una inyección piloto.
- Además del presente estudio desarrollado en la maqueta de visualización a volumen constante en ésta se pueden analizar entre otros estudios: los efectos del biodiesel derivado del aceite usado de cocina, el efecto de la geometría de la tobera sobre los parámetros macroscópicos del chorro y la formación de las gotas y ligamentos al término de la inyección.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] **Jorge Enrique Gaviria Ríos, Jorge Hernán Mora Guzmán, John Ramiro Agudelo**, *Historia de los motores de combustión interna*, Universidad de Antioquia, Revista Facultad de Ingeniería No. 26. pp. 68-78, Junio 2002.
- [2] **Nancy E. López Ramirez, Itzel de los Santos Reyes, Artemio de Jesus Jiménez Díaz, Rodolfo Palacios Silva**, *Biodiesel-la historia detrás de la moda*, Universidad de Ciencias y Artes de Chiapas, Gaceta No. 4.
- [3] **Jairo Téllez, Alba Rodriguez, Álvaro Fajardo**, *Contaminación por Monóxido de Carbono: un Problema de Salud Ambiental*, Revista Salud Pública. 8 (1): 108-117, 2006.
- [4] **Fernando Aguirre, Maribel Carmona, Mauricio Romero**, *Biodiesel, sustitución de combustibles fósiles por renovables*, ITO - DEPI - MIA, Ciencia, Tecnología y Sociedad + Innovación, Biodiesel Orizaba, México 2011.
- [5] **Charles Fayette Taylor**, *The Internal Combustion Engine in Theory and Practice*, Volume 2: Combustion, Fuels, Materials, Design, Revised Edition (1985).
- [6] **John B. Heywood**, *Internal Combustion Engine Fundamentals*, New York: McGraw-Hill (1988).

- [7] **Balaji Mohan, Wenming Yang, Kun Lin Tay, Wenbin Yu**, *Experimental study of spray characteristics of biodiesel derived from waste cooking oil*, Energy Conversion and Management 88 (2014) 622-632.
- [8] **Raghu Palani, Nallusamy Nallusamy, Pitchandi K.**, *Spray characteristics of diesel and derivatives in direct injection diesel engines with varying injection pressures*, Mechanical Science and Technology 29 (10) (2015) 4465-4471.
- [9] **Xiangang Wang, Zuohua Huang, Olawole Abiola Kuti, Wu Zhang, Keiya Nishida**, *Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure*, International Journal of Heat and Fluid Flow 31 (2010) 659-666.
- [10] **Chao He, Yunshan Ge, Jianwei Tang, Xiukun Han**, *Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel*, International Journal of Energy Research (2008), 32, 1329-1338.
- [11] **Hyung Jun Kim, Su Han Park, Chang Sik Lee**, *A study on the macroscopic spray behavior and atomization characteristics of biodiesel and dimethyl ether sprays under increased ambient pressure*, Fuel Processing Technology 91 (2010) 354-363.
- [12] **Hongzhan Xie, Lanbo Song, Yizhi Xie, Dong Pi, Chunyu Shao, Qizhao Lin**, *An experimental study on the macroscopic spray characteristics of biodiesel and diesel in a constant volume chamber*, Energies (2015), 8, 5952-5972.
- [13] **Wugao Zhang, Xiaoling Chen, Genxiang Gu, Huaili Hu, Taotao Liu, Zhen Huang**, *Experimental study of the spray characteristics of USLD methanol and DME on the swirl nozzle of a Stirling engine*, Fuel Processing Technology 119 (2014) 1-9.
- [14] **Avinash Kumar Agarwal, Jai Gopal Gupta, Atul Dhar, Woong Il Kim, Chang Sik Lee, 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 (2014) 212-221.

