

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA
ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO SOBRE
EL PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR
DIESEL**

POR

ING. SERGIO BORREGO ALVAREZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

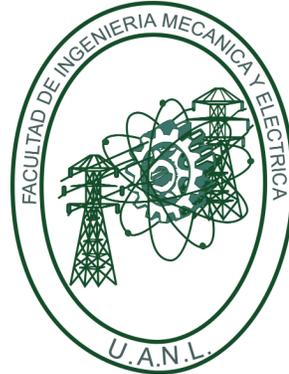
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE

NOVIEMBRE DE 2018

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



**ESTUDIO DE LOS EFECTOS DE LA
ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO SOBRE
EL PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR
DIESEL**

POR

ING. SERGIO BORREGO ALVAREZ

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE

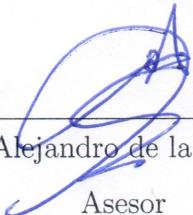
**MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
CON ORIENTACIÓN EN ENERGÍAS TÉRMICA Y RENOVABLE**

NOVIEMBRE DE 2018

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 *Estudio de los efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel*, realizada por el alumno Sergio Borrego Alvarez, con número de matrícula 1880616, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Energías Térmica y Renovable.

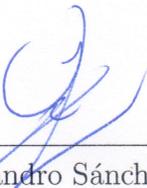
El Comité de Tesis



Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León
Asesor



Dr. Simón Martínez Martínez
Co-Asesor

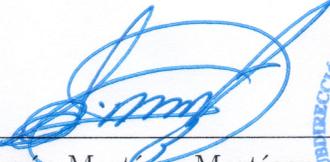


Dr. Fausto Alejandro Sánchez Cruz
Revisor



Dr. Daniel de la Rosa Urbalejo
Revisor

Vo. Bo.



Dr. Simón Martínez Martínez
Subdirección de Estudios de Posgrado



San Nicolás de los Garza, Nuevo León, noviembre de 2018

AGRADECIMIENTOS

A mis padres Sergio Borrego Adame y Beatriz Alvarez Echerivel, que sin importar las circunstancias siempre han dado todo por mí. A quienes agradezco sus enseñanzas, inculcarme el amor por el estudio, por impulsarme a cumplir mis metas y dar lo mejor de mí sin importar los obstáculos y dificultades que puedan aparecer en el camino. Gracias por todo el apoyo, por siempre recibirme con los brazos abiertos y no dejarme dar por vencido.

A mis hermanos, Beatriz, José y Pablo, por su apoyo y demostrarme que aún en la distancia cuento con ellos.

A mi novia y amiga Ingrid Diaz, por estar presente en los días buenos y en los malos, por siempre tener una palabra de aliento cuando las circunstancias se tornaban complicada, por las historias y momentos compartido. Al Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León, por sus enseñanzas y el apoyo para la realización de esta tesis.

Al Dr. Fausto A. Sánchez Cruz por su soporte como coordinador de la maestría y permitirme continuar con mis estudios, al Dr. Simón Martínez Martínez, Subdirector de Estudios de Posgrado, por su apoyo, enseñanzas y por sentar las bases para poder realizar esta tesis.

A todos los doctores y maestros del grupo de investigación, M.C. Miguel García, Dr. Arturo Morales, Dr. Santos Méndez, Dr. Daniel de la Rosa y Dr. Héctor García, por todas sus enseñanzas.

Al M.C. Iván Vallejo y al Ing. Jorge Moreno, que sin importar la distancia o el tiempo, su apoyo y amistad es incondicional.

A Fernando Fong, Jonathan Heredia, Alex de Lucio y Ricardo Guevara, quienes comenzaron siendo mis compañeros de generación y se convirtieron en mis amigos, gracias por su apoyo en todo momento y por las historias vividas.

A Guillermo Rubio y a Lis Corral, por su amistad y el apoyo que siempre me brindaron aún estando en otro país.

A mis amigos de generaciones posteriores, Fernando Guevara, Rossio Carreño, Ulises, Carlos Forns, Vanessa, Alan, Andrés, Mayra, Damián, Cristian (parce), gracias por sus aportes y amistad.

A la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica (FIME) por el apoyo brindado a lo largo de este programa académico. Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) del Gobierno de México, por la financiación de mis estudios de maestría (beca: 612617), y por apoyar esta investigación a través del LaNDACBio (proyecto: 293981).

DEDICATORIA

*A la memoria de mis abuelos,
José Alvarez Alfaro y Esperanza E. de Alvarez
“Un hombre debe ser lo suficientemente grande
como para admitir sus errores, lo suficientemente
inteligente para sacar provecho de ellos
y lo suficientemente fuerte para corregirlos.”*

John C. Maxwell

ÍNDICE GENERAL

Tabla de Símbolos	xviii
Resumen	xx
1. Introducción	1
1.1. Motivación	2
1.2. Antecedentes	5
2. Conocimiento del proceso de mezcla en un Motor Diesel	8
2.1. Sistema de inyección diésel	9
2.1.1. Sistema de inyección common-rail	9
2.1.2. Inyector diésel tipo solenoide	11
2.2. Proceso de atomización	12
2.2.1. Regímenes de atomización	13
2.2.2. Mecanismos de atomización de un chorro diésel	15
2.3. Parámetros macroscópicos del chorro diésel	18
2.4. Efectos de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla	21

2.5. Efectos de las propiedades físicas del combustible sobre el proceso de mezcla	23
2.6. Caracterización del proceso de mezcla bajo una estrategia de inyección piloto	26
3. Planteamiento de la tesis	33
3.1. Síntesis de la revisión bibliográfica	34
3.2. Hipótesis	36
3.3. Objetivos de la tesis	36
3.4. Metodología general de la tesis	37
4. Herramientas experimentales	39
4.1. Maqueta de visualización a volumen constante	40
4.1.1. Cámara de visualización a volumen constante	41
4.1.2. Sistema de inyección diésel common-rail	42
4.2. Técnica Óptica: Iluminación Directa por Dispersión Mie	44
4.3. Procesamiento de imágenes del chorro diésel líquido	45
4.3.1. Obtención de la resolución espacial	45
4.3.2. Software: Parámetros Macroscópicos del Chorro Diésel	47
5. Efectos de los parámetros de operación sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel	49
5.1. Metodología experimental y de análisis	50

5.1.1. Desarrollo de un circuito de control para inyectores diésel so- lenoide	50
5.1.2. Diseño de la matriz de experimentos	52
5.1.3. Experimentación y procesamiento de las imágenes del chorro diésel líquido	54
5.2. Efectos de la presión de inyección sobre el proceso de mezcla	55
5.3. Efectos de la presión en el interior de la cámara sobre el proceso de mezcla	58
5.4. Conclusiones	62
6. Efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mez- cla	64
6.1. Metodología experimental y de análisis	65
6.1.1. Diseño de la matriz de experimentos	65
6.1.2. Experimentación y procesamiento de las imágenes del chorro diésel líquido	66
6.2. Caracterización del proceso de mezcla bajo una estrategia de inyección piloto	67
6.3. Conclusiones	74
7. Conclusiones y trabajos futuros	76
7.1. Conclusiones	77
7.1.1. Efectos de los parámetros de operación sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel	77

7.1.2. Efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla	78
7.2. Trabajos futuros	80
Referencias	81
A. Medición de inductancia e impedancia de inyectores diésel solenoide	89
A.1. Objetivo	90
A.2. Metodología de la actividad	90
A.3. Resultados	92
A.4. Conclusiones	93
B. Simulación de circuito de control para inyectores diésel solenoide	94
B.1. Objetivo	95
B.2. Metodología	95
B.3. Resultados y discusiones	96
B.4. Conclusiones	101

ÍNDICE DE FIGURAS

1.1. Evolución histórica de la normativa medio ambiental EURO	2
1.2. Curva trade-off NOx-PM	5
2.1. Sistema de inyección diésel common-rail	10
2.2. Inyector diésel solenoide	11
2.3. Funcionamiento del inyector diésel solenoide	12
2.4. Regímenes de atomización	14
2.5. Morfología externa de un chorro diésel	18
2.6. Evolución temporal de la penetración del chorro diésel para las presio- nes de inyección de 300, 500, 750 y 1300 bar, (a) presión en el interior de la cámara de 20 bar y (b) presión en el interior de la cámara de 40 bar	22
2.7. Evolución temporal del área del chorro diésel, para las presiones de inyección de 300, 500, 750 y 1300 bar, (a) presiones en el interior de la cámara de 20 bar y (b) presiones en el interior de la cámara de 40 bar	22
2.8. Ángulo del chorro diésel en función de la presión de inyección	23

2.9. Evolución temporal de la penetración del chorro diésel para diferentes combustibles	24
2.10. Evolución temporal del ángulo del chorro diésel para diferentes combustibles	24
2.11. Esquema de masa inyectada frente a tiempo para las tipologías básicas de inyección múltiple: a) estrategia de inyección piloto, b) estrategia de post-inyección y c) estrategia de inyección partida	27
2.12. Esquema de los diferentes parámetros que afectan la definición de una estrategia de inyección múltiple. Para este caso se ha presentado una estrategia de inyección dividida	28
4.1. Maqueta de visualización a volumen constante	40
4.2. Cámara de visualización a volumen constante	41
4.3. Esquema del sistema de inyección diésel common-rail	43
4.4. Técnica óptica: Iluminación directa por dispersión Mie	45
4.5. Esquema del sistema de sincronización y adquisición de imágenes del chorro diésel líquido	46
4.6. Imagen utilizada para obtener la resolución espacial	47
4.7. Imágenes del chorro diésel líquido obtenidas del proceso de inyección en la cámara de visualización a volumen constante a una $P_{rail} = 100$ MPa y $P_{back} = 3$ MPa y tomada a 0.5 ms (tiempo después del inicio de la inyección). En (a), se observa la imagen original y en (b) se observa la detección de los chorros de combustible por el algoritmo mediante el contorno de color azul.	48
5.1. Modelo del circuito de conducción.	51

5.2. Corriente y voltaje del inyector diésel solenoide.	52
5.3. Evolución temporal de la penetración de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail}	55
5.4. Comparación temporal de la penetración de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail}	56
5.5. Evolución temporal del área de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail}	56
5.6. Comparación temporal del área de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail}	57
5.7. Evolución temporal del ángulo del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail}	58
5.8. Comparación temporal del ángulo del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail}	58
5.9. Evolución temporal de la penetración de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back}	59
5.10. Comparación temporal de la penetración del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back}	60
5.11. Evolución temporal del área de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back}	60
5.12. Comparación temporal del área de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back}	61
5.13. Evolución temporal del ángulo del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back}	61

5.14. Comparación temporal del ángulo del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back}	62
6.1. Evolución temporal de la penetración del chorro diésel para diferentes estrategias de inyección piloto y una estrategia de inyección simple.	68
6.2. Evolución temporal del área del chorro diésel para diferentes estrategias de inyección piloto y una estrategia de inyección simple.	68
6.3. Evolución temporal del ángulo del chorro diésel para diferentes estrategias de inyección piloto y una inyección simple.	69
6.4. Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel bajo una estrategia de inyección piloto, (a) penetración del chorro diésel, (b) área del chorro diésel, y (c) ángulo del chorro diésel.	70
6.5. Comparativa de las evoluciones temporales a iso-tiempo de la penetración del chorro diésel, (a) Caso 1, (b) Caso 2, y (c) Caso 3.	71
6.6. Comparativa de las evoluciones temporales a iso-tiempo del área del chorro, (a) Caso 1, (b) Caso 2, y (c) Caso 3.	72
6.7. Comparativa de las evoluciones temporales a iso-tiempo del ángulo del chorro diésel, (a) Caso 1, (b) Caso 2, y (c) Caso 3.	73
A.1. Inyectores diésel solenoide caracterizados eléctricamente	90
A.2. Equipos utilizados para la medición de inductancia (a) e impedancia (b).	91
B.1. Modelo de circuito de control para inyectores diésel solenoide.	96
B.2. Resultado de simulación del circuito de conducción y representación del inyector diésel solenoide, esto mediante la respuesta en corriente.	97

B.3. Perfil de corriente de inyectores diésel solenoide y su corriente de apertura	97
B.4. Perfil de corriente de inyectores diésel solenoide y su corriente de mantenida	98
B.5. Perfil de corriente de inyectores diésel solenoide, bajo una estrategia de inyección piloto y un Dwell time de 200 μs	100
B.6. Perfil de corriente de inyectores diésel solenoide, bajo una estrategia de inyección piloto y un Dwell time de 1000 μs	100

ÍNDICE DE TABLAS

2.1. Propiedades físicas de los combustibles.	25
4.1. Maqueta de visualización a volumen constante	41
4.2. Componentes del sistema del inyección diésel common-rail	44
5.1. Condiciones de operación habituales en un sistema de inyección diésel common-rail.	53
5.2. Matriz de ensayos a P_{back} constante y variación de P_{rail}	53
5.3. Matriz de ensayos a P_{rail} constante y variación de P_{back}	54
6.1. Matriz de ensayos de la estrategia de inyección piloto.	66
A.1. Resultados obtenidos de la primera medición de impedancia e induc- tancia.	92
A.2. Resultados obtenidos de la segunda medición de impedancia e induc- tancia.	92
A.3. Resultados obtenidos de la tercera medición de impedancia e induc- tancia.	93

A.4. Promedio de los resultados obtenidos de la medición de impedancia e inductancia.	93
---	----

TABLA DE SÍMBOLOS

Siglas

- DME* — Éter Dimetílico (*Dimethyl Ether*).
- DPF* — Filtro diésel de partículas (*Diesel Particulate Filter*).
- ECU* — Unidad de Control Electrónica (*Electronic Control Unit*).
- EGR* — Recirculación de gases de escape (*Exhaust Gas Recirculation*).
- FPGA* — Matriz de puertas programables (*Field-Programmable Gate Array*).
- HSDI* — Inyección Directa de Alta Velocidad (*High Speed Direct Injection*).
- PDA* — Anemometría de fase Doppler (*Phase Doppler Anemometry*).
- PMS* — Punto Muerto Superior.
- SCR* — Catalizadores de reducción selectiva (*Selective Catalytic Reduction*).

Latinos

- A* — Área.
- C_d* — Coeficiente de descarga.
- F_t* — Función obtenida de manera analítica por Taylor.
- L* — Inductancia.
- R* — Impedancia.
- S* — Penetración del chorro diésel.
- P_{rail}* — Presión en el raíl.
- P_{back}* — Presión en el interior de la cámara.

v_{eff} — Velocidad efectiva de inyección.

Griegos

ΔP — Caída de presión a través del inyector, definida como $P_{rail} - P_{back}$.

θ — Ángulo del chorro diésel.

μ_f — Viscosidad dinámica del combustible.

ρ_a — Densidad del aire.

ρ_f — Densidad del combustible.

RESUMEN

El uso de las estrategias de inyección piloto ha sido parte importante de las soluciones utilizadas en la reducción de emisiones contaminantes de los motores Diesel y las cuales han sido objeto de estudio por diversos autores. El presente trabajo parte de una revisión bibliográfica de la literatura existente sobre el uso de estrategias de inyección múltiple, de donde se puede concluir que la gran mayoría de los autores que han estudiado sus efectos se han enfocado principalmente en un plano tecnológico, es decir observando las prestaciones del motor, la reducción del ruido del motor y las características de las emisiones contaminantes, dejando de lado el estudio de las características del proceso de mezcla, las cuales tienen una gran influencia en el proceso de combustión y consecuentemente en las características de las emisiones contaminantes.

Por tal motivo el objetivo principal de la presente tesis es profundizar en el estudio del proceso de mezcla, y cómo éste se ve afectado por la variación de los parámetros de inyección y el uso de una estrategia de inyección piloto, esto a través de la determinación de los parámetros macroscópicos del chorro diésel, es decir, penetración, área y ángulo del chorro diésel. Para alcanzar el objetivo antes descrito, el presente trabajo se ha dividido en dos partes.

En la primera parte se ha estudiado el efecto de los parámetros de operación (presión de inyección y presión en el interior de la cámara) sobre el proceso de mezcla, esto mediante la caracterización de sus parámetros macroscópicos, confirmando el efecto de la presión de inyección y el efecto de la presión en el interior de la

cámara sobre el proceso de mezcla, siendo lo anterior, un indicador del correcto funcionamiento de la instalación experimental, permitiendo realizar análisis robustos en condiciones cercanas a las de un motor Diesel.

En la segunda parte, se ha estudiado el efecto de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla, mediante la variación del Dwell time, y al igual que la primera parte, se caracterizaron los parámetros macroscópicos del chorro diésel, observando que la inyección piloto se comporta de manera similar a una inyección simple, mientras que la inyección principal se ve afectada por el valor del Dwell time. Con un Dwell time de 1.5 ms, se observó un incremento de la penetración y el área del chorro diésel para la inyección principal en comparación con la inyección piloto, por otro lado con un Dwell time de 2.0 ms, los valores de penetración y área del chorro diésel de la inyección principal se vieron disminuidos en comparación con la inyección piloto, además de observar un mayor ángulo del chorro diésel para la inyección principal en comparación de la inyección piloto. Finalmente con un Dwell time de 3.5 ms, la penetración y el área del chorro diésel de la inyección piloto y principal tuvieron una evolución temporal semejante, además de obtener un ángulo del chorro diésel mayor para la inyección principal. En base a los resultados obtenidos en el presente trabajo, se puede indicar que es posible mejorar el proceso de mezcla mediante el uso de una estrategia de inyección piloto.

CAPÍTULO 1

INTRODUCCIÓN

En este capítulo se presenta en primer lugar la motivación para la realización de éste estudio, además de los antecedentes del campo de conocimiento que enmarcan el presente estudio.

1.1 MOTIVACIÓN

El proceso de combustión en un motor de combustión interna, permite al ser humano disponer de muchos de los servicios y productos que resultan imprescindibles en la actualidad. Pero como es sabido, todo proceso de combustión lleva asociado un problema de contaminación medioambiental [1]. Dado lo anterior, la creciente conciencia social del uso eficiente de combustibles fósiles, la búsqueda de combustibles alternativos y las cada vez más exigentes normativas medioambientales, han llevado a los fabricantes de automóviles a que sus productos cumplan con requisitos cada vez más estrictos sobre la reducción de emisiones contaminantes, como lo son los hidrocarburos sin quemar o parcialmente quemados (aldehídos, alcanos, alquenos, entre otros) y los óxidos de nitrógeno (NO_x), además de partículas, monóxido de carbono (CO), óxidos de azufre (SO_x) y gases que contribuyen al efecto invernadero, como el dióxido de carbono (CO_2) [2].

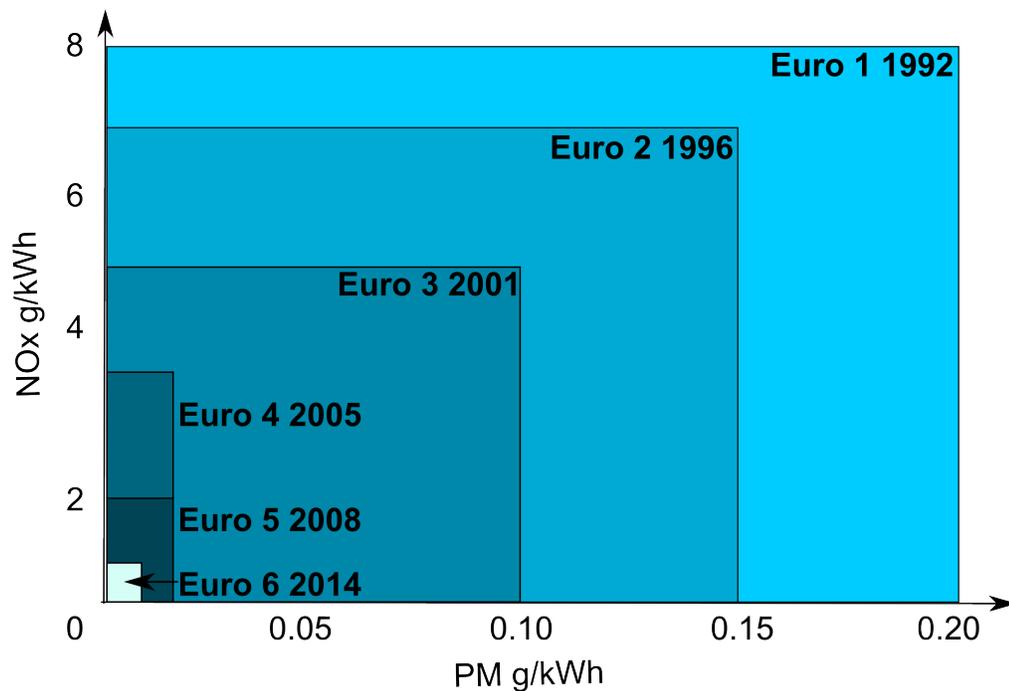


Figura 1.1: Evolución histórica de la normativa medio ambiental EURO

En la Figura 1.1 se representan las evoluciones cronológicas de los últimos tiempos de las emisiones más representativas de los motores Diesel (partículas y NOx) según las diferentes normativas medioambientales EURO. De manera general se puede observar que la evolución de la normativa para ambos contaminantes ha sido cada vez más restrictiva. En la actualidad se cuenta con diferentes desarrollos tecnológicos que han permitido conseguir la citada reducción en las emisiones contaminantes. Dichos desarrollos tecnológicos se pueden dividir en dos grandes grupos.

- Por un lado, se tienen las *soluciones activas*, que se refieren a estrategias de reducción de emisiones directamente en el interior del cilindro a partir de la realización de modificaciones en los sistemas de gestión del aire o de inyección. Dentro de las diferentes soluciones referidas al sistema de gestión del aire se tienen las que mejoran las prestaciones del motor (turbosobrealimentación con turbinas de geometría fija, variables, con enfriador y en los últimos tiempos sobrealimentación en varias etapas [3]), el desarrollo de sistemas de recirculación de gases de escape EGR (por sus siglas en inglés, *Exhaust Gas Recirculation*), y sus posteriores evoluciones (EGR refrigerado [4], EGR de baja presión [5]), así como la introducción de sistemas de distribución variable que flexibiliza el proceso de renovación de la carga. De forma complementaria, dentro de las diferentes soluciones referidas al sistema de inyección cabe destacar el incremento generalizado de la presión de inyección, la reducción en el diámetro de las toberas, el incremento en el número de orificios en las toberas, por último de manera destacada, la introducción de estrategias de inyección múltiple. Con la aplicación de dichas estrategias se rentabiliza el potencial de la evolución en la flexibilización de los sistemas de inyección, de tal forma que se puede realizar cambios en el número de eventos de inyección, en la cantidad de masa inyectada en cada evento así como en la disposición de los mencionados eventos a lo largo del ciclo del motor. Este cambio en la tecnología implica que se puede modular el proceso de mezcla y, por tanto, el proceso de combustión.

- Por otro lado, se tienen las *soluciones pasivas*, que se refieren a estrategias de reducción de contaminantes basadas en la eliminación o retención y posterior eliminación de las emisiones contaminantes una vez producidas en el interior de la cámara de combustión mediante la instalación de dispositivos de post-tratamiento específicos en el colector de escape. Dentro de este tipo de soluciones la distinción se realiza en función del contaminante que se desea eliminar. Así pues, se tienen dispositivos para el almacenamiento y posterior eliminación de las partículas, como el DPF (por sus siglas en inglés, *Diesel Particulate Filter*), y por otro lado se tienen dispositivos para la eliminación de las emisiones de NOx, como lo son catalizadores de reducción selectiva (SCR). Si bien este tipo de soluciones para la reducción de contaminantes presenta como ventaja principal frente a las soluciones activas una alta eficiencia en la reducción de contaminantes deseados, también cabe destacar una serie de inconvenientes, como el aumento en el consumo de combustible, aumento en el costo monetario del motor (incremento de cantidad de tecnología instalada) y un mayor mantenimiento.

En la mayoría de los casos, las instalaciones de sistemas de post-tratamiento afectan en algún sentido el diseño y ajuste del motor, o al menos, algunas de sus funciones, sobre todo su sistema de formación de mezcla y de combustión.

Existe un conflicto entre las tendencias de las distintas sustancias contaminantes emitidas. Un ejemplo de esto son las emisiones de óxidos de nitrógeno, los cuales tienen su origen en altas temperaturas de combustión y contenido de oxígeno, lo cual es normalmente adecuado para reducir emisiones de otras sustancias como monóxido de carbono o partículas en motores Diesel. En la Figura 1.2, se muestra el comportamiento de las emisiones de partículas de un motor Diesel en función de las emisiones de NOx, comportamiento comúnmente denominado curva de “trade-off”.

Es evidente que la cantidad total de emisiones vertidas por un motor a la atmósfera durante su funcionamiento dependen de cada condición de utilización

determinada por el diseño, calibración del motor y del sistema de post-tratamiento. Sin embargo no se puede dejar otras características de operación, de las cuales no se tiene un control y que se basan en la forma en que se manipula el motor, ejemplo de esto es el mantener o no condiciones estables, aumentando más o menos rápidamente las revoluciones, demandar más o menos potencia, entre otros aspectos.

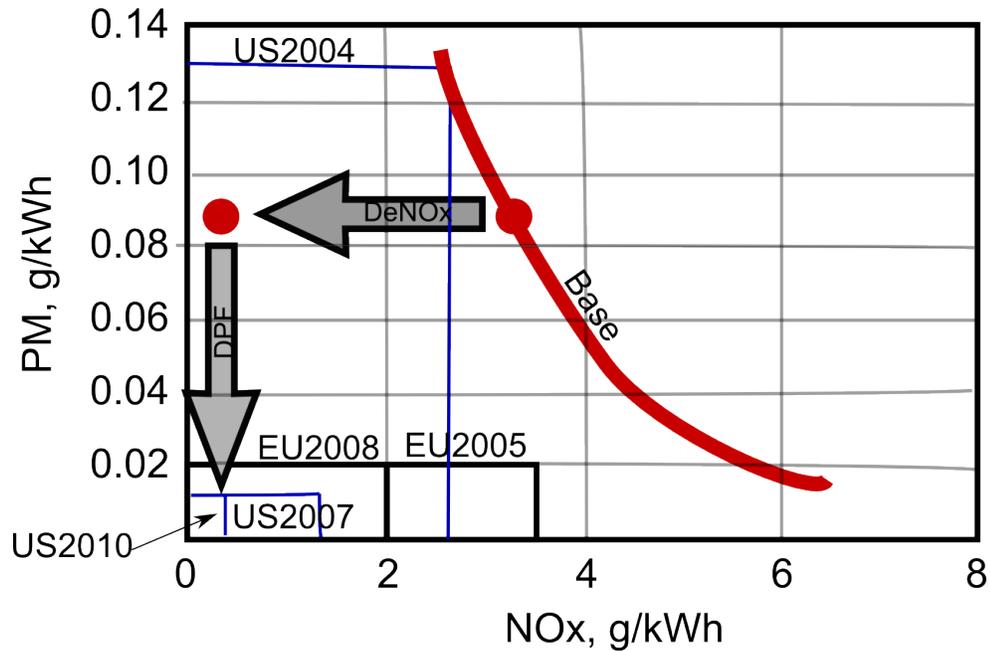


Figura 1.2: Curva trade-off NOx-PM

1.2 ANTECEDENTES

En el año 1893 el ingeniero alemán Rudolf Diesel, inventó el que ahora se conoce como motor Diesel; este consiste en utilizar el calor del aire altamente comprimido para encender una carga de combustible inyectada en el cilindro, y con lo cual se mostró tener una mayor eficiencia que los otros tipos de motores de esa época.

En general, los motores Diesel se utilizan para operar vehículos y embarcaciones de gran potencia debido a que estos tipos de motores tienen una mayor eficiencia térmica y un mejor índice de consumo de combustible que los motores de gasolina.

Además, se han desarrollado diversas tecnologías para motores Diesel de alta velocidad para turismo.

A medida que las tecnologías avanzan, el principal criterio de diseño de los motores Diesel se centra en el cumplimiento de las normativas anticontaminantes vigentes, en el menor consumo de combustible y las mayores prestaciones. Por tal motivo los investigadores están en la búsqueda de nuevas estrategias con la finalidad de cubrir los requisitos antes descritos, como lo es la inyección de combustible common-rail, inyecciones múltiples y combustiones a baja temperatura, todo lo anterior con la finalidad de reducir las emisiones nocivas y aumentar la eficiencia del motor. En el caso de las estrategias de inyección múltiple, se puede mencionar la estrategia de inyección piloto, la cual consiste en introducir una pequeña cantidad de combustible previa a la introducción de la cantidad principal de combustible, esta se ha utilizado tanto en motores de inyección directa como en motores con precámara, sobre todo en sus versiones de aspiración natural [6].

La inyección de una pequeña cantidad de combustible previa a la inyección principal provoca que la cantidad de combustible quemada en pre-mezcla sea reducida comparada con una estrategia de inyección convencional. Esta reducción es mayor cuanto mayor es el tiempo de retraso del motor, por lo tanto, es más notoria cuando se reduce la temperatura y la presión del aire en las proximidades del PMS (*Punto Muerto Superior*), cuando se incrementa el régimen de giro del motor, y finalmente cuanto menor sea la cantidad de combustible pre-inyectada [7].

Reducir la cantidad de combustible quemada en la pre-mezcla tiene como efecto inmediato la reducción del gradiente de presión de la primera etapa del proceso de combustión en el cilindro, y por lo tanto del ruido de combustión y la marcha dura del motor. Además, evidentemente modifica la posterior ley de liberación de calor y evolución de las variables termodinámicas dentro del cilindro, lo que llega a influir tanto en la presión media indicada del motor como en la emisión de contaminantes.

Otra estrategia de inyección comúnmente usada es la estrategia de post-inyección, la cual consiste en la realización en primer lugar de una inyección principal, seguida al cabo de un cierto tiempo por un proceso de inyección de menor masa que el principal. El efecto principal de la post-inyección es la reducción de los humos en escape, debido fundamentalmente a la mejora del proceso de oxidación del hollín en las fases finales de la combustión [7].

Finalmente la estrategia de inyección partida, consiste en dividir el total de la masa de combustible inyectada en dos o más eventos iguales, permitiendo extender la combustión durante la carrera de expansión sin incrementar los niveles de NOx [8].

Muchos estudios se han centrado en estudiar las estrategias de inyección múltiple, mediante la evaluación de su rendimiento midiendo las emisiones contaminantes, como los trabajos de Hyung y D'Ambosio quienes estudiaron el efecto de la estrategia de inyección piloto, observando una reducción en las emisiones de material particulado (PM) y óxido de nitrógeno (NOx).

El implementar una estrategia de inyección múltiple, requiere el control de diferentes variables que intervienen en el evento de inyección y combustión. Por ello sería de interés estudiar el proceso de mezcla aire-combustible en un motor Diesel bajo una estrategia de inyección múltiple, el cual es un indicador de las características de la combustión y por consecuencia de las emisiones contaminantes.

CAPÍTULO 2

CONOCIMIENTO DEL PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIESEL

En el presente capítulo se realizó una revisión de los conceptos teóricos involucrados en este estudio. Se comienza describiendo el sistema de inyección common-rail y se explica el proceso de inyección en un motor Diesel. Seguidamente, se describen los parámetros macroscópicos que caracterizan el proceso de mezcla en un motor Diesel. Después, se exponen los trabajos más relevantes relacionados con la caracterización del proceso de mezcla en un motor Diesel. Y por último, se detallan las características de las estrategias de inyección múltiple y el estado actual del conocimiento de éstas.

2.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

El sistema de inyección es el responsable de la entrega de combustible al motor para su funcionamiento. Para ello debe de cumplir una serie de funciones.

- Introducir el combustible en el interior de la cámara de combustión según una ley que va a definir el comportamiento de las diferentes fases de la combustión en sincronismo con el movimiento.
- Atomizar el combustible para aumentar la superficie de contacto con el aire caliente tras la etapa de compresión y acelerar la evaporación.
- Mezclar el combustible con el aire disponible en la cámara de combustión.

2.1.1 SISTEMA DE INYECCIÓN COMMON-RAIL

En la Figura 2.1 se muestra un esquema de un sistema de inyección diésel common-rail. En él se puede observar como una bomba de baja presión toma el combustible del depósito y alimenta la bomba de alta presión. A su vez, la bomba de alta presión, es accionada por el cigüeñal del motor, trasiega combustible, a través del raíl, hacia los inyectores situados en los diferentes cilindros del motor. Una parte del combustible es inyectada en la cámara de combustión y otra parte, menor que la anterior, se utiliza para el pilotaje hidráulico de los inyectores. Esta fracción de combustible vuelve al depósito la cual se le llama retorno de los inyectores. El volumen de control situado entre la bomba de alta presión y los inyectores, actúa como un acumulador (raíl común). Su función principal es actuar como depósito acumulador, aparte de su función como deposito acumulador, el raíl hace las veces de elemento amortiguador de las oscilaciones de presión generadas por las emboladas de los pistones de la bomba de alta presión, así como aquellas perturbaciones originadas por la rápida salida del combustible por los orificios de descarga de los inyectores. La

señal en el raíl de combustible es medida, mediante un sensor, la señal obtenida es comparada con el valor de consigna almacenado en la Unidad de Control Electrónica (ECU). Si el valor medio y el de consigna son distintos, un orificio de descarga situado en el regulador de presión (en un extremo del raíl) se abre o se cierra hasta igualar ambos valores. El caudal excedente de combustible retorna al depósito de combustible.

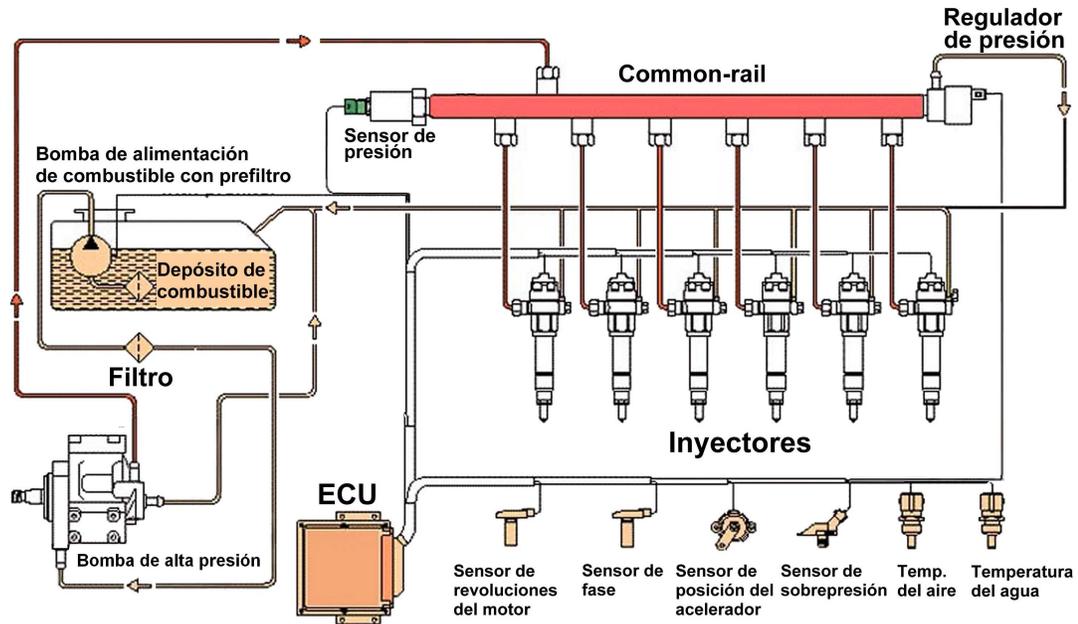


Figura 2.1: Sistema de inyección diésel common-rail

El tiempo de apertura y cierre del inyector, están controlados por una señal de comando que la ECU envía a la válvula electromagnética de éste. La masa de combustible que se inyecta en cada ciclo depende de diferentes variables:

- El tiempo de apertura del inyector
- La presión en el raíl
- La presión de descarga
- Permeabilidad de la tobera

2.1.2 INYECTOR DIÉSEL TIPO SOLENOIDE

En la Figura 2.2 se observa el esquema de un inyector diésel solenoide, el cual está compuesto principalmente por una válvula electromagnética, porta inyector y tobera.

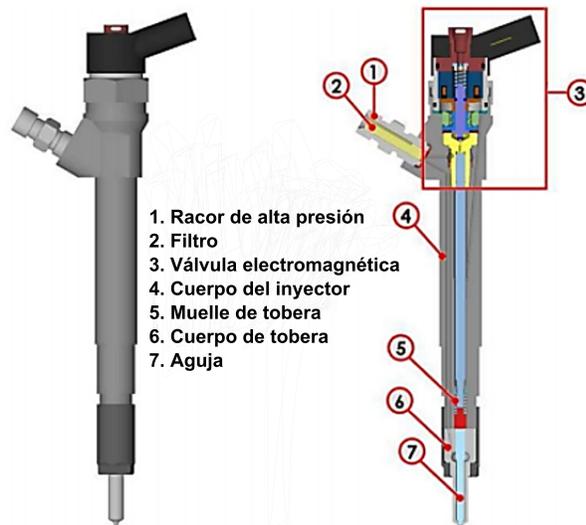


Figura 2.2: Inyector diésel solenoide

En la Figura 2.3 se observa el principio de funcionamiento del inyector diésel tipo solenoide, el cual es alimentado por el combustible a alta presión procedente del raíl, una vez que el combustible a alta presión entra al inyector donde, tras el filtro, se produce una bifurcación en dos conductos. Un conducto se dirige hacia la parte baja del inyector, que es el que alimenta a la tobera, y otro alimenta al volumen de control, en la parte superior del pistón de comando, a través del orificio calibrado de entrada (Z). Cuando la válvula solenoide es desactivada, el orificio S se encuentra cerrado. Por consiguiente, la presión del combustible, que equivale a la presión que se tiene en el raíl, actúa tanto sobre la parte superior de la varilla (mediante el orificio Z) como en la parte inferior de la aguja. Como consecuencia del mayor área de la varilla y de la fuerza ejercida por el muelle, la aguja se mantiene en su asiento, cerrando los orificios de descarga. Sin embargo cuando la válvula solenoide es activada, el orificio S se abre disminuyendo la presión que se tiene en el interior del volumen de control.

Por tanto, la presión que se tiene en la parte superior de la varilla es menor respecto a la que se tiene en la parte inferior de la aguja. Esto provoca el levantamiento del conjunto varilla-aguja, abriéndose los orificios e iniciando por consiguiente el proceso de inyección.

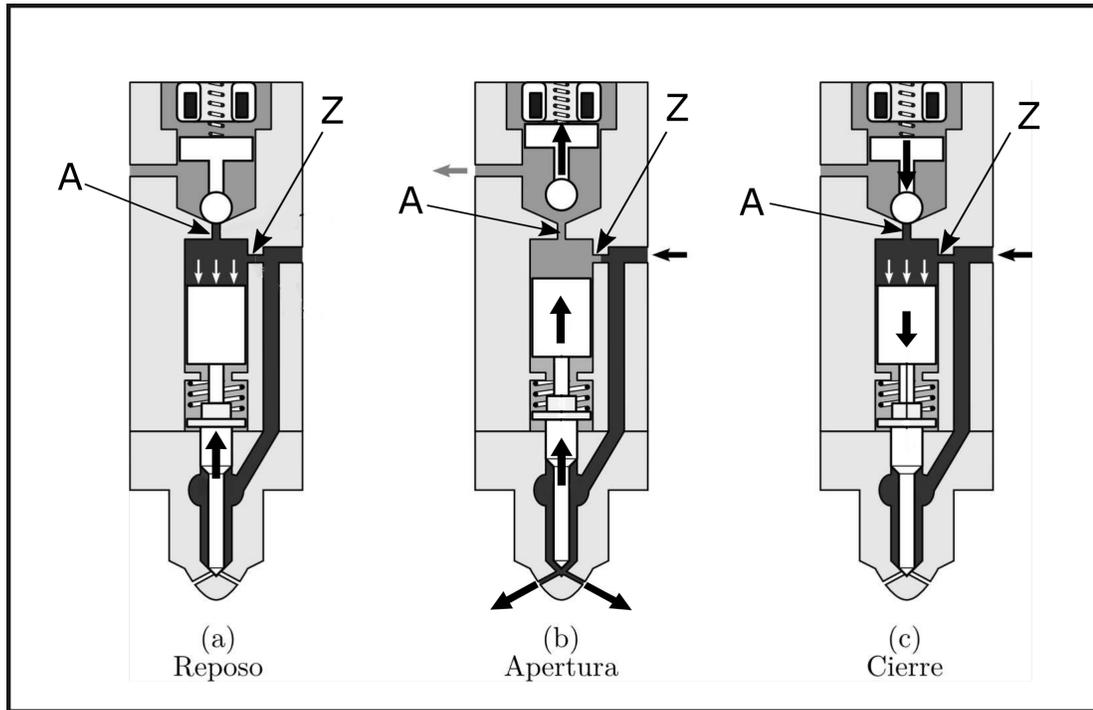


Figura 2.3: Funcionamiento del inyector diésel solenoide

2.2 PROCESO DE ATOMIZACIÓN

Para llevar a cabo el proceso de combustión, el combustible que es introducido a la cámara de combustión por medio del inyector debe mezclarse con el aire circundante y evaporarse. Para conseguir lo anterior, el primer paso es la atomización del combustible la cual consiste en pasar de una columna líquida a un chorro integrado por gotas lo más pequeñas posible, esto con el fin de que el proceso de evaporación sea más eficiente, mismo que ha sido estudiado ampliamente para diferentes aplicaciones [9, 10].

Desde que el combustible en fase líquida sale del orificio de la tobera, éste se encuentra bajo la acción conjunta de fuerzas que tratan de mantenerlo cohesionado, y fuerzas disruptivas, cuya influencia trata de producir perturbaciones en su estructura. Si estas perturbaciones llegan a superar en intensidad a las fuerzas cohesivas, se producen oscilaciones en la superficie del chorro que crecen, hasta ocasionar la ruptura del mismo. A este proceso se le denomina atomización primaria, si las gotas son lo suficientemente grandes, el balance entre fuerzas cohesivas y disruptivas seguirá estando desequilibrado, entonces se genera una segunda ruptura de estas gotas, hasta lograr un tamaño suficiente como para lograr el equilibrio. A este otro proceso se le denomina atomización secundaria.

El siguiente apartado se centra en el proceso de atomización primaria, en el cual se describen las diferentes maneras en que puede ocurrir el proceso, así como diferentes mecanismos que lo provocan.

2.2.1 REGÍMENES DE ATOMIZACIÓN

Existen varios regímenes de atomización dependiendo de la velocidad del chorro o, más exactamente del número de Reynolds [11, 12] los cuales pueden observarse en la Figura 2.4. Dichos regímenes son los siguientes:

- Régimen de Rayleigh, para muy bajas velocidades de inyección.
- Primer régimen inducido por interacción aerodinámica.
- Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica.
- Régimen de atomización, para altas velocidades de inyección.

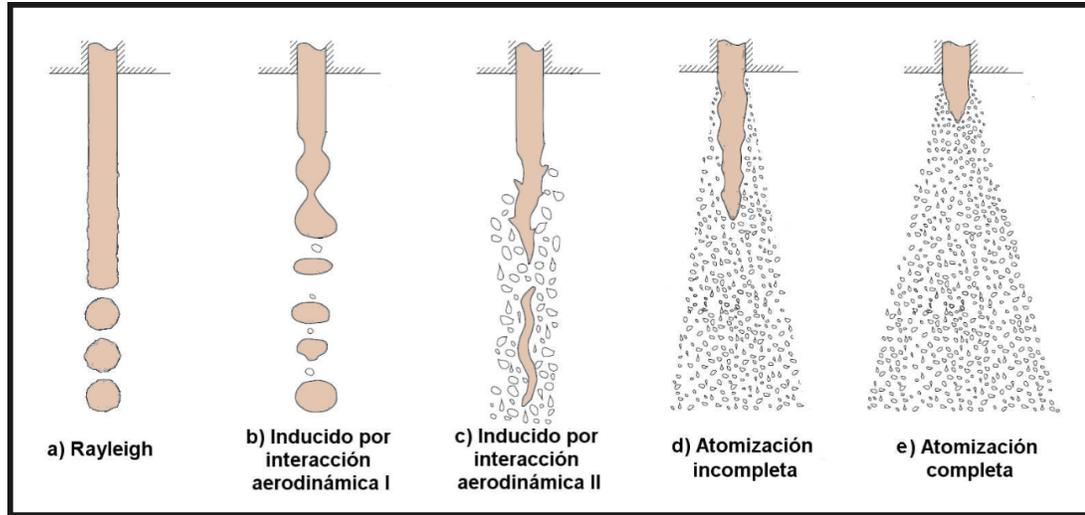


Figura 2.4: Regímenes de atomización

Régimen de Rayleigh

Este régimen se presenta a bajas velocidades del orden de 10 m/s, la atomización de la vena líquida se debe básicamente a la tensión superficial. Se crean deformaciones radiales axisimétricas por la interacción entre las perturbaciones iniciales en la superficie del chorro y las fuerzas de tensión superficial. Estas deformaciones aumentan hasta provocar la ruptura de la vena líquida en gotas de diámetro uniforme. Este comportamiento se puede observar en la Figura 2.4 (a).

Primer régimen inducido por la interacción aerodinámica.

Este régimen se presenta a bajas velocidades efectivas de inyección. En este caso, las pequeñas oscilaciones que se producen en el contorno del chorro crecen por el efecto de la tensión superficial hasta ocasionar la rotura del chorro. Las gotas así producidas son de tamaño uniforme y mayor al diámetro de salida del orificio de la tobera.

Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica.

Conforme aumenta la velocidad de inyección, las fuerzas aerodinámicas empiezan a ser preponderantes. La superficie cilíndrica de la vena líquida se cubre de

oscilaciones de pequeña escala generadas por la turbulencia a la salida del inyector pero también, y en gran medida, por la interacción aerodinámica. Estas perturbaciones transversales se ven amplificadas por las fuerzas aerodinámicas hasta llegar a la separación de gotas de combustible, como se observa en la Figura 2.4 (c). Aquí el proceso de atomización es mucho más eficiente, generándose a distancias más cercanas a la tobera, y produciendo gotas de menor diámetro del orden de la longitud de onda de las perturbaciones.

Régimen de atomización

En este régimen de atomización, la separación de las gotas ocurre cada vez más cerca del orificio a medida que aumenta la velocidad de inyección. A partir de una cierta velocidad, la atomización empieza justo en la salida del orificio. Se observa entonces un cambio en el comportamiento global del chorro que marca el inicio del régimen de atomización. No existe una clara discontinuidad respecto al régimen anterior pero debido a que las velocidades son más elevadas, otros mecanismos (turbulencia, cavitación, etc.) empiezan a aparecer. El papel exacto de estos mecanismos no es bien conocido y puede ser muy variable en función de las condiciones operativas. El aspecto del chorro mostrado en la Figura 2.4 (d y e) sería representativo del comportamiento real observado bajo estas condiciones.