- [15] **L.B. Song, Prof. Q.Z. Lin, Y.Z. Xie, H.W. Hu, H.Q. Hu, D. Pi, D.S.M. Xu**, *Experimental study of the spray characteristics of Diesohol fuel using a high-pressure common-rail injection system in a Diesel engine*, Energy Technology (2015) Vol. 3. pp. 896-905.
- [16] **Yuan Gao, Jun Deng, Chunwang Li, Fengling Dang, Zhuo Liao, Zhijun Wu, Liguang Li**, *Experimental study of the spray characteristics of biodiesel based on inedible oil*, Biotechnology Advances 27 (2009) 616-624.
- [17] **Dong Han, Chunhai Wang, Yaozong Duan, Zhisong Tian, Zhen Huang**, *An experimental study of injection and spray characteristics of diesel and gasoline blends on a common rail injection system*, Energy 75 (2014) 513-519.
- [18] **Avinash Kumar Agarwal, Vipul H. Chaudhury**, *Spray characteristics of biodiesel/blends in a high pressure constant volumen spray chamber*, Experimental Thermal and Fluid Science 42 (2012) 212-218.
- [19] **Avinash Kumar Agarwal, Sibendu Som, Pravesh Chandra Shukla, Harsh Goyal, Douglas Longman**, *In-nozzle flow and spray characteristics for mineral diesel, Karanja and Jatropa biodiesels*, Applied Energy 156 (2015) 138-148.
- [20] **E. Delacourt, B. Desmet, B. Besson**, *Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques*, Fuel 84 (2005) 859-867.
- [21] **Raghu Palani, Nallusamy Nallusamy, Pitchandi K.**, *Spray characteristics of diesel and biodiesel fuels for various injection timings under non evaporating conditions*, Applied Mechanics and Materials Vol. 787, (2015) 682-686.
- [22] **Kourosch Karimi**, *Characterisation of multiple-injection diesel sprays at elevated pressures and temperatures*, School of Engineering, University of Brighton, Doctoral Thesis, May 2007.
- [23] **Robert Bosch GmbH** *Bosch Automotive Handbook*, Distribution John Wiles and Sons Ltd. 7th edition, July 2007.

- [24] **Zhiqiang Zhang, Fuquan Zhao, Jun Deng, Li-Guang Li, Yuan Shen**, *Characteristics of the multiple injection diesel spray employed common rail system*, Journal of Thermal Science and Technology Vol. 8, No. 1, (2013) 106-119.
- [25] **Ziman Wang, Hongming Xu, Changzhao Jiang, Mirosław L. Wyszynski**, *Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection*, Fuel 174 (2016) 140-152.
- [26] **Chang Han-Bao, Xu Hong-Jun, Shao Li-Min, Chen Hai-Long, Zhou Jia-Dong**, *Test investigation on macroscopic properties of multi-injection spray*, Chinese Internal Combustion Engine Engineering, 2011, Vol. 32, No. 3, 48-52.
- [27] **S.W. Park, H.K. Suh, C.S. Lee**, *Effects of a split injection on spray characteristics for a common-rail type diesel injection system*, International Journal of Automotive Technology, Vol. 6, No. 4, (2005) 315-322.
- [28] **Hyun Kyu Suh, Chang Sik Lee, Hyun Gu Roh**, *Spray and combustion characteristics of biodiesel/diesel blended fuel in a direct injection common-rail diesel engine*, Journal of Engineering for Gas Turbines and Power, Vol. 130, pp. 032807-(1-9), May 2008.
- [29] **A.B. Swantek, D. Duke, F.Z. Tilocco, N. Sovis, C.F. Powell, A.L. Kastengren**, *End of injection, mass expulsion behaviors in single hole diesel fuel injectors*, ILASS Americas 26th Annual Conference on Liquid Atomization and Sprays Systems, Portland, OR, May 2014.
- [30] **R. Pos, L. Ganippa, R. Cracknell**, *Characteristics of high pressure diesel sprays at the end of injection*, Brunel University London, College of Engineering, Design and Physical Sciences, Shell Global Solutions, (UK) United Kingdom 1-12.
- [31] **Abdullah Adam, Mamat Rizalman, Tomoaki Yatsufusa**, *Analysis of diesel spray droplets behavior using shadowgraph technique images*, International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing, Vol. 3, No. 1, February 2015.