2.2.2 MECANISMOS DE ATOMIZACIÓN DE UN CHORRO DIÉSEL

Las características del chorro diésel corresponden principalmente al régimen de atomización de la vena líquida no son totalmente conocidos, y al segundo régimen inducido por interacción aerodinámica, todo esto debido a las condiciones de operación, principalmente a las altas presiones de inyección.

Se cree que la atomización es debido a la superposición de diversos mecanismos independientes que, en función de las condiciones de inyección, pueden cobrar mayor o menor importancia relativamente.

Ruptura debido a la inestabilidad aerodinámica

Es probable que el crecimiento de las perturbaciones inestables en la superficie del chorro diésel se incremente por la mayor velocidad relativa entre el líquido y el gas ambiente. En ese caso, el mecanismo que controla el segundo régimen inducido por interacción aerodinámica se reproduce: las inestabilidades de las ondas de alta frecuencia presentes en la superficie de la vena, causadas por variaciones locales de presión en el gas y el líquido, forman finos ligamentos. El diámetro de la vena líquida va disminuyendo a medida que se aleja del inyector debido a esta pérdida de líquido. Los ligamentos se rompen por la acción de las fuerzas de tensión superficial y/o de la interacción aerodinámica con el gas ambiente. Este mecanismo ha sido estudiado teóricamente por varios autores: Reitz y Bracco [11, 12], basándose principalmente en el análisis lineal de Taylor. Para velocidades de inyección relativamente bajas, cerca del segundo régimen inducido por interacción aerodinámica, este análisis lineal concuerda bien con los resultados experimentales. Sin embargo, a medida que va aumentando la velocidad de inyección, la tasa de atomización y el ángulo de apertura del chorro diésel calculados son menores, poniendo de manifiesto que existen entonces otros efectos importantes que favorecen el proceso de atomización. Además, la teoría aerodinámica no considera la influencia de la geometría del orificio que tiene un efecto muy importante en el caso de la inyección diésel. En consecuencia, no es posible explicar el fenómeno de atomización de un chorro diésel únicamente por el análisis lineal de las inestabilidades en la superficie de la vena líquida.

Turbulencia

Autores como Ruiz [13], han descrito la turbulencia como una de las causas principales de la atomización. Esta turbulencia se genera en el sistema de inyección, particularmente en el orificio del inyector. Las velocidades turbulentas radiales están en este tramo contenidas por las paredes del inyector. A la salida del inyector, la componente radial de las fluctuaciones turbulentas expulsa combustible fuera de la vena líquida, provocando la atomización. Este mecanismo permite explicar la ato-

mización de chorros inyectados en el vacío y para los cuales no existe interacción aerodinámica con el ambiente. Por otro lado, es evidente que no es el único mecanismo de la atomización de un chorro diésel ya que es ajeno a las grandes variaciones de comportamiento del chorro diésel en función de la densidad del gas.

Cavitación

Otra de las causas importantes de la atomización está ligada a la cavitación, su influencia en el proceso puede ser de dos tipos. Por una parte, incrementa la turbulencia que, tal como se ha apuntado anteriormente, incrementa la atomización. Por otra parte, las burbujas de vapor presentes en el combustible hacen que ya en la salida del orificio se encuentre en flujo bifásico y además, inducirán discontinuidades en el líquido facilitando la división del chorro diésel en ligamentos y gotas. Este fenómeno está fuertemente influenciado por las características geométricas del inyector así como de las condiciones de trabajo.

Relajación del perfil de velocidad.

La modificación del perfil de velocidades del fluido justo a la salida del orificio es otro mecanismo que provoca la atomización de la vena líquida. Desaparecen los esfuerzos viscosos debido a la presencia de la pared del orificio y se produce inestabilidad debido a que el combustible cerca de la superficie de la vena líquida se acelera, dando lugar a la atomización. Además de los mecanismos expuestos previamente, existe cierto consenso en que la relación entre la densidad del combustible y la del aire ambiente es otro parámetro que controla el proceso de atomización [14].

2.3 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DIÉSEL

La caracterización del chorro diésel normalmente se estudia mediante dos puntos de vista.

- Macroscópico (características geométricas básicas del chorro diésel).
- Microscópico (características internas del chorro diésel).

En este apartado se caracteriza el comportamiento del chorro diésel desde un punto de vista macroscópico considerando para ello la penetración total, el ángulo y el área del chorro diésel los cuales pueden observarse en la Figura 2.5.

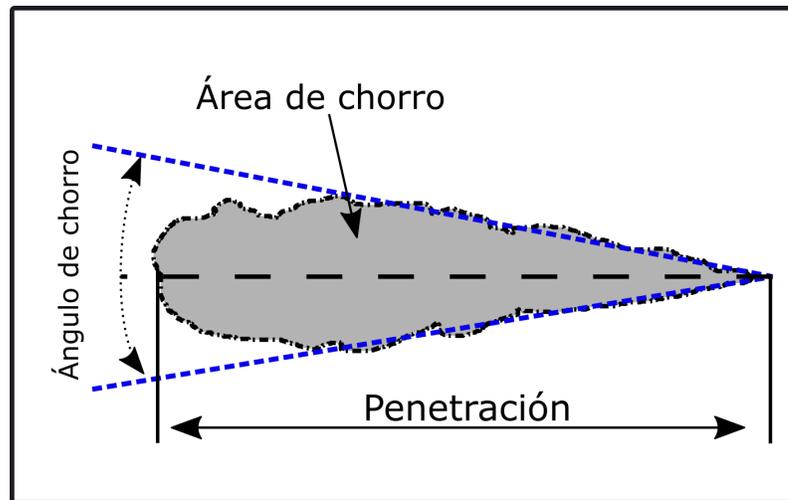


Figura 2.5: Morfología externa de un chorro diésel

Penetración del chorro diésel

Se define como la distancia que recorre el chorro en el seno del gas, y es un parámetro de suma importancia en el estudio del chorro diésel, ya que determina en gran medida tanto el proceso de mezcla aire-combustible, como el momento del choque del chorro diésel contra la pared interior del pistón. Existen un gran número de correlaciones para la penetración del chorro diésel en función del tiempo en

condiciones no evaporativas que involucran prácticamente los mismos parámetros. En general, en todas ellas se observa la dependencia de la penetración del chorro diésel con la diferencia entre la presión ambiente y la presión de inyección, las características de la tobera, la relación de densidad entre el gas ambiente y el combustible, el ángulo del chorro diésel, y por supuesto el tiempo [15].

Wakuri et al. [16] propusieron una correlación para la penetración del chorro diésel que relaciona las variables descritas con anterioridad, la cual se define de la siguiente manera:

$$S(t) = \frac{(2 \cdot C_d^2)^{\frac{1}{4}}}{\left(\tan\left(\frac{\theta}{2}\right)\right)^{\frac{1}{2}}} \cdot \left(\frac{\Delta p}{\rho_g}\right)^{\frac{1}{4}} \cdot \phi^{\frac{1}{2}} \cdot t^{\frac{1}{2}} \quad (2.1)$$

donde C_d es el coeficiente de descarga, θ es el ángulo de apertura del chorro, Δp es la diferencia entre la presión del medio y la presión de inyección, ρ es la densidad del gas, ϕ es el diámetro de la tobera y t es el tiempo transcurrido desde el inicio de la inyección. Se puede ver que cuanto mayor es el ángulo del chorro diésel, menor es la penetración del mismo. Esto indica la relación estrecha que existe entre la penetración y el ángulo de apertura del chorro diésel.

En épocas recientes, Desantes et al. [17], han relacionado el comportamiento del chorro diésel con parámetros que gobiernan el proceso de inyección, densidad del medio, diámetro del orificio de la tobera y la presión de inyección. Payri et al. [18], a partir de ensayos de visualización con una tobera multiorificio, han encontrado la siguiente correlación para el comportamiento de la penetración del chorro diésel en sus primeras etapas:

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

donde Δp es la diferencia entre las presión del medio y la presión de inyección, ρ es la densidad del gas, θ es el diámetro de la tobera y t es el tiempo transcurrido desde el inicio de la inyección.

Ángulo del chorro diésel

El ángulo del chorro diésel es un parámetro característico importante desde el punto de vista de la mezcla aire - combustible y se suele definir como el ángulo que forman dos rectas que se ajustan al contorno del chorro diésel, y que se cruzan en el orificio del inyector. Como la penetración del chorro diésel depende de la geometría del inyector y de las condiciones de inyección, así como de las propiedades del combustible y de las condiciones ambientales donde se inyecta. En el proceso de atomización, el chorro diésel se abre a la salida del orificio, y tras un pequeño transitorio, el ángulo del chorro diésel se mantiene constante a lo largo del tiempo. De los primeros trabajos en el que se ha tratado de estudiar el ángulo del chorro diésel corresponde al de Ranz [19], en el cual se llega a la siguiente expresión:

$$\tan\left(\frac{\theta}{2}\right) = \left(\frac{4 \cdot \pi}{A}\right) \cdot \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_a}} \cdot F_t \cdot \left(\frac{\rho_a}{\rho_f} \cdot \frac{\sigma^2}{\mu_f^2 \cdot v_{eff}^2}\right) \quad (2.3)$$

donde μ es la tensión superficial del combustible, μ_f es la viscosidad dinámica del combustible, v_{eff} es la velocidad efectiva de inyección, A es una constante que debe de ser ajustada dependiendo de la geometría del orificio, y F_t es una función obtenida de manera analítica por Taylor, cuyo valor límite es de 0.288 en condiciones reales de inyección. El cociente de densidades en la ecuación muestra un claro efecto de los fenómenos aerodinámicos a los que se ve sometido el chorro diésel.

Área del chorro diésel

El área del chorro diésel o de pulverización es un parámetro que pocos autores caracterizan y el cual tiene una gran relevancia, debido a que este representa la calidad de la mezcla aire-combustible, el área del chorro diésel se define después de haber determinado el contorno de pulverización y depende principalmente de las condiciones ambientales donde se inyecta. De los primeros trabajos en los que se estudió el área del chorro diésel corresponde a Delacourt [20], quien mediante el análisis de imagen determina el área del chorro diésel y lo compara con el modelo

presentado en la Ecuación 2.4 con el cual obtiene resultados muy cercanos a los medidos experimentalmente.

$$A = 4.351d^2 \left[\sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_g}} \frac{(t - t_0)}{d} \right] \theta \sin \left(\frac{\alpha}{2} \right) \frac{(4 + \pi\theta)}{(2 + \theta)^2} \quad (2.4)$$

donde d es el diámetro de la tobera, ΔP es la diferencia de presión entre la entrada y salida de la tobera, ρ_g es la densidad del gas, θ es el ángulo del chorro diésel y α es el ángulo de cono del chorro diésel.

Una vez que se han descrito los principales parámetros macroscópicos del chorro diésel, se continuará con el estudio de cómo éstos son afectados por los parámetros de inyección.

2.4 EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE INYECCIÓN SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA

Es conocido que el proceso de mezcla se ve afectado por los parámetros de inyección, debido a esto son muchas las investigaciones que se han realizado, estudiando el efecto que tienen la presión de inyección, la presión al interior de la cámara y el tiempo de apertura del inyector diésel solenoide, sobre los parámetros macroscópicos del chorro diésel (penetración, ángulo y área del chorro diésel).

Uno de ellas es el estudio realizado por Avinash et al. [21] quienes llevaron a cabo un estudio experimental donde utilizaron diésel y mezclas binarias y observaron el efecto que tiene los parámetros de inyección sobre los parámetros macroscópicos del chorro diésel. Para ello, emplearon presiones de inyección de 300, 500, 750 y 1000 bar, además de presiones al interior de la cámara de 20 y 40 bar.

Observando que la penetración del chorro diésel está significativamente influenciada por la presión de inyección del combustible y las presiones de la cámara de pulverización, lo cual se ilustra en la Figura 2.6.

Ellos observaron que mayores presiones de inyección provocan un desarrollo más rápido de la penetración del chorro diésel y el incremento de la presión dentro de la cámara provocó que una reducción en la penetración del chorro diésel, esto debido a la mayor resistencia al flujo entre las gotas de pulverización y el aire ambiente.

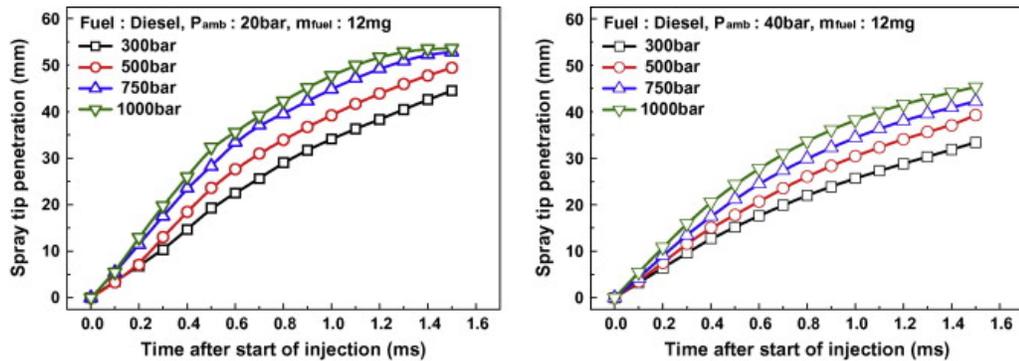


Figura 2.6: Evolución temporal de la penetración del chorro diésel para las presiones de inyección de 300, 500, 750 y 1300 bar, (a) presión en el interior de la cámara de 20 bar y (b) presión en el interior de la cámara de 40 bar

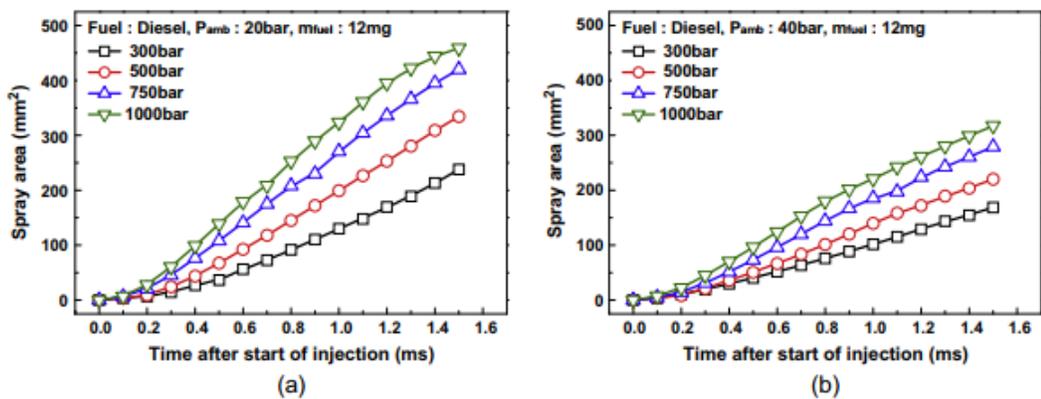


Figura 2.7: Evolución temporal del área del chorro diésel, para las presiones de inyección de 300, 500, 750 y 1300 bar, (a) presiones en el interior de la cámara de 20 bar y (b) presiones en el interior de la cámara de 40 bar

La Figura 2.7 muestra la evolución temporal del área del chorro diésel a di-

ferentes presiones de inyección y presiones al interior de la cámara, mostrando que conforme se incrementa la presión de inyección, se puede observar un incremento en el área del chorro diésel esto debido a un mayor impulso de las gotas de combustible desintegradas, mientras que el área se ve disminuida a mayores niveles de presión al interior de la cámara.

Por otro lado, Xiangang Wang et al.[22] estudiaron los efectos de los parámetros de inyección empleando biodiésel derivado de aceite de soya y palma comparándolo con un diésel fósil, observando que el ángulo del chorro diésel es insensible a la variación de la presión de inyección, pero que una alta densidad del ambiente al interior de la cámara proporciona una mayor resistencia al chorro de combustible inhibiendo su desarrollo axial de pulverización, lo que provoca un incremento en el ángulo del chorro diésel.

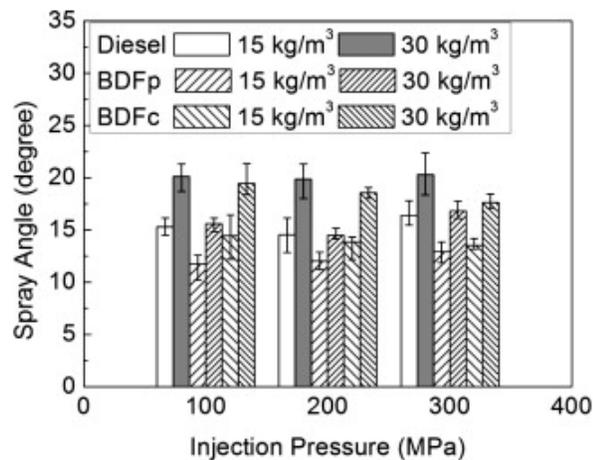


Figura 2.8: Ángulo del chorro diésel en función de la presión de inyección

2.5 EFECTOS DE LAS PROPIEDADES FÍSICAS DEL COMBUSTIBLE SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA

Balaji Mohan et al.[23] estudiaron las características del chorro de combustible utilizando un biodiésel derivado de aceite usado de cocina (B100) y su mezcla con

diésel (B20) y se compararon con un diésel mineral. Como se observa en la Figura 2.9 el combustible B100 mostró una mayor penetración que el B20 y el diésel, bajo los mismos parámetros de inyección, lo cual se debe al alto coeficiente de descarga desde la salida del orificio de la tobera y a la pobre atomización que conduce a gotas más grandes debido a su alta viscosidad [24]. Por otro lado, en la Figura 2.10 se ilustra la evolución temporal del ángulo del chorro diésel para diferentes combustibles, observando que el ángulo del chorro diésel para los combustibles diésel y la mezcla B20 fueron similares bajo las mismas condiciones de inyección, por otro lado el combustible B100 mostró un ángulo del chorro diésel menor, lo cual puede deberse a su alta viscosidad.

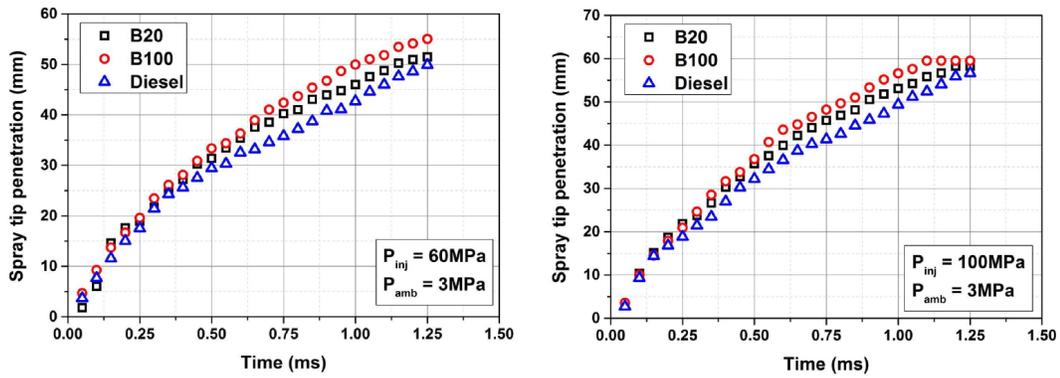


Figura 2.9: Evolución temporal de la penetración del chorro diésel para diferentes combustibles

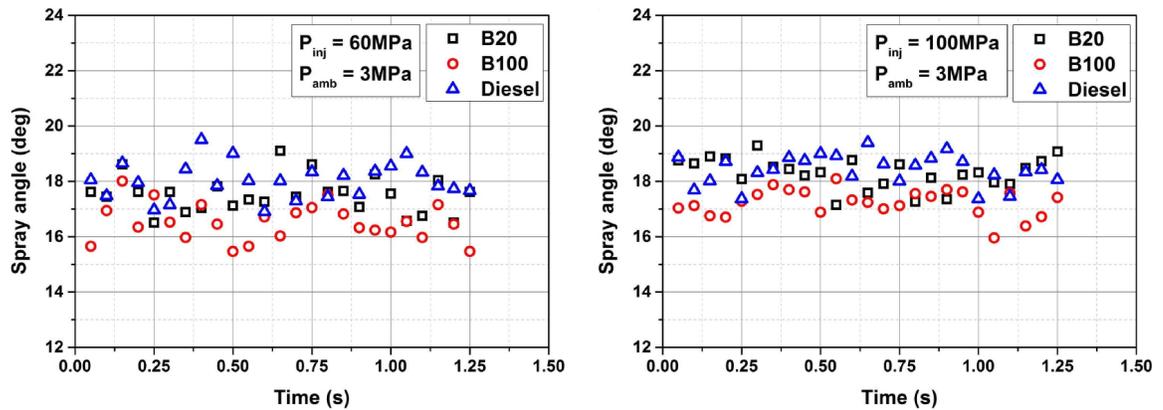


Figura 2.10: Evolución temporal del ángulo del chorro diésel para diferentes combustibles

Por otra parte, Agarwal et al [25], estudiaron el flujo en la tobera y las características de pulverización para el biodiésel derivado de Karanja y de Jatropha, comparándolos con un diésel mineral, además de reportar las principales propiedades físicas y químicas de éstos como se observa en la Tabla 2.1. Ellos observaron que la densidad y la viscosidad juegan un papel crítico y éstos son los principales factores que interviene en el flujo a través del orificio de la tobera. El combustible diésel posee una viscosidad menor a la de los otros combustibles estudiados, lo cual resulta en mayores velocidades. A medida que el contenido de biodiésel aumento en los combustibles de prueba de 5 a 100, la velocidad a la salida del orificio de la tobera disminuyó. Altas velocidades de pulverización son deseables para una mejor combustión, ya que mejoran la atomización del combustible dentro de la cámara de combustión. Para el estudio de los parámetros macroscópicos, utilizaron una cámara a volumen constante en condiciones no evaporativas y condiciones de un motor típicas del final de la carrera de compresión, excepto por la temperatura y turbulencia. En estos experimentos observaron que el biodiésel de Karanja obtuvo los parámetros de pulverización mayores.

Tabla 2.1: Propiedades físicas de los combustibles.

Propiedades físicas de los combustibles			
Combustible	Viscosidad cinemática @ 40° C (mm^2/s)	Densidad @ 30° C (kg/m^3)	Poder calorífico (MJ/kg)
Diésel	2.78	831	43.8
JB100	6.87	897	37.9
KB100	5.65	860	38.5

2.6 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE MEZCLA BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO

Con el uso de estrategias de inyección múltiple, el proceso de inyección en cada ciclo del motor, el cual tradicionalmente consiste en un solo evento, se divide en dos o más partes. Existen diferentes tipologías dentro de las estrategias de inyección múltiple atendiendo a los diferentes parámetros que las definen: números de eventos de inyección, posición relativa entre los diferentes eventos de inyección y duración de los mismos, entre otros. No obstante, se pueden distinguir tres configuraciones principales de estrategia de inyección múltiple y las cuales se describen a continuación.

- *Estrategia de inyección piloto:* consiste en partir la inyección en dos eventos, en el primero de los cuales se introduce una pequeña masa en el interior del cilindro y en el segundo evento de inyección se introduce la cantidad principal de combustible.
- *Estrategia de post-inyección:* al igual que en el caso anterior, consiste en partir la inyección en dos eventos. No obstante, en este caso el evento de inyección que introduce la masa de combustible pequeña se introduce después del evento principal en que se introduce la mayor parte de la masa de combustible.
- *Estrategia de inyección partida:* es una estrategia de inyección en la que el total de la masa de combustible inyectada se parte en dos o más eventos que no pueden ser considerados como inyecciones piloto o post por el tamaño.

En la Figura 2.11 se pueden distinguir las tres configuraciones, las cuales han sido descritas anteriormente, combinado estas tipologías básicas de inyección múltiple se pueden generar infinitas secuencias diferentes de inyección.

La nomenclatura usada para definir la secuencia de inyección múltiple se ilustra en la Figura 2.12. De forma simplificada una estrategia de inyección simple se puede

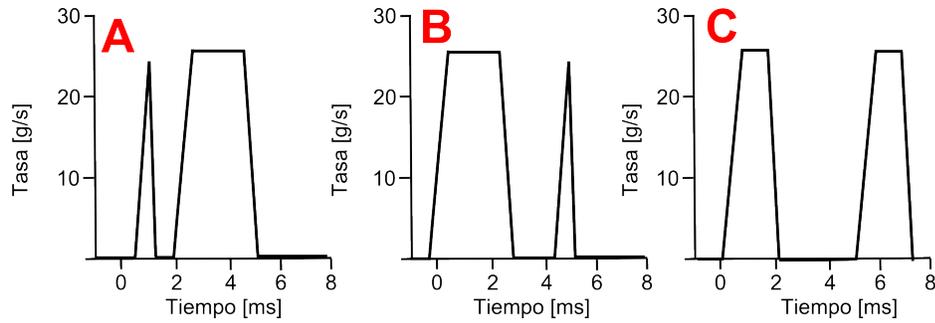


Figura 2.11: Esquema de masa inyectada frente a tiempo para las tipologías básicas de inyección múltiple: a) estrategia de inyección piloto, b) estrategia de post-inyección y c) estrategia de inyección partida

definir únicamente conociendo el principio de la inyección y la duración de la misma. Por el contrario, con las estrategias de inyección múltiple el número de grados de libertad a la hora de definir la secuencia crece con el número de pulsos (eventos de inyección). Además, aparte del principio de la inyección (Start of Injection, SoI) y de la duración de cada pulso, se tiene que definir el tiempo entre cada dos pulsos consecutivos (Dwell time), es decir, el tiempo entre el final de una inyección y el inicio de la consecutiva.

Cuando se realizan estrategias de inyección múltiple aparece un fenómeno adicional respecto a una inyección simple: la interacción entre pulsos. Este fenómeno será más relevante cuanto más cerca estén entre sí los pulsos de inyección.

La interacción entre pulsos implica que las condiciones en cámara sobre las que se inyecta un pulso son diferentes a las correspondientes al pulso de inyección precedente. En una estrategia de inyección partida, la primera inyección no sólo crea movimiento en el gas ambiente en la dirección axial en la que es inyectada, sino que también genera turbulencia, con lo que las condiciones ambientales sobre las que se inyecta el chorro diésel de la segunda inyección son diferentes.

Si adicionalmente el ambiente fuese reactivo cabe destacar dos circunstancias: por un lado, el nivel de oxígeno que se encuentra en el chorro diésel de la segunda inyección es menor, ya que parte del mismo ha sido englobado por el chorro diésel de

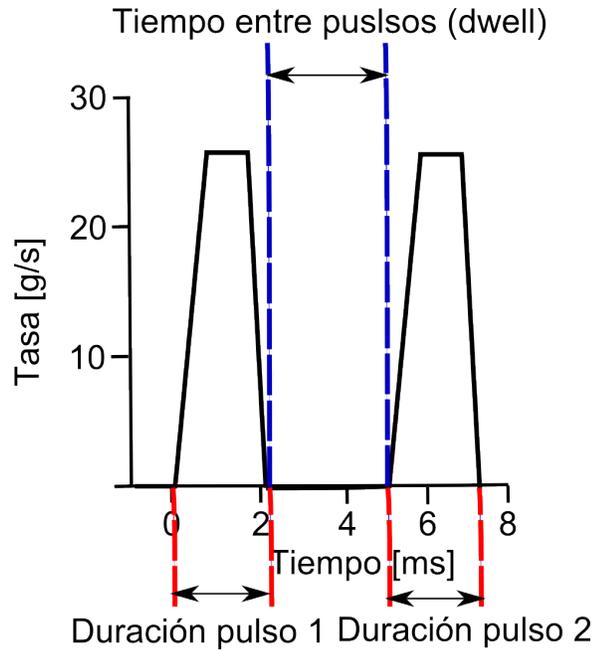


Figura 2.12: Esquema de los diferentes parámetros que afectan la definición de una estrategia de inyección múltiple. Para este caso se ha presentado una estrategia de inyección dividida

la primera inyección. Por otro lado, el nivel de temperatura sobre el que se inyecta el segundo pulso es mayor, debido a la combustión de la primera inyección.

Como lo descrito por Amagai et al.[26] quienes encontraron que el partir la inyección reducía el tiempo de retraso al autoencendido y ayudaba a estabilizar la combustión como resultado de aumentar el proceso de mezcla. Otra posible explicación para la reducción del tiempo de retraso con el uso de estrategias de inyección múltiple es el hecho de que la inyección se interrumpe, retrasando parte de la inyección del combustible total. Una parte mas pequeña de combustible se inyecta inicialmente, lo que significa que se necesita una menor energía para provocar la evaporación, esto produce un efecto de enfriamiento menor, obteniendo una temperatura local mayor.

Por otro lado, Renete et al.[27, 28] realizaron investigaciones numéricas con KIVA-3V para analizar los efectos del nivel de pre-turbulencia e inyecciones partidas

sobre el tiempo de retraso y la combustión en una cámara de volumen constante. Investigaron la posibilidad de que al realizar una estrategia de inyección partida, la pre-inyección pudiera alterar el nivel de turbulencia de la combustión principal. Para ello variaron los tiempos de separación entre los pulsos, la masa inyectada en cada pulso y la forma de la tasa de inyección.

Otro efecto relevante de la aplicación de estrategias de inyección múltiple, principalmente la estrategia de inyección piloto, es la reducción del ruido inducido por la combustión [29], el cual es un problema para los motores Diesel en relación a sus competidores, ya que la intensidad del ruido es proporcional al pico máximo de la tasa de liberación de energía durante la fase de premezcla [30, 31].

La combustión de la inyección piloto, incrementa la presión y temperatura en el cilindro así como la abundancia de radicales activos, lo que resulta en una reducción del tiempo de retraso al autoencendido para el combustible inyectado en el pulso posterior a la inyección piloto. De tal forma que si se reduce el tiempo de autoencendido, la cantidad de combustible que se quema en premezcla del pulso posterior a la inyección piloto, se reduce y el pico máximo de calor liberado durante la citada fase de la combustión también se ve reducido.

El principal fenómeno físico asociado al cambio en las condiciones ambientales producido por la interacción entre los pulsos de una inyección múltiple se da durante el proceso de atomización y está relacionado con las diferencias de la resistencia del aire a la penetración de las gotas de combustible. El primer pulso se inyecta sobre un ambiente apenas sin movimiento, el segundo pulso se inyecta sobre el flujo de gas que ha inducido la primera inyección y que conlleva una gran cantidad de movimiento. Por tanto, la velocidad relativa entre el chorro diésel y el gas para el segundo pulso debe ser inferior al del primer pulso. Este fenómeno se ve potenciado cuanto menor sea la separación entre dos pulsos consecutivos, es decir, cuanto mayor sea la interacción.

Dichos cambios en la velocidad relativa entre el ambiente y el chorro diésel, dan lugar a variaciones en la penetración del chorro diésel y en el diámetro de las gotas de combustible, y por tanto en el englobamiento del aire. El segundo chorro diésel puede penetrar una mayor distancia, más rápido y con un tamaño de gota mayor que el primer chorro diésel, por lo que su englobamiento, a priori, es peor, debido a la mencionada bajada en la resistencia del aire [32, 33].

Cuando el combustible se inyecta a altas velocidades en un ambiente relativamente parado, se genera turbulencia. Dicho incremento de turbulencia hace que los procesos de mezcla y evaporación se mejoren, procesos que son considerados como muy importantes para el buen desarrollo del proceso de combustión por difusión. Con la aplicación de una estrategia de inyección múltiple, como ya es bien conocido, el proceso de inyección se interrumpe temporalmente entre los diferentes pulsos de las inyecciones que conforman la estrategia de inyección múltiple.

Zhang et al.[34, 35] encontraron que si la separación entre pulsos de una inyección partida es suficientemente grande como para permitir que la mayor parte del combustible de la primera inyección se haya evaporado antes de que el segundo pulso empiece, se genera una mezcla rica de vapor-gas en la región en la que no existe impacto de pared, mientras que por el contrario, se forma una zona relativamente pobre en la región de impacto. El chorro diésel del segundo pulso mueve esta región rica aguas abajo, resultando en una distribución más uniforme de dosados.

Ricaud et al. [36] investigaron una estrategia de inyección piloto denominada pre-inyección. En comparación con una estrategia piloto convencional, la pre-inyección implica un pulso de inyección (antes de la inyección principal) de duración corta y con un tiempo de separación entre el pulso pre y principal muy pequeño. Esta estrategia proporciona un ligero incremento en el nivel de ruido comparado con una estrategia de inyección piloto convencional pero con una clara mejora en lo que respecta a emisiones y consumo. Adicionalmente, al extender el estudio a dos pre-inyecciones, consiguieron reducir los niveles de ruido inducido de la combustión

por debajo de lo esperado en una estrategia piloto convencional, manteniendo las mejoras en emisiones contaminantes y consumo de combustible.

Park et al. [37], caracteriza el proceso de mezcla en un motor Diesel, utilizando una estrategia de inyección dividida, de forma experimental y numérica, comparando los parámetros macroscópicos del chorro diésel líquido de una inyección simple con los de una estrategia de inyección dividida, observando mayores velocidades para el chorro diésel de la segunda inyección, por lo tanto mayores valores de penetración de éste y menores diámetros de las gota de combustible para la estrategia de inyección dividida en comparación con una inyección simple.

Suh et al. [38], mediante la variación de la masa de inyección y el tiempo de inyección de las estrategias de inyección piloto y dividida, observa el efecto sobre el proceso de atomización y la reducción de las emisiones de escape (NO_x , HC Y CO), esto mediante la penetración de la punta del chorro diésel y el diámetro medio Sauter (SMD). Concluyendo que el proceso de atomización con el uso de estrategias de inyección múltiple puede ser mejorado controlando la masa de inyección, el Dwell time o aumentando la presión de inyección todo esto con el uso de un combustible DME (Dimethyl Ether).

Chang Sik Lee et al. [39], presenta una investigación experimental y numérica sobre las características de pulverización y combustión en un motor Diésel common-rail con una estrategia de inyección dividida, cada una de 5 mg, con una presión de inyección de 50 MPa y una presión al interior de la cámara de 2 MPa, en este estudio se varia el dwell time, teniendo 2.4 ms, 3.6 ms y 4.8 ms. Observando que la punta de la pulverización de la inyección simple y el primer evento de la inyección múltiple se desarrollan de la misma manera. Sin embargo, el desarrollo de la penetración del chorro diésel para las segundas inyecciones de la inyección múltiple, tuvo un incremento en la velocidad del desarrollo de éstos, lo cual es resultado del aumento del flujo de cantidad de movimiento causado por la combinación de las velocidades de la primera y segunda inyección.

Como se mencionó anteriormente las estrategias de inyección múltiple presentan un elevado número de grados de libertad sobre los que actuar: número de pulsos en los que se divide la masa inyectada, distancia entre pulsos (Dwell time), duración de cada pulso y presión de inyección. Adicionalmente, al sistema de inyección en los motores Diesel actuales existen una gran cantidad de variables que se han de gestionar, como lo son: la tasa de EGR, la presión de sobrealimentación, entre otras variables. La optimización de estas variables para conseguir mejores prestaciones de motor, junto con las menores emisiones contaminantes posibles, así como el menor consumo de combustible, es una tarea complicada que ha sido objeto de estudio de algunos autores.

Como lo realizado por Hiroyasu et al. [40], presenta un código computacional que incorpora un algoritmo genético para resolver problemas de optimización multiobjetivo, de tal forma que muestra la posibilidad de reducir las emisiones contaminantes sin incremento en el consumo de combustible, únicamente, optimizando la tasa de EGR y las estrategias de inyección múltiple.

Otro trabajo de optimización utilizando estrategias de inyección múltiple es lo presentado por Liu et al. [41], quienes investigaron mediante simulaciones numéricas la optimización de estrategias de inyección múltiple junto con otros parámetros de motor como son el swirl, la tasa de EGR y la presión de sobrealimentación de un motor HSDI (por sus siglas en ingles, *High Speed Direct Injection*) en cuanto a emisiones y prestaciones a partir del uso del código comercial KIVA-3V acoplado con un algoritmo genético, obteniendo como resultado que con estrategias de inyección múltiple, la combustión diésel tradicional localizada cerca del PMS (Punto Muerto Superior), proporciona una pequeña ventaja en cuanto a prestaciones respecto a nuevos modos de combustión.

CAPÍTULO 3

PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

El presente capítulo está compuesto por cuatro apartados: en el primer apartado, se realiza una breve síntesis de la revisión bibliográfica y se ponen de manifiesto las principales áreas de oportunidades. En el segundo apartado se describe la hipótesis del presente trabajo. En el tercer apartado se describe el objetivo general de la tesis y los objetivos específicos. Finalmente, en el último apartado se describe la metodología general de la tesis.

3.1 SÍNTESIS DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

El uso generalizado del motor Diesel ha causado problemas de contaminación del aire. Esto se debe a sus mayores descargas de óxidos de nitrógeno (NOx), partículas en suspensión (PM) y humo en comparación con el de un motor de gasolina [42, 43, 44]. Para minimizar este impacto, el esfuerzo de muchas investigaciones se ha enfocado en el estudio de las estrategias de inyección, como son la estrategia de post-inyección, la estrategia de inyección dividida, y la estrategia de inyección múltiple.

Por ello, existen diversas investigaciones enfocadas en el estudio y comprensión de los fenómenos fisicoquímicos que ocurren durante el proceso de mezcla. Éstos se centran específicamente en los parámetros macroscópicos del chorro del combustible es decir penetración, área y ángulo del chorro diésel, los cuales caracterizan el proceso de mezcla y como éstos se ven afectados al variar la presión de inyección, la presión en el interior de la cámara y las propiedades físicas del combustible.

Con el uso de estrategias de inyección múltiple, el proceso de inyección se divide en dos o más partes, haciendo evidente el pensar, que el proceso de combustión todavía es más complejo que para el caso de una estrategia de inyección simple, ya que aparece un fenómeno adicional: la interacción entre los diferentes procesos físicos asociados a cada pulso que conforman la estrategia de inyección múltiple. Dicha interacción es más evidente cuanto más cerca entre sí estén colocados los pulsos, e implica que las condiciones ambientales sobre las que se inyecta un pulso son diferentes a las correspondientes al pulso de inyección precedente.

Observando la literatura revisada se puede decir que la mayor parte de los estudios realizados con estrategias de inyección múltiple pertenecen a un plano tecnológico, es decir son estudios de optimización del motor para conseguir las mejores prestaciones junto con menores emisiones contaminantes posibles, así como el menor consumo de combustible. Este tipo de enfoque es importante, en gran parte debi-

do a la problemática asociada a la gestión del creciente número de variables que intervienen al realizar estrategias de inyección múltiple y en parte por el necesario cumplimiento de una normativa anticontaminante cada vez más restrictiva, la cual ha sido uno de los criterios de diseño preponderante para los motores Diesel.

Algunos autores han estudiado los fenómenos físicos involucrados en las estrategias de inyección múltiple de manera teórica y experimental, como es el caso de Park et al. [37], quien caracteriza el proceso de mezcla en un motor Diesel, utilizando una estrategia de inyección dividida, de forma experimental y numérica, comparando los parámetros macroscópicos del chorro diésel líquido de una inyección simple con los de una estrategia de inyección dividida, observando mayores velocidades para el chorro diésel de la segunda inyección, por lo tanto mayores valores de penetración del chorro diésel y menores diámetros de gotas de combustible para la estrategia de inyección dividida en comparación con una inyección simple.

Por otro lado, Chang et al. [39], presenta una investigación experimental y numérica sobre las características del chorro diésel y la combustión, utilizando una estrategia de inyección dividida, observando mayores valores de la penetración del chorro diésel para la segunda inyección. En cuanto a las emisiones contaminantes, con el uso de la estrategia de inyección dividida, se observa una reducción en las emisiones de NO_x.

Todo lo anteriormente expuesto evidencia que hasta el momento, la mayoría de los trabajos con el uso de estrategias de inyección múltiple están limitados a la optimización de prestaciones del motor y reducciones de las emisiones contaminantes, dejando a un lado las características del proceso de mezcla, las cuales tienen una gran influencia en el proceso de combustión y consecuentemente en las características de las emisiones contaminantes.

3.2 HIPÓTESIS

Mediante la variación de las condiciones de operación (presión de inyección y presión en el interior de la cámara) y el uso de una estrategia de inyección piloto, se es capaz de mejorar el proceso de mezcla en un motor Diesel.

3.3 OBJETIVOS DE LA TESIS

Objetivo general

Profundizar en el estudio del proceso de mezcla, y como éste se ve afectado por la variación de los parámetros de inyección y el uso de una estrategia de inyección piloto, esto a través de la determinación de los parámetros macroscópicos del chorro diésel, es decir, penetración, área y ángulo del chorro diésel.

Con el fin de alcanzar el objetivo general previamente descrito, se ha establecido los siguientes objetivos específicos.

- Diseñar un circuito de control, para inyectores diésel solenoide capaz de operar bajo una inyección simple y estrategias de inyección múltiple.
- Estudiar el efecto de los parámetros de inyección, sobre el proceso de mezcla.
- Estudiar el efecto de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla mediante la variación del Dwell time.

3.4 METODOLOGÍA GENERAL DE LA TESIS

Desarrollo de un circuito de control para inyectores diésel solenoide

Diseño de un circuito de control para inyectores diésel solenoide el cual sea capaz de operar tanto en una configuración de inyección simple como en una configuración para estrategias de inyección múltiple.

Para llevar a cabo esto, se caracterizó eléctricamente el inyector diésel solenoide y se realizaron simulaciones del circuito de control, con la finalidad de encontrar los valores adecuados para los pulsos de pre-polarización, apertura y mantenida. Seguidamente, para validar la precisión y adaptabilidad del modelo del circuito de control para inyectores diésel solenoide, éste se reprodujo en PCB (por sus siglas en inglés, *Printed Circuit Board*) y se probó en el inyector diésel solenoide utilizado en el presente trabajo.

Efectos de los parámetros de operación sobre el proceso de mezcla

Una vez puesto a punto el circuito de control para inyectores diésel solenoide, éste se utilizó en la configuración de inyección simple, con la finalidad de profundizar en el estudio del efecto de los parámetros de operación sobre el proceso de mezcla, lo anterior enriqueció la presente investigación y fue un indicador del correcto funcionamiento de la instalación experimental.

Efectos de la presión de inyección sobre el proceso de mezcla: para este estudio se fijó una presión en el interior de la cámara de 3 MPa, en cuanto a la presión de inyección se utilizaron tres niveles 50, 80, y 100 MPa.

Efectos de la presión en el interior de la cámara: para éste estudio se fijó una presión de inyección de 100 MPa, en cuanto a la presión en el interior de la cámara se utilizaron tres niveles 2, 3, y 4 MPa.

Análisis de los resultados

Una vez que se realizan los experimentos descritos anteriormente, se analizó a detalle el comportamiento de los parámetros macroscópicos: penetración, ángulo y área del chorro diésel. Las imágenes obtenidas de los eventos de inyección se procesaron para obtener los parámetros macroscópicos antes mencionados, esto a través de utilizar un código desarrollado en el software MATLAB.

Efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla

Para este estudio se utilizó el circuito de control para inyectores diésel solenoide pero ahora en su configuración de estrategias de inyección múltiple, con la finalidad de estudiar los efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla mediante la variación del Dwell time, se utilizó un nivel de presión de inyección de 100 MPa, una presión en el interior de la cámara de 3 MPa y los siguientes Dwell time: 1.5, 1.7, 2.0, 2.2, 2.5 y 3.5 ms.

El combustible fue inyectado en la maqueta de visualización a volumen constante, modificando las condiciones de operación descritas anteriormente y se obtuvieron imágenes de longitud líquida de los eventos de inyección.

Análisis de los resultados

Al igual que en el estudio sobre los efectos de los parámetros de operación sobre el proceso de mezcla, se analizó a detalle el comportamiento de los parámetros macroscópicos: penetración, ángulo y área del chorro diésel. Las imágenes de longitud líquida obtenidas de los eventos de inyección se procesaron para obtener los parámetros macroscópicos antes mencionados, esto a través de utilizar un código desarrollado en el software MATLAB.

CAPÍTULO 4

HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

A lo largo de este capítulo se presentan las herramientas experimentales y teóricas utilizadas en la realización de este estudio. El presente capítulo se divide en tres secciones: en el apartado “Maqueta de visualización a volumen constante”, se describe la instalación en la cual se llevó a cabo el trabajo experimental del presente trabajo. En la sección “Técnica Óptica: Iluminación Directa por Dispersión Mie” se detalla la técnica óptica utilizada y los equipos involucrados para llevarla a cabo. Finalmente, el procedimiento y el software utilizado para el tratamiento de las imágenes de longitud líquida obtenidas se describe en la sección “Procesamiento de imágenes”.

4.1 MAQUETA DE VISUALIZACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

Con el fin de estudiar los fenómenos físicos a los que se ve sometido el chorro de combustible en el proceso de inyección, esto a través de los parámetros macroscópicos del chorro diésel, se hace uso de la maqueta de visualización a volumen constante, la cual se encuentra en el en el Laboratorio de Fenómenos de Transporte, el cual forma parte de los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) de la Facultad de Mecánica y Eléctrica en la Universidad Autónoma de Nuevo León. Esta instalación está compuesta principalmente por una cámara de visualización a volumen constante y un sistema de inyección [45]. En la Figura 4.1 se puede observar ésta y sus componentes en la Tabla 4.1.

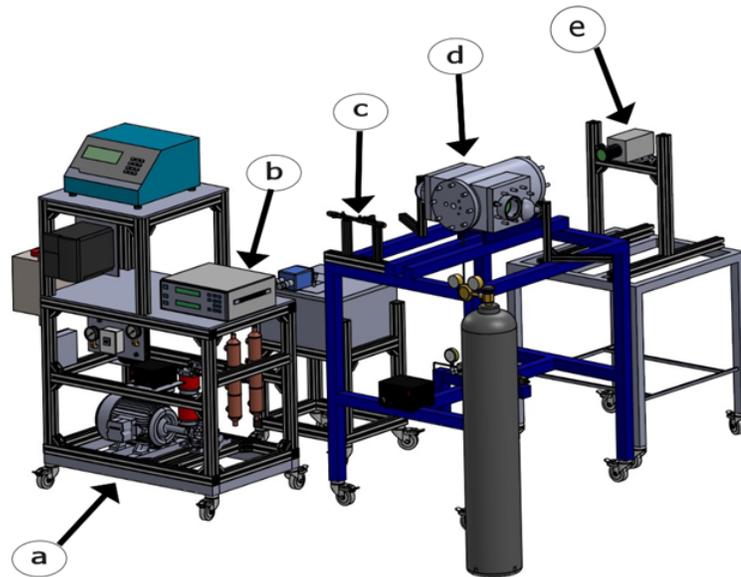


Figura 4.1: Maqueta de visualización a volumen constante

Tabla 4.1: Maqueta de visualización a volumen constante

Elemento	Nomenclatura
Bomba de alta presión	a
ECU	b
Common-raíl	c
Cámara de visualización a volumen constante	d
Cámara de alta velocidad	e

4.1.1 CÁMARA DE VISUALIZACIÓN A VOLUMEN CONSTANTE

La cámara de visualización a volumen constante la cual se observa en la Figura 4.2, mediante sus accesos ópticos y técnicas de visualización y adquisición de imágenes, permite observar el proceso transitorio de inyección y atomización del combustible, simulando las condiciones de presión al interior de la cámara de combustión de un motor real, esto mediante la carga de N_2 al interior de la cámara.