- [32] **Omar Masera Cenutti, Nicolás Rodríguez Martínez, Ignacio Lazcano Martínez, Luis Augusto Horta Nogueira, Isaias C. Macedo, Sergio C. Trindade, Daniela Thrän, Oliver Probst, Michael Weber, Franziska Müller-Langer**, *Potenciales y Viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México*, Sener/BID/GTZ Proyectos ME-T1007 - ATN/DO-9375-ME y PN 04.2148.7-001.00.
- [33] **Carlos Alberto Ruiz Colunga**, *Puesta a punto de instalación experimental para caracterizar chorros de combustible en condiciones termodinámicas controladas*, Universidad de Guanajuato, Campus Irapuato-Salamanca División de Ingenierías, Tesis Maestría, Junio 2011.
- [34] **Adolfo Benítez Molina**, *Estudio de los efectos de las propiedades de transporte y termo-físicas del biodiesel derivado del aceite usado de cocina sobre la estructura dinámica de un chorro diesel*, Universidad Autónoma de Nuevo León, Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica, Tesis Maestría, Noviembre 2015.
- [35] **Manuel Gallego Santos**, *Inyección directa diesel sistema Common Rail*, Auto-IES Barajas (2015) 1-109.
- [36] **Citroën Xsara Picasso 2.0 HDi**, *Estudio técnico V manual do tallar*, Revista técnica del automóvil (2001) 1-88.
- [37] **Spir Star**, *Your Specialists in High-Pressure Hose*, Product Catalogue 08 (2015) 1-270.
- [38] **Bosch**, *Sistema de inyección diésel por acumulador Common Rail*, Robert Bosch GMBH (2002) 1-96.
- [39] **Piezas de automóviles BOSCH**, *Inyección Common Rail: tecnología avanzada para motores diésel*, Robert Bosch España, S.L.U.
- [40] **Ulrich Flaig, Wilhelm Polach, Gerhard Ziegler**, *Common rail system (CR-System) for passenger car DI diesel engines; experiences with applications for series production projects*, International Congress and Exposition, SAE Technical Paper Series, March 1999.

- [41] **Piezas de automóviles BOSCH**, *Sistema inyector-bomba: presión óptima en todos los cilindros*, Robert Bosch España, S.L.U.
- [42] **Oscar Alejandro de la Garza de León**, *Estudio de los efectos de la cavitación en toberas de inyección diesel sobre el proceso de inyección y el de formación de hollín*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de máquinas y motores térmicos, Tesis Doctoral, Noviembre 2012.
- [43] **MotionPRO X Camera**, *Cross-platform User Manual, High-speed CMOS Digital Camera (For Windows and MAC)*, REDLAKE ALLIANCE, Powered by Integrated Design Tools, Inc. (2000-2006).
- [44] **Alberto Antonio Viera Sotillo**, *Estudio del chorro diesel producido por un inyector de actuación directa en condiciones no reactivas*, Universitat Politècnica de Catalunya, Escola Técnica Superior D'Enginyeria Industrial de Barcelona, Tesis Maestría, Julio 2013.
- [45] **Luis Daniel Zapata Pemberthy**, *Caracterización de los procesos de inyección-combustión diesel mediante visualización y procesado digital de imágenes*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de máquinas y motores térmicos, Tesis Doctoral, Abril 2010.
- [46] **Alberto Adrian Palomares Chust**, *Análisis de imágenes de chorros diesel*, Universidad Politécnica de Valencia, Departamento de máquinas y motores térmicos, Tesis Doctoral, Febrero 2001.
- [47] **Paolo Carlucci, Antonio Ficarella, Domenico Laforgia**, *Pilot injection behavior and its effects on combustion in a common rail diesel engine*, University of Lecce, Department of Engineering for Innovation, Research Center for Energy and Environment, SAE (2001).
- [48] **J. H. Jeong, D. W. Jung, O. T. Lim, Y. D. Pyo, Y. J. Lee**, *Influence of pilot injection on combustion characteristics and emissions in a DI diesel engine fueled with diesel*

and DME, International Journal of Automotive Technology, Vol. 15, No. 6, (2014) 861-869.

- [49] **Octavio Armas, Carmen Mata, Simón Martínez-Martínez**, *Effect of diesel injection parameters on instantaneous fuel delivery using a solenoid operated injector with different fuels*, Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia, Núm. 64, Septiembre 2012, pp. 9-21.