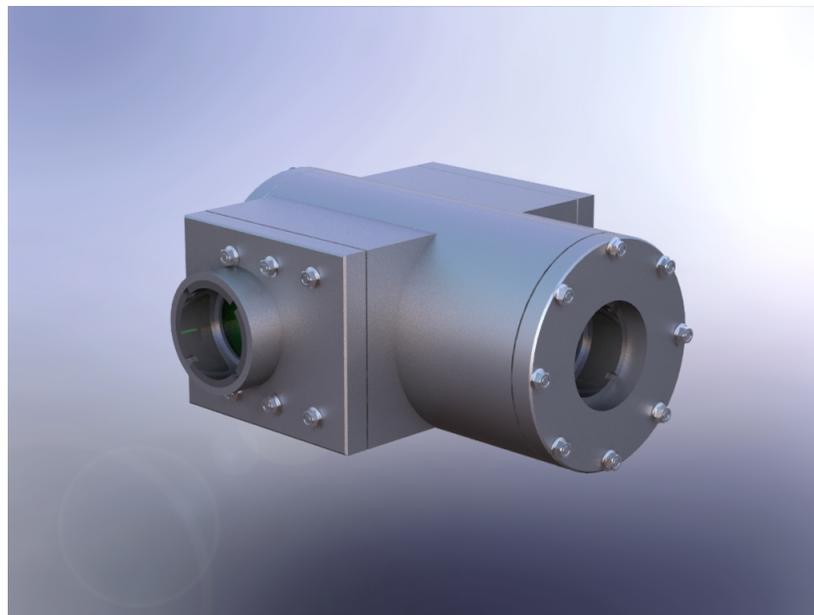


Figura 4.2: Cámara de visualización a volumen constante

La cámara de visualización a volumen constante está dividida en tres partes, la primera de ellas una cámara cilíndrica, la cual cuenta con una longitud de 40.32

cm, un diámetro de 23.50 cm y un espesor de 6.0 cm, la segunda parte se compone de dos placas laterales de 24.3 cm de longitud, 20.32 cm de altura y por último dos tapas una frontal y otra trasera, cada una con 23.50 cm de diámetro y un espesor de 5.08 cm y 9.61 cm, respectivamente.

Adicionalmente cuenta con tres accesos ópticos, dos de ellos ubicados en las placas laterales y otro en la tapa frontal del cilindro, los cuales tienen un diámetro de 8.0 cm y están compuestos por ventanas de zafiro soportando una presión máxima de 18 MPa. En la tapa trasera se encuentran ubicados el inyector diésel, la alimentación de nitrógeno, un sensor de temperatura y un sensor de presión con los cuales se miden las condiciones a las que se encuentra el gas circundante dentro de la cámara. La lectura de estos sensores se envía a un sistema de control y adquisición de datos CompactRio, para después ser tratada y monitorizada mediante un programa realizado en Labview, con interfaz gráfica de usuario.

La cámara de visualización a volumen constante cuenta con una salida para gases que se encuentra dentro, está conecta con una conexión de acero de cuatro vías de acceso. La conexión consta de un acceso superior que es donde se conecta la salida de la cámara, y otros tres accesos laterales en los que se encuentran conectados una válvula de alivio, una válvula de aguja y un manómetro.

4.1.2 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

En la Figura 4.3 se observa el esquema del sistema de inyección diésel, mientras que en la Tabla 4.2 se encuentran enumerados los componentes que conforman éste. Éste está compuesto por dos circuitos, uno de baja presión el cual está integrado por un depósito de combustible, un depósito de residuos, dos filtros de combustible, bomba de baja presión, intercambiador de calor y un regulador de presión, mientras que el circuito de alta presión su principal elemento es una bomba de alta presión la cual alcanza presiones de hasta 130 MPa, un motor eléctrico, variador de frecuencia y

Tabla 4.2: Componentes del sistema del inyección diésel common-rail

1 Depósito de combustible	8 Motor eléctrico
2 Purgador	9 Common-rail
3 Filtro de combustible	10 Pinza amperimétrica
4 Bomba de baja presión	11 Tanque de N₂ y regulador de presión
5 Intercambiador de calor	12 Cámara de visualización
6 Filtro de combustible	13 Cámara de alta velocidad
7 Bomba de alta presión CP1	14 Inyector diésel solenoide

4.2 TÉCNICA ÓPTICA: ILUMINACIÓN DIRECTA POR DISPERSIÓN MIE

Con el fin de caracterizar el proceso de mezcla a través de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible, se utiliza la técnica de iluminación directa por dispersión Mie, la cual consiste en la obtención de imágenes del chorro diésel líquido, el cual es iluminado directamente y continuamente por dos lámparas de halógeno durante el evento de inyección [20, 46]. En la Figura 4.4 se muestra la disposición de los componentes principales para la aplicación de la técnica experimental Iluminación directa por dispersión Mie.

En la Figura 4.5 se muestra el esquema del sistema de adquisición de imágenes, el cual consiste en una cámara digital de alta velocidad, modelo Motion PRO X4 CMOS, con una capacidad de adquisición de 5130 imágenes/segundo, sensor tipo CMOS y un rango dinámico de 8 bits. Ésta cuenta con un objetivo Nikon 60 mm. El sistema de iluminación está compuesto por dos lámparas halógenas con una capacidad de 100 W y un voltaje de 12 V. La sincronización de la adquisición de imágenes del chorro diésel líquido se lleva a cabo mediante la detección de forma automática del pulso de corriente que llega a la bobina del inyector diésel solenoide, la cual es medida mediante una pinza amperimétrica modelo i310s de la marca Fluke. La señal

generada por la pinza es analizada por un sistema de adquisición de datos y control cRio modelo 9074, el cual detecta automáticamente el flanco de subida y envía los pulsos de sincronización a la cámara de alta velocidad con lo cual comienza la adquisición de las imágenes del chorro diésel líquido.

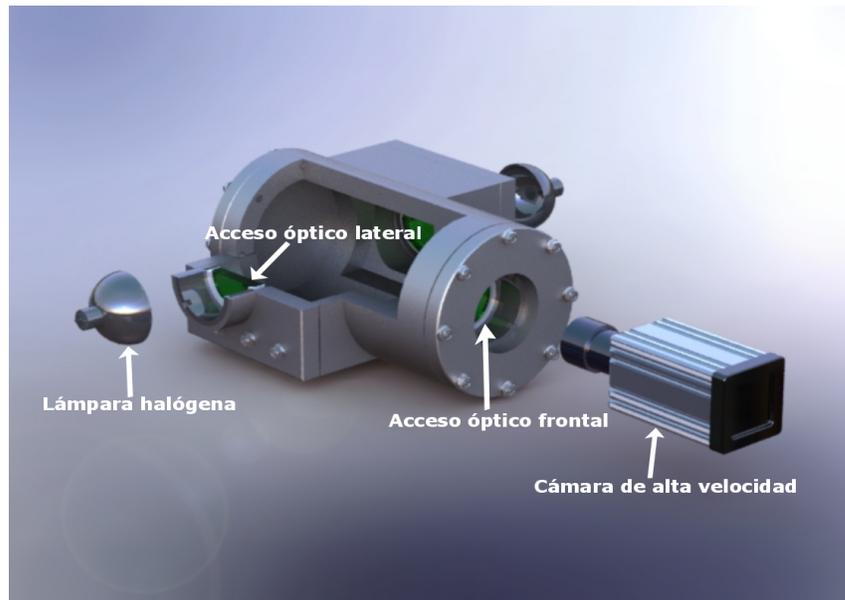


Figura 4.4: Técnica óptica: Iluminación directa por dispersión Mie

4.3 PROCESAMIENTO DE IMÁGENES DEL CHORRO DIÉSEL LÍQUIDO

4.3.1 OBTENCIÓN DE LA RESOLUCIÓN ESPACIAL

Para llevar a cabo el procesamiento de las imágenes de longitud líquida adquiridas en el evento de inyección, es necesario calcular la resolución espacial en *píxel/mm*, éste es un parámetro necesario para obtener las medidas reales de los parámetros macroscópicos del chorro diésel (*Penetración, Área y Ángulo del chorro diésel*). A continuación se describe el procedimiento que fue realizado para el cálculo

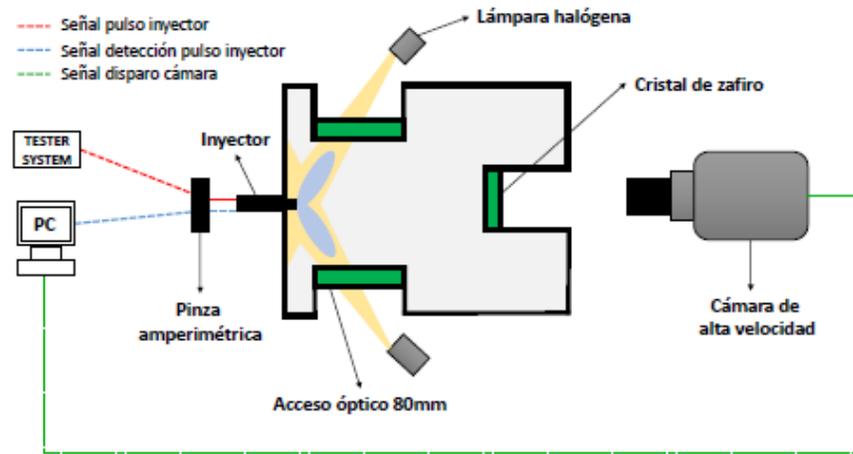


Figura 4.5: Esquema del sistema de sincronización y adquisición de imágenes del chorro diésel líquido

de dicho parámetro:

- Se coloca una hoja graduada de dimensiones conocidas dentro de la cámara de visualización a volumen constante centrada en la punta de la tobera del inyector diésel solenoide.
- Posteriormente se adquieren fotografías del fondo de la cámara de visualización a volumen constante y se obtiene las coordenadas de dos puntos ($[X_1, Y_1$ y $X_2, Y_2]$ que se encuentren en una misma línea horizontal de la hoja graduada, como se ilustra en la Figura 4.6.
- Finalmente, se comprueba que los dos puntos se encuentren en una misma altura, es decir, que Y_1 sea igual a Y_2 , de no obtenerse un valor igual, se realiza una corrección de la distancia entre los dos puntos aplicando el Teorema de Pitágoras y así de esta manera obtener la distancia real en píxel. Una vez obtenido este valor, se mide la distancia en *milímetros* y posteriormente se divide la distancia en *píxel* entre la distancia real en *milímetros*.

Para el presente estudio la relación espacial obtenida fue de 4.17 píxel/mm , con una resolución de imagen de 340×272 y $120 \mu\text{s}$ de tiempo de exposición.

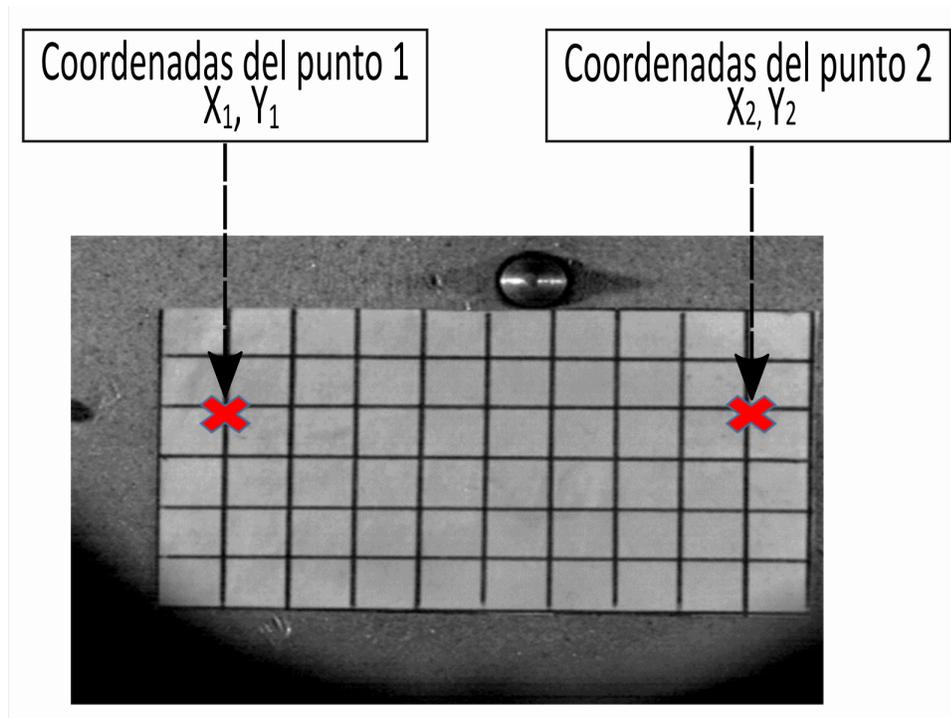


Figura 4.6: Imagen utilizada para obtener la resolución espacial

4.3.2 SOFTWARE: PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DIÉSEL

Las imágenes adquiridas durante el proceso de inyección, son almacenadas en la estación de adquisición de vídeo y posteriormente son analizadas mediante un código propio, desarrollado en el software MATLAB, éste concretamente detecta el contorno del chorro diésel líquido y a partir de esto se determinan los parámetros macroscópicos del chorro diésel líquido como lo es la penetración, el área y el ángulo del chorro diésel. En la Figura 4.7 (a), se muestra la imagen de la longitud líquida en bruto del evento de inyección, donde la imagen se enfoca en dos de los cinco chorros de combustible a la salida de los orificios de la tobera del inyector diésel solenoide, lo anterior fue necesario con la finalidad de adquirir un mayor número de imágenes del evento de inyección, disminuyendo la resolución de las imágenes, y asumiendo que la morfología y desarrollo de los cinco chorros de combustible presentan un

comportamiento similar. En la Figura 4.7 (b), se ilustra el tratamiento de la imagen del chorro diésel utilizando el software de parámetros macroscópicos de chorro diésel, obteniendo el contorno del chorro diésel, el cual ha sido añadido a la imagen en bruto en color azul, a través de éste se determinan los parámetros macroscópicos del chorro diésel, si se desean conocer más detalles del software consultar el trabajo de Rubio-Gómez et al. [47].

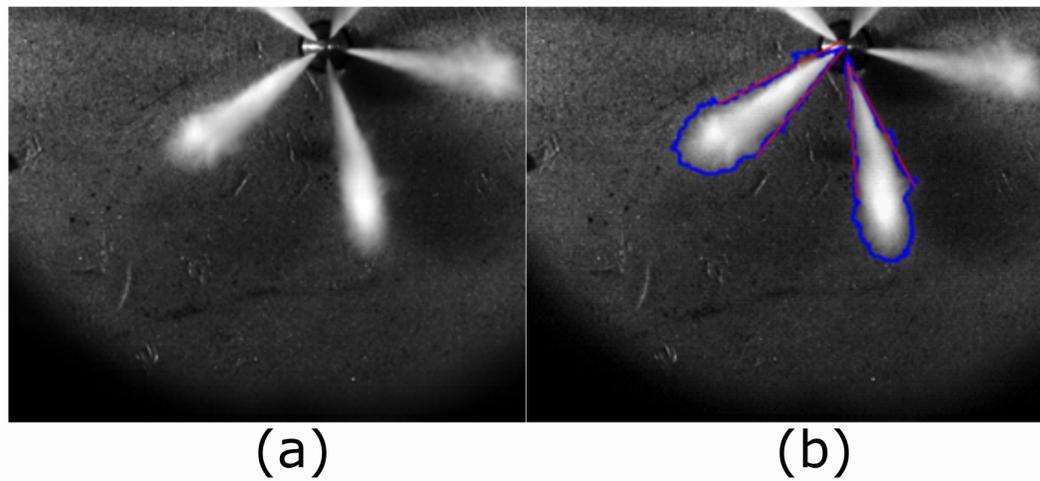


Figura 4.7: Imágenes del chorro diésel líquido obtenidas del proceso de inyección en la cámara de visualización a volumen constante a una $P_{rail} = 100$ MPa y $P_{back} = 3$ MPa y tomada a 0.5 ms (tiempo después del inicio de la inyección). En (a), se observa la imagen original y en (b) se observa la detección de los chorros de combustible por el algoritmo mediante el contorno de color azul.

CAPÍTULO 5

EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIESEL

A lo largo de este capítulo se presentarán los resultados relacionados con los efectos de los parámetros de operación (presión de inyección y presión en el interior de la cámara) sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel. El presente capítulo se divide en cuatro secciones: en el apartado “Metodología experimental y de análisis” se describirá la matriz de experimentos y el procedimiento que se llevará a cabo para la realización de las pruebas. En las Secciones “Efectos de la presión de inyección sobre el proceso de mezcla” y “Efectos de la presión en el interior de la cámara sobre proceso de mezcla”, se mostrarán los resultados obtenidos mediante el análisis de la penetración, área y ángulo del chorro diésel. Finalmente, las conclusiones más relevantes obtenidas en el estudio se resumirán en la sección “Conclusiones”.

5.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y DE ANÁLISIS

5.1.1 DESARROLLO DE UN CIRCUITO DE CONTROL PARA INYECTORES DIÉSEL SOLENOIDE

Actualmente la maqueta de visualización a volumen constante la cual se describió en la Sección 4.1, cuenta con un common-rail system tester, con el cual sólo es posible efectuar la estrategia de inyección simple. El circuito de control para inyectores diésel solenoides que se presenta en esta sección permite efectuar tanto estrategias de inyección simple, como estrategias de inyección múltiple, como lo son la estrategia de inyección piloto, estrategia de inyección dividida y la post-inyección.

El accionamiento de un inyector diésel solenoide requiere una alta tensión y corriente, con lo cual se logra la apertura del inyector diésel solenoide, después de esto la corriente debe ser reducida al mínimo para mantener abierto el inyector y evitar sobrecalentamiento [48]. Eléctricamente el inyector se puede representar como un sistema integrador en el cual la corriente de salida es proporcional a la acumulación del voltaje a su entrada. Debido a lo anterior se usa una señal de voltaje de modulación de pulso PWM (por sus siglas en inglés, *pulse width modulation*) para manejar el inyector y así obtener una salida lineal a trozos (en inglés *piecewise linear function*) [49].

Una vez identificado el tipo de circuito de activación para el inyector diésel solenoide, se realizó una simulación del circuito de control con la finalidad de establecer los valores del pulso de apertura y pulso de mantenida, para el correcto funcionamiento del inyector diésel solenoide. Para llevar a cabo la simulación fue necesario medir la inductancia e impedancia del inyector diésel solenoide [50], más detalles sobre el procedimiento que se ha seguido para realizar dicha medición, se describen en el Anexo A.

Una vez determinados los valores de inductancia (L) e impedancia (R), se procedió a realizar la simulación del circuito de accionamiento y se determinaron los valores del pulso de pre-polarización, pulso de apertura y pulso de mantenida, la simulación se realizó en el software NI Multisim 14 y cuyos detalles se describen en el Anexo B.

Por otro lado, en la Figura 5.1 se observan el hardware construido a partir de la simulación para el control del inyector diésel solenoide, donde las señales de pre-polarización, pulso de apertura y mantenida son enviadas mediante FPGA (por sus siglas en inglés *field-programmable gate array*), para después entrar a un acondicionamiento de la señal y finalmente llegar al circuito de control el cual utiliza un Power Mosfet para el control de alto voltaje y corrientes elevadas.

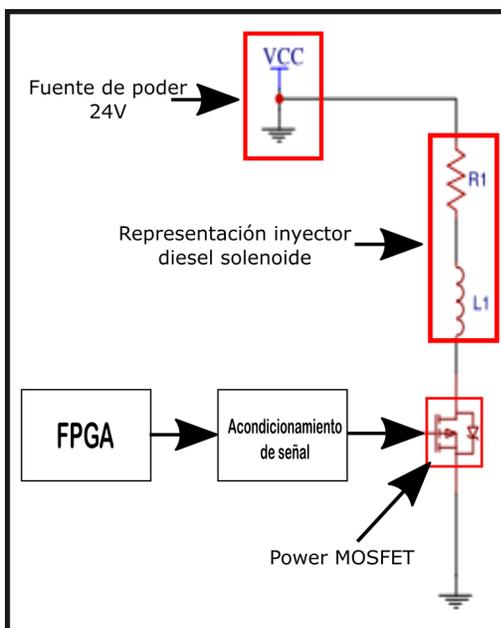


Figura 5.1: Modelo del circuito de conducción.

En la Figura 5.2 se observan las señales enviadas y la respuesta en corriente del inyector diésel solenoide, donde la primera fase corresponde a la técnica de pre-polarización, esta técnica consiste en establecer parcialmente el campo electromagnético por debajo del umbral de apertura del inyector diésel solenoide [51], de esta manera el inyector diésel solenoide se mantendrá cerrado y parcialmente car-

gado a la espera de la señal de inyección. La fase de pre-polarización se encuentra en un valor de 8 A, mientras que la señal de inyección tiene un pico de apertura de 20 A y una mantenida de 10 A, con esto asegura que el inyector diésel solenoide no sufra sobrecalentamiento y que tenga un funcionamiento correcto.

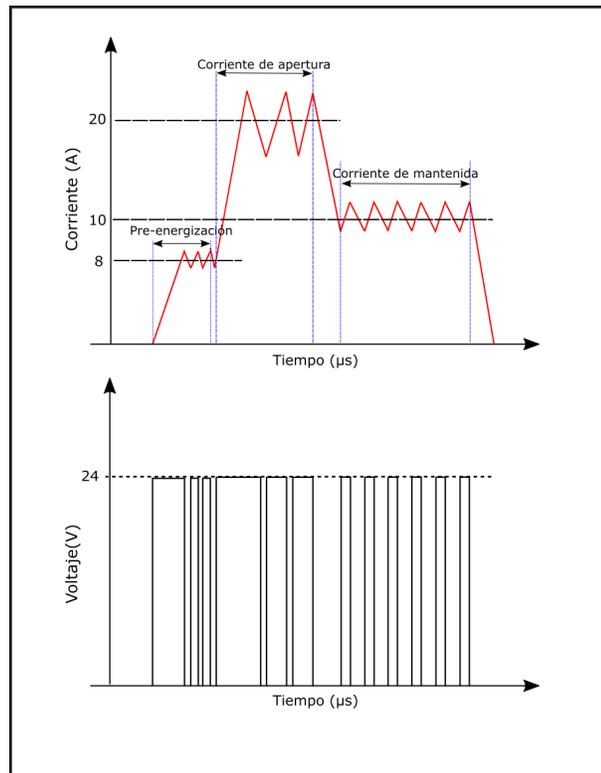


Figura 5.2: Corriente y voltaje del inyector diésel solenoide.

5.1.2 DISEÑO DE LA MATRIZ DE EXPERIMENTOS

Para lograr estudiar los efectos de la presión de inyección y la presión al interior de la cámara de combustión sobre el proceso de mezcla, se determinaron las condiciones de operación del sistema, concretamente fueron definidos los valores de los parámetros de presión de inyección (P_{rail}), presión en el interior de la cámara (P_{back}) y duración del pulso eléctrico. Estos valores se determinaron con base a las condiciones habituales que se pueden encontrar en un sistema de inyección diésel common-rail [52] y las cuales se muestran en la Tabla 5.1.

Tabla 5.1: Condiciones de operación habituales en un sistema de inyección diésel common-rail.

Parámetro de inyección	Cantidad	Unidad
P_{rail}	100 - 150	MPa
P_{back}	5 - 8	MPa
Duración del pulso eléctrico	1.0 - 2.0	ms

Para estudiar los efectos de la presión de inyección sobre el proceso de mezcla, se fijó una P_{back} de 3 MPa, la cámara de visualización a volumen constante como se mencionó en la Sección 4.1.1 puede resistir presiones de hasta 18 MPa, sin embargo por cuestiones de seguridad se evita llegar a esos niveles de presión, en cuanto a los niveles de P_{rail} utilizados para el estudio, se plantearon tres niveles 50, 80 y 100 MPa, los cuales son niveles de presión representativos de los motores Diesel actuales. En la Tabla 5.2 se muestra la matriz de ensayos que se utilizó para estudiar los efectos de la presión de inyección sobre el proceso de mezcla.

Tabla 5.2: Matriz de ensayos a P_{back} constante y variación de P_{rail} .

Parámetro de inyección	Cantidad	Unidad
P_{rail}	50, 80 y 100	MPa
P_{back}	3	MPa
Duración del pulso eléctrico	1.5	ms

Para el caso del estudio de los efectos de la presión en el interior de la cámara de combustión sobre el proceso de mezcla, se fijó una P_{rail} de 100 MPa, debido a que es una presión representativa de los sistema de inyección common-rail actuales, los niveles de P_{back} utilizados fueron de 2, 3 y 4 MPa, esto por razones de seguridad en la instalación como se describió anteriormente. En la Tabla 5.3 se puede observar la matriz de ensayos que se determinó para estudiar los efectos de la presión en el interior de la cámara sobre el proceso de mezcla.

El combustible utilizado en las matrices de experimentos descritas anteriormente, es un diésel standard. Con una densidad (de acuerdo con la EN ISO 12185/96 standards a 15°C) de 830 kg/m³ y una viscosidad cinemática (de acuerdo con EN ISO 3104/99 standards a 40°C de 2.820 x 10⁻⁶ m²/s).

Tabla 5.3: Matriz de ensayos a P_{rail} constante y variación de P_{back} .

Parámetro de inyección	Cantidad	Unidad
P_{rail}	100	MPa
P_{back}	2, 3 y 4	MPa
Duración del pulso eléctrico	1.5	ms

5.1.3 EXPERIMENTACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DEL CHORRO DIÉSEL LÍQUIDO

Una vez definida la matriz de experimentos se procedió a la realizar la experimentación. Se inyectó el combustible en la maqueta de visualización a volumen constante, instalación que fue descrita en la Sección 4.1 y se modificaron las condiciones de operación como se determinó en la sección anterior.

La cámara de visualización a volumen constante se presurizó con nitrógeno 100 % puro y la temperatura en el interior de ésta se mantuvo a 24°C durante los experimentos, el inyector diésel solenoide fue operado mediante el circuito de control que fue descrito en la Sección 5.1.1 en la configuración de inyección simple.

Una vez realizados los experimentos se analizó el comportamiento del chorro diésel a través de la caracterización de sus parámetros macroscópicos, es decir penetración, área y ángulo del chorro diésel. Para ello, se adquirieron imágenes de longitud líquida durante el proceso de inyección utilizando la técnica óptica: iluminación directa por dispersión Mie, que fue descrita en la Sección 4.2 y se realizó el procesamiento de éstas mediante el software descrito en la Sección 4.3.

5.2 EFECTOS DE LA PRESIÓN DE INYECCIÓN SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA

En las Figuras 5.3, 5.5 y 5.7, se observa la evolución temporal de la penetración, el área y el ángulo del chorro diésel, para tres diferentes niveles de P_{rail} (50, 80 y 100 MPa) y una P_{back} de 3 MPa, se observa también en cada figura cuatro líneas verticales discontinuas de iso-tiempo, con la finalidad de indicar gráficamente, los puntos de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro diésel que se compararan de cada nivel de P_{rail} .

En la Figura 5.3, se observa la evolución temporal del chorro diésel para tres niveles diferentes de P_{rail} al igual que una línea discontinua horizontal, la cual indica el límite visual del acceso óptico, dado que después de ese punto no es posible observar la punta de la penetración del chorro diésel líquido. Por otro lado, se observa que a mayor nivel P_{rail} , la penetración el chorro diésel se desarrolla a una mayor velocidad.

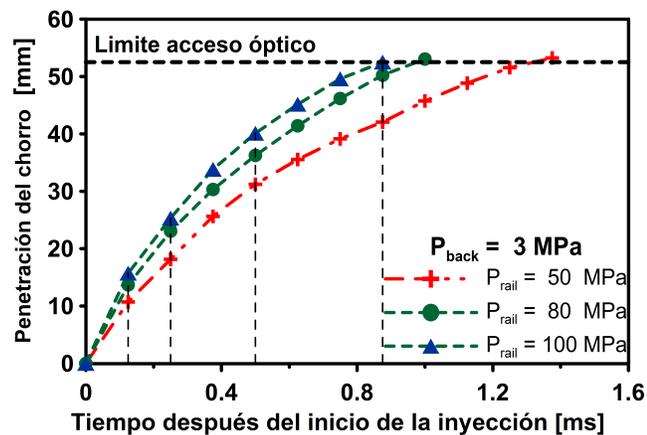


Figura 5.3: Evolución temporal de la penetración de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail}

En la Figura 5.4, se ilustra la comparación temporal de la penetración del chorro diésel para los casos de iso-tiempo junto con su dispersión experimental, observando que conforme se incrementó la P_{rail} se incrementó la penetración del

chorro diésel en el mismo lapso de tiempo, un aumento en la P_{rail} implica un aumento en la cantidad de movimiento, lo que se traduce en una mayor velocidad del chorro diésel, el cual penetra mas rápido hasta una misma distancia dentro del ambiente en el cual es inyectado, y por lo tanto también menor será el tiempo en el que el chorro diésel alcanza su estabilización [53].

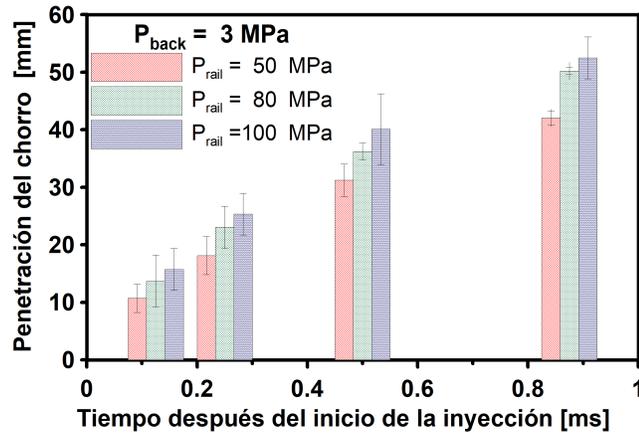


Figura 5.4: Comparación temporal de la penetración de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail} .

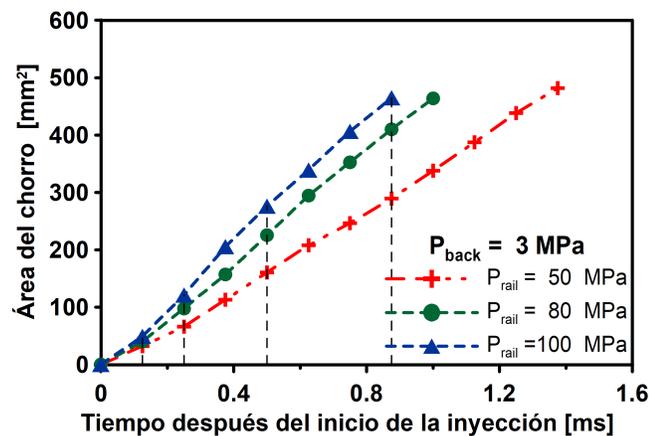


Figura 5.5: Evolución temporal del área de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail} .

En la Figura 5.5, se muestra la evolución temporal del área del chorro diésel, para tres diferentes niveles de P_{rail} (50, 80, 100 MPa), ésta se desarrolla con curvas exponenciales. Observando que conforme aumentó el nivel de P_{rail} , mayor es la evolución temporal del área del chorro diésel.

En la Figura 5.6, se ilustra la comparación temporal del área del chorro diésel para los casos de iso-tiempo junto con su dispersión experimental, observando que los valores temporales del área del chorro diésel, para el nivel P_{rail} de 100 MPa son mayores en comparación a los niveles de P_{rail} de 50 y 80 MPa, lo anterior se debe principalmente a que a mayores niveles de P_{rail} , mayor es la masa de combustible inyectada y por consecuencia mayores valores de área del chorro diésel [20, 22].

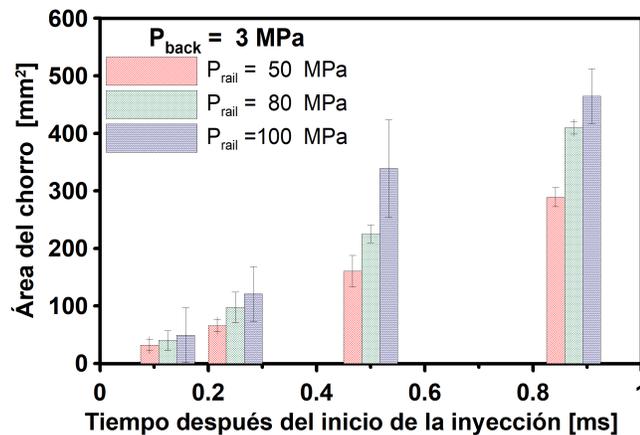


Figura 5.6: Comparación temporal del área de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail} .

En la Figura 5.7, se ilustra la evolución temporal del ángulo del chorro diésel, para tres diferentes niveles de P_{rail} , observando que el nivel de P_{rail} tiene una ligera influencia sobre el ángulo del chorro diésel, por consiguiente, el efecto del nivel de la P_{rail} sobre el ángulo del chorro diésel puede ser despreciado [20, 53].

En la Figura 5.8, se muestra la comparación temporal del ángulo del chorro diésel para los casos de iso-tiempo junto con su dispersión experimental, observando una diferencia en el ángulo del chorro diésel en los primeros instantes del evento de inyección, principalmente en el ángulo del chorro diésel correspondiente a un nivel de P_{rail} de 50 MPa, sin embargo conforme el chorro diésel se aproxima a la zona de estabilidad, el comportamiento del chorro diésel para los tres niveles de P_{rail} es muy similar, resultado consistente por lo reportado por Lloppis [54].

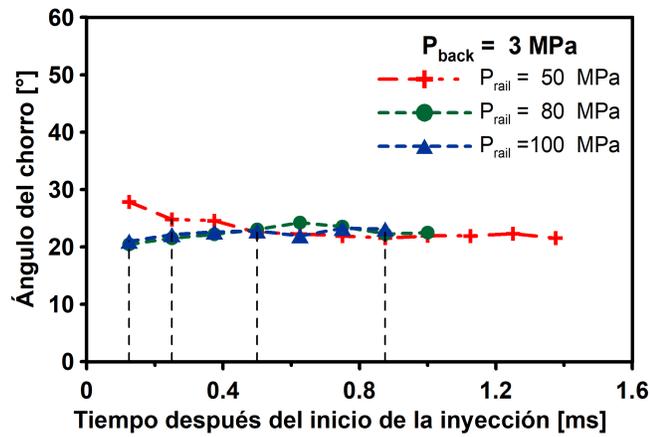


Figura 5.7: Evolución temporal del ángulo del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail} .

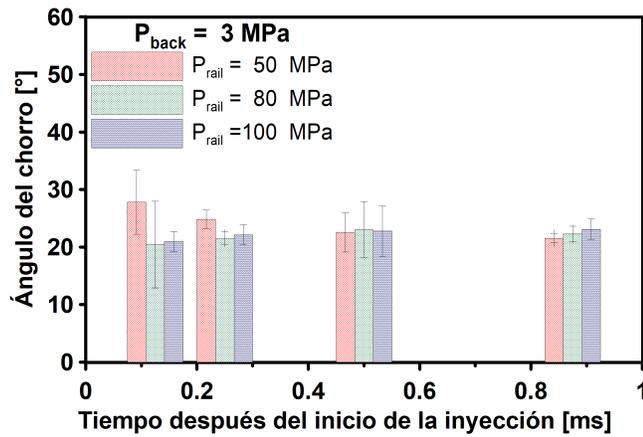


Figura 5.8: Comparación temporal del ángulo del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{rail} .

5.3 EFECTOS DE LA PRESIÓN EN EL INTERIOR DE LA CÁMARA SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA

En las Figuras 5.9, 5.11 y 5.13, se muestra la evolución temporal de la penetración, el área y el ángulo de cono del chorro diésel, para tres diferentes niveles de P_{back} (2, 3 y 4 MPa) y una P_{rail} de 100 MPa, adicionalmente, se han añadido en las figuras cuatro líneas discontinuas verticales de iso-tiempo, con la finalidad

de indicar gráficamente, los puntos de las evoluciones temporales de los parámetros macroscópicos del chorro diésel que se compararan en cada uno de los nivel de P_{back} .

A partir de la Figura 5.9, se observa que a medida que aumenta la P_{back} , la penetración del chorro diésel disminuye significativamente.

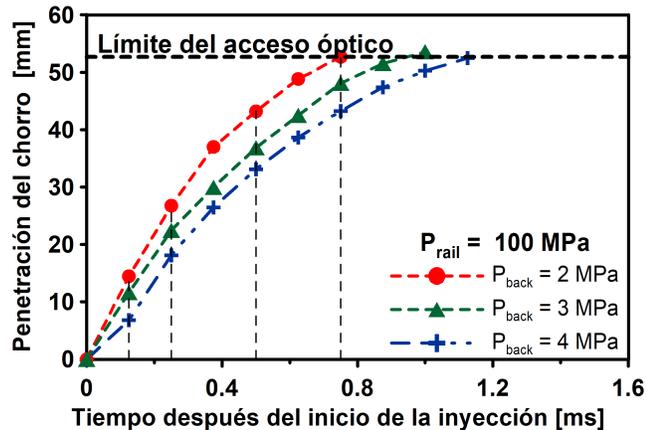


Figura 5.9: Evolución temporal de la penetración de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back} .

En la Figura 5.10, se ilustra la comparación temporal de la penetración del chorro diésel para cada caso de iso-tiempo, junto con su dispersión experimental, observando que cuanto mayor es el nivel de P_{back} menor es la penetración del chorro diésel en un mismo instante de tiempo. Este hecho implica que a mayor presión en el interior de la cámara existe una menor penetración del chorro diésel [22, 54, 55].

En la Figura 5.11, se muestra la evolución temporal del área del chorro diésel, para tres diferentes niveles de P_{back} , observando que cuanto menor es la P_{back} , mayor es el área del chorro, siendo este comportamiento consistente por lo reportado por diversos autores [22, 55].

En la Figura 5.12, se ilustra la comparación temporal del área del chorro diésel para los casos de iso-tiempo, junto con su dispersión experimental, observando mayores valores del área de chorro diésel en el mismo instante de tiempo conforme disminuyó el nivel de P_{back} .

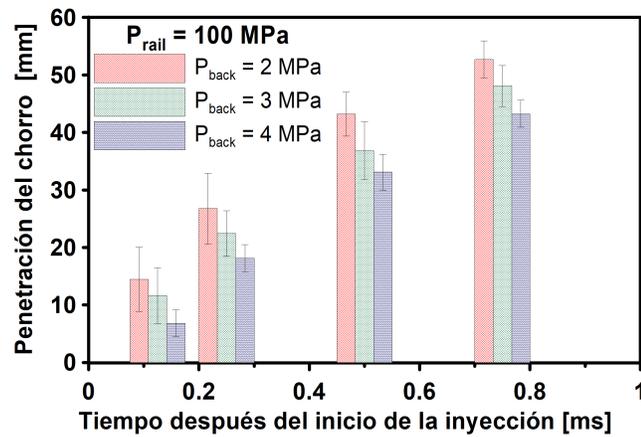


Figura 5.10: Comparación temporal de la penetración del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back} .

Un incremento en el nivel de P_{back} se refleja en un aumento en la densidad del ambiente en el que se inyecta el combustible, provocando una desaceleración del chorro diésel y por consecuencia un área de chorro menor [22, 55, 56].

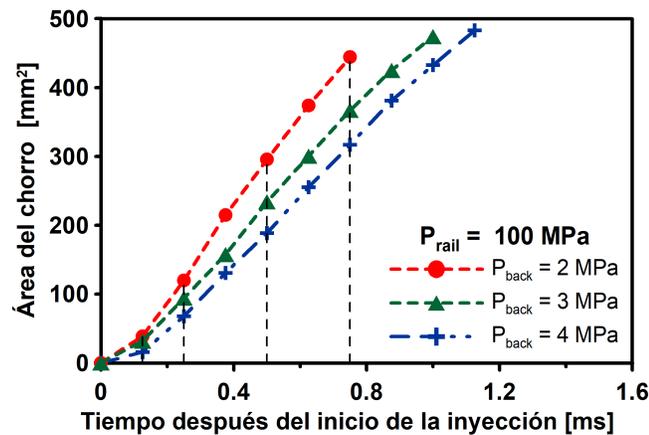


Figura 5.11: Evolución temporal del área de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back} .

En la Figura 5.13, se muestra la evolución temporal del ángulo del chorro diésel, observando que a mayores niveles de P_{back} el ángulo del chorro diésel aumenta, confirmando que a diferencia de la P_{rail} , la P_{back} tiene un efecto no despreciable sobre el ángulo del chorro diésel.

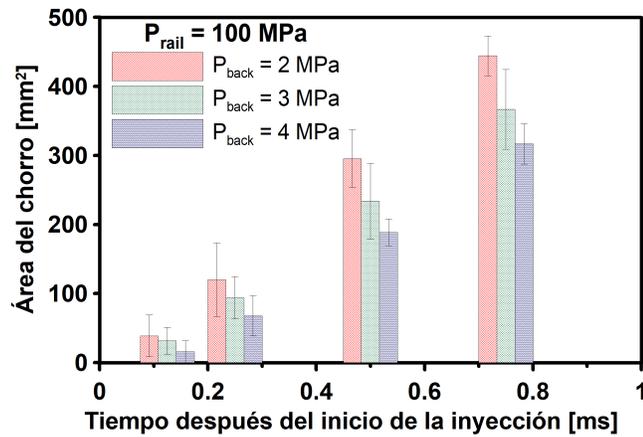


Figura 5.12: Comparación temporal del área de chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back} .

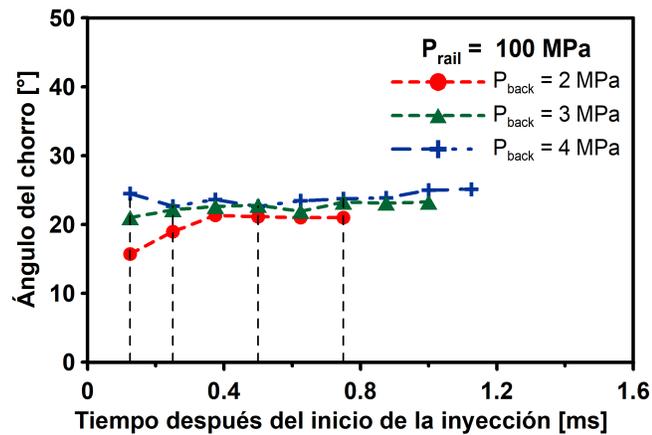


Figura 5.13: Evolución temporal del ángulo del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back} .

En la Figura 5.14, se compara la evolución temporal del ángulo del chorro diésel para cada caso de iso-tiempo, junto con su dispersión experimental, observando mayores valores del ángulo del chorro diésel en el mismo instante de tiempo conforme incrementa el nivel de P_{back} , lo anterior se debe a que el incremento en el nivel de P_{back} provocó una mayor densidad del ambiente, por lo tanto, el desarrollo del chorro diésel en la dirección axial se vio disminuido, lo que obligo al flujo de masa del chorro diésel a extenderse en dirección radial, propiciando un aumento en el ángulo del chorro diésel y, por lo tanto un mayor englobamiento de aire [22, 54, 57].

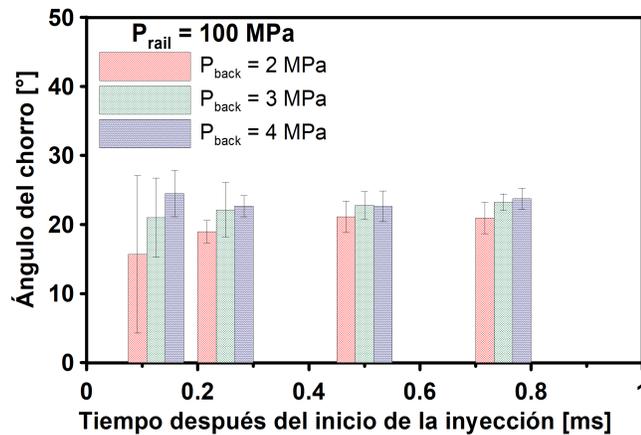


Figura 5.14: Comparación temporal del ángulo del chorro diésel, para diferentes niveles de P_{back} .

5.4 CONCLUSIONES

A lo largo del presente capítulo se ha profundizado en el conocimiento de los efectos de la presión de inyección y la presión en el interior de la cámara sobre el proceso de mezcla, el cual fue caracterizado a través de los parámetros macroscópicos del chorro diésel. Seguidamente se sintetizaran las principales conclusiones alcanzadas en el presente capítulo.

- Conforme aumentó la presión de inyección, la velocidad del chorro diésel se incrementó, provocando valores de penetración del chorro diésel mayores y, una reducción en el tiempo que le toma al chorro diésel llegar a su estabilización. Una elevada presión de inyección igualmente se traduce en un aumento en la masa de combustible inyectada, reflejándose en un incremento del área del chorro diésel. El ángulo del chorro diésel no es afectado por la presión de inyección.
- Conforme se incrementó la presión en el interior de la cámara la velocidad del chorro diésel disminuyó, provocando valores de penetración y área del chorro diésel menores. El aumento de la presión en el interior de la cámara propicio

un mayor ángulo del chorro diésel, lo cual se traduce en un mejor proceso de mezcla.

- En este capítulo se utilizó el circuito de control para inyectores diésel solenoide en la configuración de inyección simple, siendo posible reproducir resultados consistentes con la bibliografía, siendo esto un indicador del correcto funcionamiento de la instalación experimental, permitiendo realizar análisis robustos sobre la caracterización del proceso de mezcla en un motor Diesel.
- El circuito de control desarrollado será de gran utilidad para las personas que deseen estudiar el proceso de inyección bajo estrategias de inyección múltiple, y no cuenten con equipos especializados para la aplicación de dichas estrategias.

CAPÍTULO 6

EFFECTOS DE LA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA

A lo largo de este capítulo se presentarán los resultados relacionados con los efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel. El presente capítulo se divide en tres secciones: en el apartado “Metodología experimental y de análisis” se describe la matriz de experimentos y el procedimiento que se llevó a cabo para la realización de las pruebas. En la Sección “Efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla”, se muestran los resultados obtenidos mediante el análisis de la penetración, área y ángulo del chorro diésel. Finalmente, las conclusiones más relevantes obtenidas en el estudio se resumirán en la sección “Conclusiones”.

6.1 METODOLOGÍA EXPERIMENTAL Y DE ANÁLISIS

6.1.1 DISEÑO DE LA MATRIZ DE EXPERIMENTOS

Para lograr estudiar la influencia de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla mediante la variación del Dwell time, se determinaron las condiciones de operación del sistema, concretamente fueron definidos los valores de los parámetros de P_{rail} , P_{back} , duración del pulso eléctrico de la inyección piloto, Dwell time y duración del pulso eléctrico de la inyección principal. En las siguientes líneas se indican los valores definidos para cada uno de los parámetros descritos previamente.

Se fijó un nivel de P_{back} de 3 MPa, dado que como se comentó en el capítulo anterior, este valor fue definido por cuestiones de seguridad, y un nivel de P_{rail} de 100 MPa, igualmente como se mencionó en el capítulo anterior este nivel de presión de inyección es representativo de los sistemas de inyección common-rail. La duración del pulso eléctrico de la inyección piloto fue de 0.4 ms, siendo éste un tiempo característico de la inyección piloto [58, 59, 60].

En cuanto a la duración del Dwell time, se establecieron los valores de, 1.5, 1.7, 2.0, 2.2, 2.5 y 3.5 ms, tiempos representativos en una estrategia de inyección piloto en un motor Diesel [61].

La duración del pulso eléctrico de la inyección principal fue de 1.5 ms, el cual es un tiempo comúnmente usado en los sistemas de inyección common-rail [52]. Adicionalmente, se estableció un ensayo de referencia, el cual está compuesto por una inyección simple, manteniendo los niveles de P_{rail} y P_{back} iguales a los de la estrategia de inyección piloto y se fijó una duración del pulso eléctrico de 1.5 ms, lo anterior con la finalidad de establecer un punto de comparación, para la caracterización del proceso de mezcla bajo una estrategia de inyección piloto.

En la Tabla 6.1 se muestra la matriz de ensayos que se estableció para estudiar los efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla.

Tabla 6.1: Matriz de ensayos de la estrategia de inyección piloto.

Casos de estudio	P_{rail} [MPa]	P_{back} [MPa]	Inyección piloto [ms]	Dwell time [ms]	Inyección principal [ms]	Inyección simple [ms]
1	100	3	0.4	1.5	1.5	-
2	100	3	0.4	1.7	1.5	-
3	100	3	0.4	2.0	1.5	-
4	100	3	0.4	2.25	1.5	-
5	100	3	0.4	2.5	1.5	-
6	100	3	0.4	3.5	1.5	-
7	100	3	-	-	-	1.5

El combustible utilizado para la matriz de experimentos descrita anteriormente, es un diésel standard, el cual fue descrito en la Sección 5.1.2.

6.1.2 EXPERIMENTACIÓN Y PROCESAMIENTO DE LAS IMÁGENES DEL CHORRO DIÉSEL LIQUIDO

Una vez determinada la matriz de ensayos descrita en la Sección anterior, se procedió a realizar la experimentación. Se inyectó el combustible en la maqueta de visualización a volumen constante, instalación que fue descrita en la Sección 4.1, y se modificaron las condiciones de operación como se mostró en la sección anterior.

La cámara de visualización a volumen constante se presurizó con nitrógeno y se mantuvieron los parámetros de pureza del nitrógeno y temperatura al interior de la cámara descritos en la Sección 5.1.3. El inyector diésel solenoide fue operado mediante el circuito de control que fue descrito en la Sección 5.1.1, pero ahora en la configuración de estrategia de inyección múltiple, específicamente en el presente estudio se empleará una estrategia de inyección piloto.

Una vez realizados los experimentos se analizó el comportamiento del chorro diésel de la inyección piloto, inyección principal e inyección simple a través de la caracterización de sus parámetros macroscópicos es decir penetración, área y ángulo del chorro diésel. Para ello, se tomaron imágenes del proceso de inyección utilizando la técnica óptica: iluminación directa por dispersión Mie, que fue descrita en la Sección 4.2 y se realizó el procesamiento de éstas mediante el software descrito en la Sección 4.3.

Una vez que se describió la matriz de ensayos, el procedimiento que se seguirá para llevar a cabo la experimentación y el procesamiento de las imágenes del chorro diésel líquido, se procede al análisis e interpretación de los resultados obtenidos, los cuales se presentan en la siguiente sección.

6.2 CARACTERIZACIÓN DEL PROCESO DE MEZCLA BAJO UNA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO

En las Figuras 6.1, 6.2 y 6.3, se muestra la evolución temporal de la penetración, área y ángulo del chorro diésel, respectivamente, para diferentes estrategias de inyección piloto y una inyección simple, de acuerdo con las condiciones de operación descritas en la Tabla 6.1.

En la Figura 6.1, se observa que la penetración del chorro diésel de las inyecciones piloto es similar al de la inyección simple, resultado que era de esperarse. En cuanto a las inyecciones principales, se observan cualitativamente tres tendencias distintas de la penetración del chorro diésel conforme se varía el valor del Dwell time, específicamente, para los casos 1 y 2 se observó un mismo comportamiento, mientras que para los casos 3 y 4, un comportamiento distinto fue observado, y finalmente, para los casos 5 y 6 un comportamiento distinto a los anteriores fue observado.

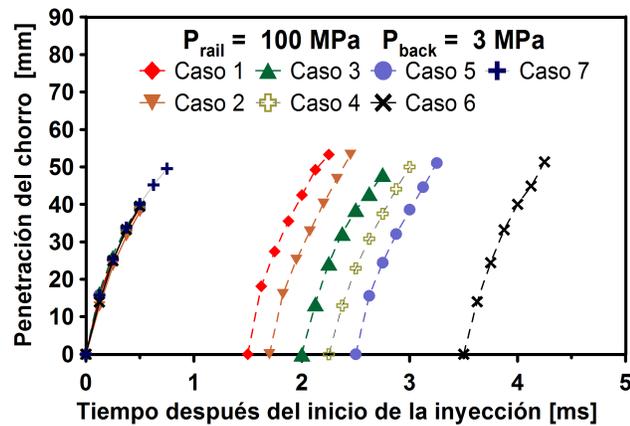


Figura 6.1: Evolución temporal de la penetración del chorro diésel para diferentes estrategias de inyección piloto y una estrategia de inyección simple.

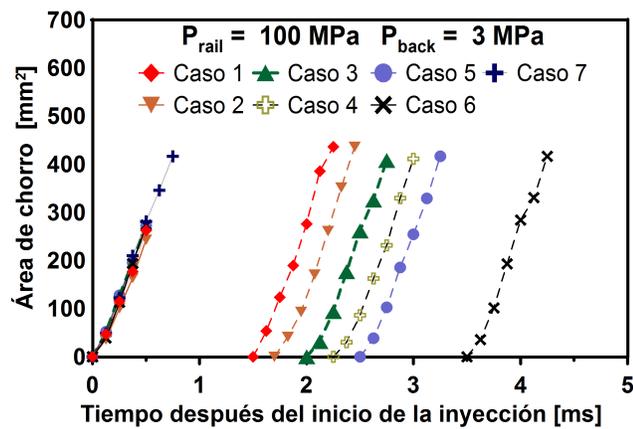


Figura 6.2: Evolución temporal del área del chorro diésel para diferentes estrategias de inyección piloto y una estrategia de inyección simple.

En la Figura 6.2, se observa que el área del chorro diésel de las inyecciones piloto evoluciona de manera similar al de la inyección simple. En cuanto a las inyecciones principales, para el área del chorro diésel se observan cualitativamente tres tendencias distintas conforme se varía el valor del Dwell time, específicamente, para los casos 1 y 2 se observó un mismo comportamiento, mientras que para los casos 3 y 4, un comportamiento distinto fue observado, y finalmente, para los casos 5 y 6 un comportamiento distinto a los anteriores fue observado.

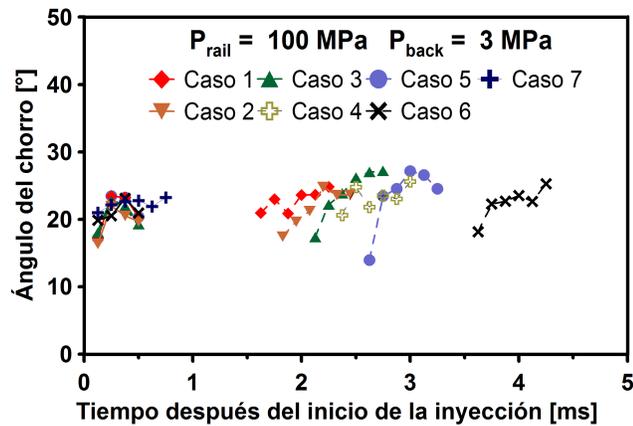


Figura 6.3: Evolución temporal del ángulo del chorro diésel para diferentes estrategias de inyección piloto y una inyección simple.

En la Figura 6.3, se observa que la evolución temporal del ángulo del chorro diésel es similar para las inyecciones piloto. En cuanto a las inyecciones principales, para el ángulo del chorro diésel se observan cualitativamente dos tendencias conforme se varía el valor del Dwell time, específicamente, para los casos 1 y 2 se observó un mismo comportamiento, mientras que para los casos 3, 4, 5 y 6, un comportamiento distinto fue observado.

En este punto es evidente que el proceso de mezcla bajo una estrategia de inyección piloto, se ve afectado por la duración del Dwell time, esto es consistente con lo reportado por Farrell et al [61]. Por tal motivo y con la finalidad de profundizar en el estudio del proceso de mezcla bajo una estrategia de inyección piloto, se seleccionaron los casos 1, 3 y 6, los cuales cada uno es representativo de las tres tendencias que se observaron cualitativamente en la penetración y área del chorro diésel de las inyecciones principales, además de la inyección simple la cual pertenece al caso de referencia, con la finalidad de observar las diferencias entre una inyección simple y una estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla.

En la Figura 6.4, se muestra la evolución temporal de la penetración, área y ángulo del chorro diésel, para tres casos de estrategia de inyección piloto y el caso de referencia. Igualmente se muestran líneas discontinuas verticales de iso-tiempo,

para las inyecciones piloto, las inyecciones principales y la inyección simple. Cabe destacar que los casos de iso-tiempo correspondientes a las inyecciones piloto y simple son equivalentes a los de la inyecciones principales, por consiguiente éstos son comparables.

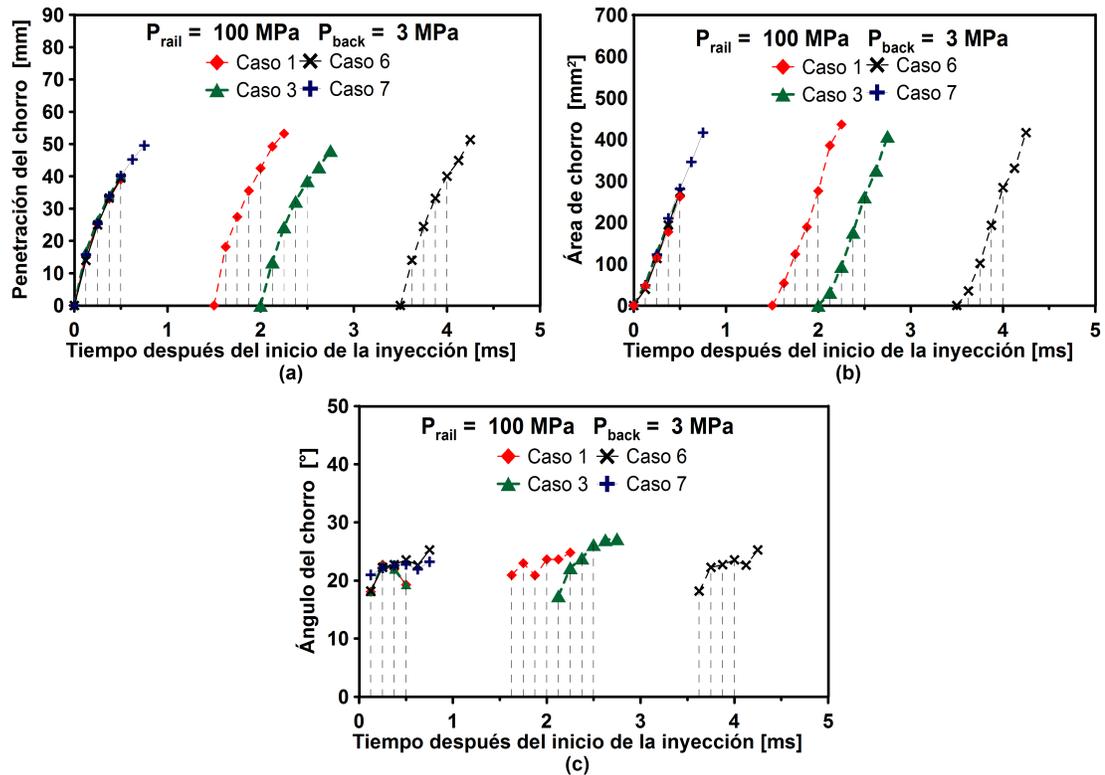


Figura 6.4: Evolución temporal de los parámetros macroscópicos del chorro diésel bajo una estrategia de inyección piloto, (a) penetración del chorro diésel, (b) área del chorro diésel, y (c) ángulo del chorro diésel.

En la Figura 6.5, se ilustra la comparativa temporal de la penetración del chorro diésel para los casos de iso-tiempo, junto con su dispersión experimental, por otro lado se observa en la Figura 6.5 (a), que el comportamiento de la penetración del chorro diésel de la inyección piloto es similar al de la inyección simple, en cuanto a la inyección principal se observa que en la mayoría de los casos a iso-tiempo la penetración del chorro diésel es mayor en comparación al de las inyecciones piloto y simple,

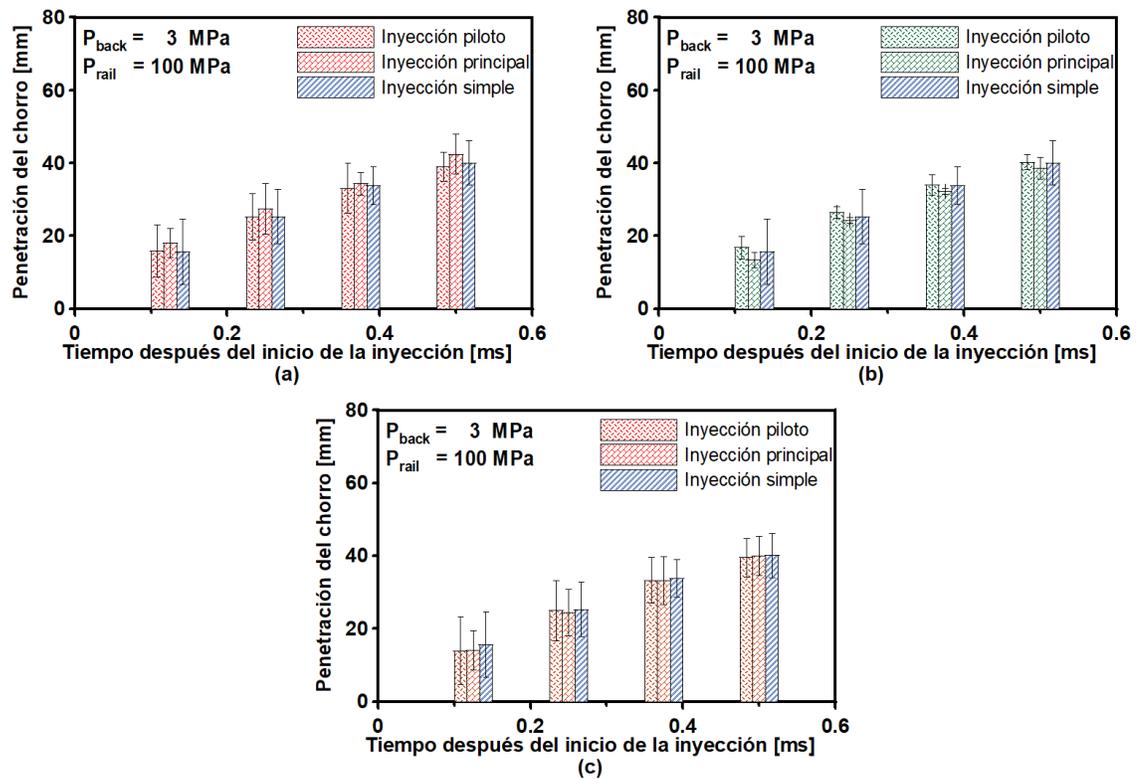


Figura 6.5: Comparativa de las evoluciones temporales a iso-tiempo de la penetración del chorro diésel, (a) Caso 1, (b) Caso 2, y (c) Caso 3.

indicando una aceleración mayor del chorro diésel de la inyección principal, lo anterior se debe al aumento del flujo de cantidad de movimiento causado por la combinación de las velocidades de la inyección piloto y principal [62].

En la Figura 6.5 (b), se observa un comportamiento similar de la penetración del chorro diésel de la inyecciones piloto y simple, resultado que era de esperarse, por otra parte se observa que los valores de la penetración del chorro diésel son menores para la inyección principal en comparación con las inyecciones piloto y simple, lo cual indica una desaceleración del chorro diésel de la inyección principal, lo anterior se debe principalmente a dos razones, la primera de ellas es que el flujo de gas arrastrado creado por la inyección piloto decayó durante el Dwell time debido a la difusión y disipación, la segunda razón se atribuye al mayor tiempo que tuvieron las gotas del chorro de combustible de la inyección piloto para desacelerar y la colisión entre las gotas de combustible del chorro diésel de la inyección principal y las gotas

del chorro diésel de la inyección piloto las cuales se mueven con relativa lentitud, desaceleraron las gotas de combustible del chorro diésel de la inyección principal [61].

En la Figura 6.5 (c), se observa que en la mayoría de los casos a iso-tiempo la penetración del chorro diésel de las inyecciones piloto, principal y simple, presentan valores similares, lo cual se debe a que después de un cierto tiempo los efectos provocados en el ambiente por la inyección piloto disminuye gradualmente.

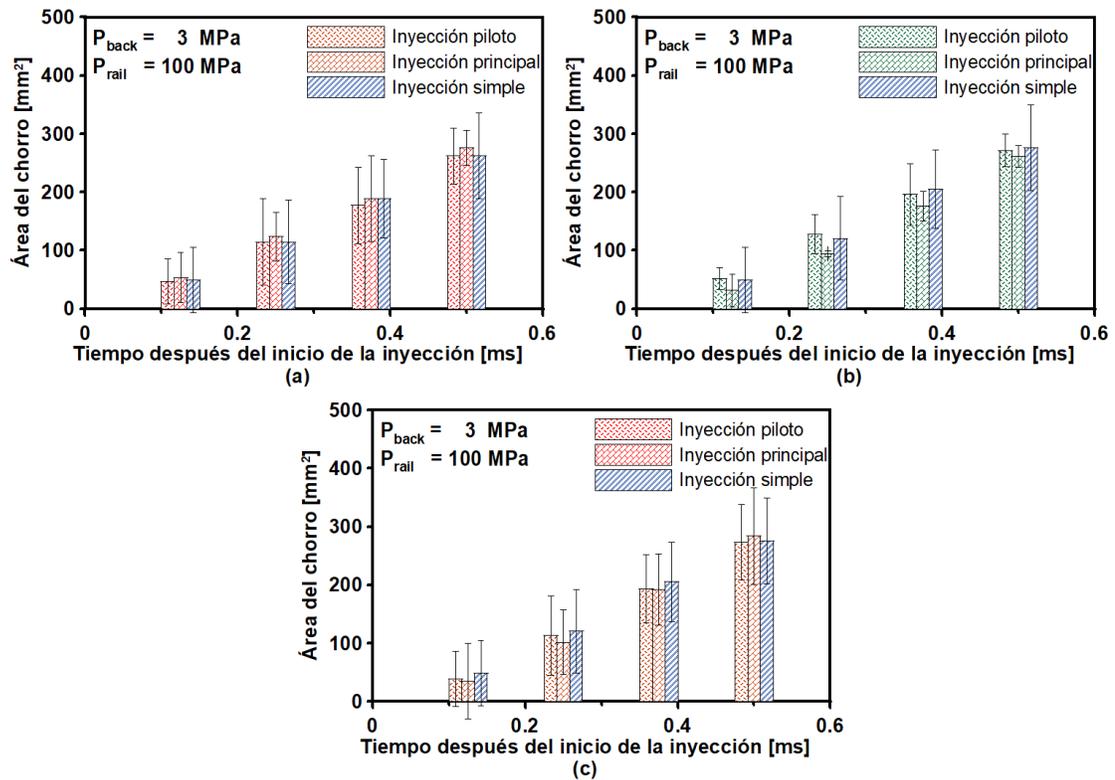


Figura 6.6: Comparativa de las evoluciones temporales a iso-tiempo del área del chorro, (a) Caso 1, (b) Caso 2, y (c) Caso 3.

En la Figura 6.6, se ilustra la comparación temporal del área del chorro diésel para los casos a iso-tiempo con su dispersión experimental. En la Figura 6.6 (a), se observa que en la mayoría de los casos a iso-tiempo, el área del chorro diésel de la inyección piloto y la inyección simple son similares, así mismo se observa que el área del chorro diésel de la inyección principal es mayor en comparación al de las inyecciones piloto y simple, resultado consistente con la literatura [56].

En la Figura 6.6 (b), se observan valores del área del chorro diésel mayores para las inyecciones piloto en comparación al de las inyecciones principales para cada caso de iso-tiempo, lo anterior se debe principalmente a la desaceleración del chorro diésel de la inyección principal [56]. Finalmente, en la Figura 6.6 (c), se observan valores del área del chorro diésel similares para cada caso de iso-tiempo, para las inyecciones piloto, principal y simple, lo que era de esperarse, debido a los valores similares de penetración del chorro diésel, los cuales afectan directamente al área del chorro.

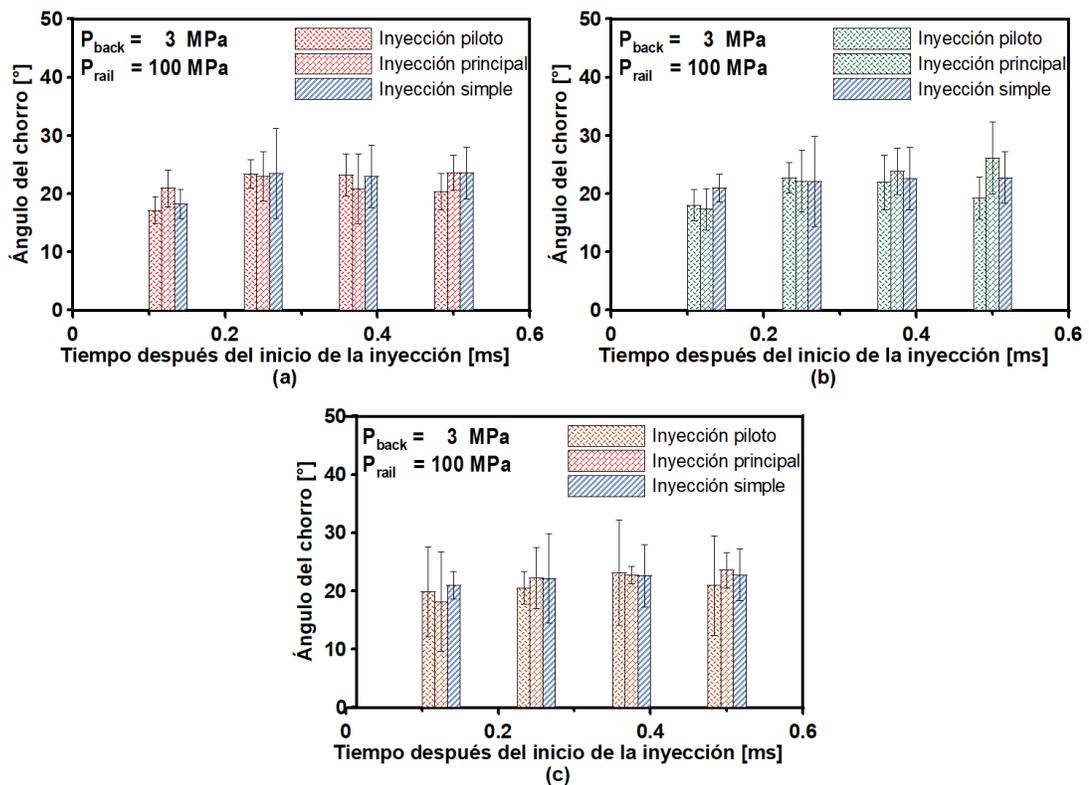


Figura 6.7: Comparativa de las evoluciones temporales a iso-tiempo del ángulo del chorro diésel, (a) Caso 1, (b) Caso 2, y (c) Caso 3.

En la Figura 6.7, se ilustra la comparación temporal del ángulo del chorro diésel para los casos a iso-tiempo junto con su dispersión experimental. Por otro lado, en la Figura 6.7 (a), se observan que en la mayoría de los casos a iso-tiempo el ángulo del chorro diésel de la inyección principal es menor o igual al de la inyección simple, por lo tanto, la inyección principal es afectada negativamente por la inyección piloto [62].

En las Figuras 6.7 (b) y (c), se observa que conforme se desarrolla el chorro diésel de la inyección principal, el ángulo del chorro diésel incrementa, propiciando un mayor englobamiento de aire en lo que se refiere al proceso de mezcla [62, 61].

6.3 CONCLUSIONES

En el presente capítulo se ha profundizado en el conocimiento de los efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel, el cual fue caracterizado a través de los parámetros macroscópicos del chorro diésel. Seguidamente se sintetizaran las principales conclusiones alcanzadas en el presente capítulo.

- Con el uso de un Dwell time de 1.5 y 1.7 ms para una estrategia de inyección piloto, la penetración del chorro diésel de la inyección principal evoluciona a una mayor velocidad en comparación al de la inyección piloto, y la inyección simple, provocando un efecto negativo en el proceso de mezcla. Con el aumento del Dwell time a 2.0 y 2.25 ms se observó una desaceleración del chorro diésel de la inyección principal, reflejándose en valores menores de penetración del chorro diésel en comparación a los de la inyección piloto y simple, beneficiando el proceso de mezcla. Por otro, lado con tiempos largos de Dwell time como lo fue con 2.5 y 3.5 ms, se observó un comportamiento similar de la penetración del chorro diésel de la inyecciones piloto, principal y simple, lo anterior se atribuye principalmente a que después de un cierto tiempo los efectos provocados en el ambiente por la inyección piloto disminuyen gradualmente.
- El área del chorro diésel es afectada principalmente por la penetración, obteniendo valores del área del chorro diésel mayores para la inyecciones principales con Dwell times de 1.5 y 1.7 ms, lo cual se traduce en una mayor calidad de la mezcla aire-combustible. Con un Dwell time de 2.0 y 2.25 ms se observaron valores menores del área del chorro diésel para la inyección principal en com-

paración con la inyecciones piloto y simple, lo anterior se debe principalmente a la desaceleración del chorro diésel de la inyección principal. Con el Dwell time de 3.5 ms se observaron valores similares del área del chorro diésel para las inyecciones piloto, principal y simple, debido a la reducción de los efectos provocados por la inyección piloto en el ambiente.

- Con el uso de un Dwell time de 2.0 y 3.5 ms se obtuvo un mayor ángulo del chorro diésel de la inyección principal en comparación con el de las inyecciones piloto y simple, concluyendo que la selección de un correcto Dwell time, favorece el proceso de mezcla, por lo tanto, se esperaría tener un mejor proceso de combustión y una reducción de las emisiones contaminantes.

CAPÍTULO 7

CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

A lo largo de este capítulo se enumeraran las conclusiones formuladas con base en los resultados obtenidos de los Capítulos “Efectos de los parámetros de operación sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel” y “Efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla” además de los trabajos propuestos para la ampliación de este estudio.

7.1 CONCLUSIONES

El objetivo del presente trabajo es el de profundizar en el estudio del proceso de mezcla en un motor Diesel y como éste se ve afectado al variar los parámetros de inyección y al usar una estrategia de inyección piloto, esto a través de la visualización de los parámetros macroscópicos del chorro diésel líquido, es decir, penetración, área y ángulo del chorro diésel. Para lograr el objetivo previamente descrito, se ha desarrollado un circuito de control para inyectores diésel solenoides con el que es posible operar éste bajo una estrategia de inyección simple y bajo estrategias de inyección múltiple (estrategia de inyección piloto, estrategia de inyección dividida y estrategia de post-inyección), además del uso de herramientas experimentales y teóricas descritas a lo largo de este documento. Lo anterior con la finalidad de llevar a cabo los siguientes dos estudios.

- Efectos de los parámetros de operación sobre el proceso de mezcla en un motor Diesel (Efectos de la presión de inyección y Efectos de la presión en el interior de la cámara sobre el proceso de mezcla).
- Efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla.

7.1.1 EFECTOS DE LOS PARÁMETROS DE OPERACIÓN SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA EN UN MOTOR DIESEL

En el presente estudio se ha caracterizado el proceso de mezcla mediante los parámetros macroscópicos del chorro diésel penetración, área y ángulo del chorro diésel, los cuales han sido estudiados mediante dos escenarios distintos. El primer escenario consistió la variación de la presión de inyección y el segundo se basó en la variación de la presión en el interior de la cámara. De este estudio se han extraído las siguientes conclusiones.

- Conforme se incrementa la presión de inyección, incrementa la velocidad del chorro diésel, provocando una reducción en el tiempo que le toma al chorro llegar a su estabilización. El incremento de la presión en el interior de la cámara, disminuye la penetración del chorro diésel.
- Se obtienen mayores valores del área del chorro diésel a mayores presiones de inyección, debido al incremento en la masa de combustible inyectada, lo cual favorece el proceso de mezcla.
- La presión de inyección tiene un efecto despreciable sobre el ángulo del chorro, por otra parte con mayores niveles de presión en el interior de la cámara se obtiene un incremento de éste, favoreciendo el proceso de mezcla.
- Los resultados descritos anteriormente son consistentes con la bibliografía, por lo tanto el circuito de control para inyectores diésel solenoide es robusto, permitiéndolo manipular el inyector diésel solenoide de manera confiable y efectuar análisis en condiciones cercanas a las de un motor Diesel.

7.1.2 EFECTOS DE LA ESTRATEGIA DE INYECCIÓN PILOTO SOBRE EL PROCESO DE MEZCLA

En el presente estudio se ha caracterizado el proceso de mezcla bajo una estrategia de inyección piloto mediante los parámetros del chorro diésel es decir penetración, área y ángulo del chorro diésel, fijando una presión de inyección de 100 MPa y una presión en el interior de la cámara de 3 MPa, con un tiempo de energización de la inyección piloto de 0.4 ms y 1.5 ms para la inyección principal, además se usaron valores de Dwell time de 1.5, 1.7, 2.0, 2.25, 2.5 y 3.5 ms. Adicionalmente, se estableció un ensayo de referencia, el cual está compuesto por una inyección simple, conservando los niveles de P_{rail} y P_{back} iguales a los valores de la estrategia de inyección piloto y se fijó una duración del pulso eléctrico de 1.5 ms.

- Con el uso de Dwell time de 1.5 y 1.7 ms para una estrategia de inyección piloto, la penetración del chorro diésel de la inyección principal fue mayor en comparación con la inyección piloto y simple. Con el aumento del Dwell time a 2.0 y 2.25 ms se observaron valores menores de la penetración del chorro diésel para la inyección principal en comparación con las inyecciones piloto y simple. Por otro lado, con tiempos largos de Dwell time como lo fue con 2.5 y 3.5 ms, se observó un comportamiento similar de la penetración del chorro diésel de la inyecciones piloto, principal y simple, lo anterior se atribuye principalmente a que después de un cierto tiempo los efectos provocados en el ambiente por la inyección piloto disminuyen gradualmente.
- Con el uso de un Dwell time de 1.5 y 1.7 ms se obtuvieron valores del área del chorro diésel mayores para la inyección principal en comparación con las inyecciones piloto y simple, lo cual se traduce en una mayor calidad del proceso de mezcla aire-combustible. EL aumento del Dwell time a 2.0 y 2.25 ms, se observaron valores mayores del área del chorro diésel de las inyecciones piloto y simple en comparación de la inyección principal, lo anterior se debe principalmente a la desaceleración del chorro diésel de la inyección principal. Con el Dwell time de 3.5 ms, se observaron valores similares del área del chorro diésel para las inyecciones piloto, principal y simple, debido a la reducción de los efectos provocados por la inyección piloto en el ambiente.
- Con un Dwell time de 2.0 y 3.5 ms se obtuvieron valores mayores del ángulo del chorro diésel para la inyección principal en comparación con las inyecciones piloto y simple, lo cual se traduce en un mejor proceso de mezcla, por lo tanto, se esperaría tener un mejor proceso de combustión y una reducción de las emisiones contaminantes.
- Los resultados descritos anteriormente permiten identificar bajo que Dwell time se puede mejorar o empeorar el proceso de mezcla bajo una estrategia de inyección piloto, permitiendo dar una orientación sobre el máximo y mínimo Dwell time, en el que se pueden obtener beneficios.

7.2 TRABAJOS FUTUROS

Como ha sido posible ver en el presente trabajo se han estudiado los efectos de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla. A continuación se proponen algunas vías de como dar continuidad y complementar el presente trabajo.

- La propiedades físicas del combustible son importantes en el proceso de mezcla en un motor Diesel. Este estudio puede ser ampliado variando las propiedades del combustible utilizando mezclas diésel-biodiésel, caracterizando el proceso de mezcla bajo una estrategia de inyección piloto.
- Realizar un estudio de tasa de inyección, con la finalidad de determinar la influencia de la estrategia de inyección piloto sobre el levantamiento de la aguja del inyector y el flujo interno de la tobera, y así poder determinar su influencia en el proceso de mezcla.
- El proceso de mezcla puede ser estudiado mediante la caracterización de sus parámetros microscópicos del chorro diésel, como lo son la distribución de diámetros de gotas de combustible y la distribución de velocidades de gotas de combustible, los cuales dependen de los diferentes procesos físicos que tienen lugar en el proceso de inyección. Por lo tanto, se puede ampliar este estudio determinando el efecto de la estrategia de inyección piloto sobre el proceso de mezcla mediante la caracterización de sus parámetros microscópicos, utilizando la técnica óptica de anemometría de fase Doppler (*Phase Doppler Anemometry, PDA*).
- El presente trabajo se realizó bajo condiciones no evaporativas y no reactivas, por lo tanto los valores utilizados en las estrategias de inyección piloto del presente trabajo deben ser implementadas en un motor Diesel, con la finalidad de evaluar su rendimiento mediante las mediciones de las emisiones contaminantes, con el uso de un analizador de gases.

REFERENCIAS

- [1] Jairo Téllez, Alba Rodríguez, and Álvaro Fajardo. Contaminación por monóxido de carbono: un problema de salud ambiental. *Revista de salud pública*, 8(1), 2006.
- [2] Boe, reglamento (ue) no 136/2014 de la comisión, de 11 de febrero de 2014, por el que se modifican la directiva 2007/46/ce del parlamento europeo y del consejo, el reglamento (ce) no 692/2008 de la comisión en lo que respecta a las emisiones procedentes de turismos y vehículos comerciales ligeros (euro 5 y euro 6) y el reglamento (ue) no 582/2011 de la comisión en lo que respecta a las emisiones de los vehículos pesados (euro vi).
- [3] Muzaffar Ali Quazi, Vikas Dhiman, et al. Development of two-stage turbo-charger system for off road application diesel engine in order to achieve 75 hp. Technical report, SAE Technical Paper, 2013.
- [4] Paul Zelenka, Hans Aufinger, Walter Reczek, and Wolfgang Cartellieri. Cooled egr-a key technology for future efficient hd diesels. Technical report, SAE Technical Paper, 1998.
- [5] Alexander Gorel and John Lawrence Calabrese. Low pressure egr system for diesel engines, October 16 2001. US Patent 6,301,887.
- [6] Santiago A Molina. *Influencia de los parámetros de inyección y la recirculación de gases de escape sobre el proceso de combustión en un motor diesel*. Reverté, 2005.

- [7] José M Desantes and Francisco Payri González. *Motores de combustión interna alternativos*. Universidad Politécnica de Valencia, 2011.
- [8] Daniel A Nehmer and Rolf D Reitz. Measurement of the effect of injection rate and split injections on diesel engine soot and nox emissions. *SAE transactions*, pages 1030–1041, 1994.
- [9] Christophe Dumouchel. On the experimental investigation on primary atomization of liquid streams. *Experiments in fluids*, 45(3):371–422, 2008.
- [10] Hiroyuki Hiroyasu. Spray breakup mechanism from the hole-type nozzle and its applications. *Atomization and Sprays*, 10(3-5), 2000.
- [11] Arthur H Lefebvre and Vincent G McDonell. *Atomization and sprays*. CRC press, 2017.
- [12] RD Reitz and FV Bracco. Mechanism of atomization of a liquid jet. *The Physics of Fluids*, 25(10):1730–1742, 1982.
- [13] Francisco Ruiz and L He. Turbulence inside a cavitating injector orifice: a different animal. *Proceedings of ILASS-America, Davis, CA, US*, 1998.
- [14] Nasser Ashgriz. *Handbook of atomization and sprays: theory and applications*. Springer Science & Business Media, 2011.
- [15] J Gimeno. Estudio de la inyección diésel mediante la medida del flujo de cantidad de movimiento de chorro. *Universidad Politécnica de Valencia, Editorial Reverté, SA*, 2011.
- [16] Yutaro Wakuri, Masaru Fujii, Tatsuo Amitani, and Reijiro Tsuneya. Studies on the penetration of fuel spray in a diesel engine. *Bulletin of JSME*, 3(9):123–130, 1960.
- [17] José M Desantes, Jean Arrègle, J Javier López, and Sjoerd Hermens. Experimental characterization of outlet flow for different diesel nozzle geometries. Technical report, SAE Technical Paper, 2005.

- [18] R Payri, FJ Salvador, J Gimeno, and LD Zapata. Diesel nozzle geometry influence on spray liquid-phase fuel penetration in evaporative conditions. *Fuel*, 87(7):1165–1176, 2008.
- [19] JC Dent. A basis for the comparison of various experimental methods for studying spray penetration. Technical report, SAE Technical Paper, 1971.
- [20] E Delacourt, B Desmet, and B Besson. Characterisation of very high pressure diesel sprays using digital imaging techniques. *Fuel*, 84(7):859–867, 2005.
- [21] Avinash Kumar Agarwal, Atul Dhar, Jai Gopal Gupta, Woong Il Kim, Chang Sik Lee, and Sungwook Park. Effect of fuel injection pressure and injection timing on spray characteristics and particulate size–number distribution in a biodiesel fuelled common rail direct injection diesel engine. *Applied energy*, 130:212–221, 2014.
- [22] Hongzhan Xie, Lanbo Song, Yizhi Xie, Dong Pi, Chunyu Shao, and Qizhao Lin. An experimental study on the macroscopic spray characteristics of biodiesel and diesel in a constant volume chamber. *Energies*, 8(6):5952–5972, 2015.
- [23] Balaji Mohan, Wenming Yang, Kun Lin Tay, and Wenbin Yu. Experimental study of spray characteristics of biodiesel derived from waste cooking oil. *Energy Conversion and Management*, 88:622–632, 2014.
- [24] Jean-Guillaume Nerva, Caroline L Genzale, Sanghoon Kook, José M García-Oliver, and Lyle M Pickett. Fundamental spray and combustion measurements of soy methyl-ester biodiesel. *International Journal of Engine Research*, 14(4):373–390, 2013.
- [25] Avinash Kumar Agarwal, Sibendu Som, Pravesh Chandra Shukla, Harsh Goyal, and Douglas Longman. In-nozzle flow and spray characteristics for mineral diesel, karanja, and jatropha biodiesels. *Applied Energy*, 156:138–148, 2015.

- [26] Kenji Amagai, Yukihiro Hashimoto, and Masataka Arai. Ignition and combustion characteristics of two-stage injection diesel spray. *JSAE review*, 20(3):407–411, 1999.
- [27] T Rente, VI Golovitchev, and Ingemar Denbratt. Effect of injection parameters on auto-ignition and soot formation in diesel sprays. Technical report, SAE technical paper, 2001.
- [28] T Rente, Golovitchev VI, and I Denbratt. (1-08) numerical study of n-heptane spray auto-ignition at different levels of pre-ignition turbulence (de-3) diesel engine combustion 3-modeling). In *The Proceedings of the International symposium on diagnostics and modeling of combustion in internal combustion engines 01.204*, page 12. The Japan Society of Mechanical Engineers, 2001.
- [29] Cheolwoong Park, Sanghoon Kook, and Choongsik Bae. Effects of multiple injections in a hsd diesel engine equipped with common rail injection system. Technical report, SAE Technical Paper, 2004.
- [30] John B Heywood et al. Internal combustion engine fundamentals. 1988.
- [31] Charles Fayette Taylor. *The Internal-combustion Engine in Theory and Practice: Combustion, fuels, materials, design*, volume 2. MIT press, 1985.
- [32] Wilhelm Bosch. The fuel rate indicator: a new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection. Technical report, SAE Technical Paper, 1966.
- [33] Takemi Chikahisa and Tadashi Murayama. Theory and experiments on air-entrainment in fuel sprays and their application to interpret diesel combustion processes. Technical report, SAE Technical Paper, 1995.
- [34] David Correias. *Estudio teórico-experimental del chorro libre diesel isoterma*. PhD thesis, Tesis doctoral, Depto. de Máquinas y Motores Térmicos, Universidad Politécnica de Valencia, España, 1998.

- [35] Korneel De Rudder. An approach to low temperature combustion in a small hsd diesel engine, 2007.
- [36] JC Ricaud and F Lavoisier. Optimizing the multiple injection settings on an hsd diesel engine. In *Thermo-and Fluid Dynamic Processes in Diesel Engines 2*, pages 199–234. Springer, 2004.
- [37] TF Su, MA Patterson, Rolf D Reitz, and PV Farrell. Experimental and numerical studies of high pressure multiple injection sprays. Technical report, SAE Technical Paper, 1996.
- [38] Hyun Kyu Suh, Seung Hyun Yoon, and Chang Sik Lee. Effect of multiple injection strategies on the spray atomization and reduction of exhaust emissions in a compression ignition engine fueled with dimethyl ether (dme). *Energy & Fuels*, 24(2):1323–1332, 2010.
- [39] Su Han Park, Hyung Jun Kim, and Chang Sik Lee. Effect of multiple injection strategies on combustion and emission characteristics in a diesel engine. *Energy & Fuels*, 30(2):810–818, 2016.
- [40] Hiro Hiroyasu, Haiyan Miao, Tomo Hiroyasu, Mitunori Miki, Jiro Kamiura, and Sinya Watanabe. Genetic algorithms optimization of diesel engine emissions and fuel efficiency with air swirl, egr, injection timing and multiple injections. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [41] Yi Liu and Rolf D Reitz. Optimizing hsd diesel combustion and emissions using multiple injection strategies. Technical report, SAE Technical paper, 2005.
- [42] Gm El Diwani, NK Attia, and SI Hawash. Development and evaluation of biodiesel fuel and by-products from jatropha oil. *International Journal of Environmental Science & Technology*, 6(2):219–224, 2009.
- [43] JJ Zhang, JE McCreanor, P Cullinan, KF Chung, P Ohman-Strickland, IK Han, L Järup, and MJ Nieuwenhuijsen. Health effects of real-world exposure to diesel

- exhaust in persons with asthma. *Research report (Health Effects Institute)*, (138):5–109, 2009.
- [44] Balaji Mohan, Wenming Yang, and Siaw kiang Chou. Fuel injection strategies for performance improvement and emissions reduction in compression ignition engines—a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 28:664–676, 2013.
- [45] Omar Torres Garza. Efecto de los parámetros de inyección sobre el proceso de mezcla en un motor diésel. Master’s thesis, Facultad de ingeniería mecánica y eléctrica. Universidad Autónoma de Nuevo León, 2016.
- [46] Noda A Sato Y. An experimental study on dme spray characteristics by using schlieren optical systems. *Environment and Energy reserchdivision*.
- [47] Guillermo Rubio-Gómez, S Martínez-Martínez, Luis F Rua-Mojica, Pablo Gómez-Gordo, and Oscar A de la Garza. Automatic macroscopic characterization of diesel sprays by means of a new image processing algorithm. *Measurement Science and Technology*, 29(5):055406, 2018.
- [48] Jian Xiong and Hong Gu. An intelligent dual-voltage driving method and circuit for a common rail injector for heavy-duty diesel engines. *IEEE Access*, 6:27681–27689, 2018.
- [49] M Taghizadeh, A Ghaffari, and F Najafi. Modeling and identification of a solenoid valve for pwm control applications. *Comptes Rendus Mecanique*, 337(3):131–140, 2009.
- [50] Jie Hui Li, Da Wei Liu, Guo Wei Shi, Le Sheng Ding, and Guang Yao Zhong. Design and simulation of solenoid valve driving circuit module for high pressure common rail diesel injector. In *Applied Mechanics and Materials*, volume 602, pages 2645–2648. Trans Tech Publ, 2014.
- [51] Haifeng Lu, Jun Deng, Zongjie Hu, Zhijun Wu, and Liguang Li. Impact of

- control methods on dynamic characteristic of high speed solenoid injectors. *SAE International Journal of Engines*, 7(2014-01-1445):1155–1164, 2014.
- [52] Robert Bosch. *Sistemas de inyección diesel por acumulador Common Rail*. Reverté, 2005.
- [53] Wei Du, Juejue Lou, Yu Yan, Wenhua Bao, and Fushui Liu. Effects of injection pressure on diesel sprays in constant injection mass condition. *Applied Thermal Engineering*, 121:234–241, 2017.
- [54] Vicente Domenech Llopis. *Estudio de nuevas estrategias para el control de la combustión en modos parcialmente premezclados en motores de encendido por compresión*. PhD thesis, Universitat Politècnica de València, 2013.
- [55] Xiangang Wang, Zuohua Huang, Olawole Abiola Kuti, Wu Zhang, and Keiya Nishida. Experimental and analytical study on biodiesel and diesel spray characteristics under ultra-high injection pressure. *International journal of heat and fluid flow*, 31(4):659–666, 2010.
- [56] Ziman Wang, Hongming Xu, Changzhao Jiang, and Mirosław L Wyszynski. Experimental study on microscopic and macroscopic characteristics of diesel spray with split injection. *Fuel*, 174:140–152, 2016.
- [57] Chao He, Yunshan Ge, Jianwei Tan, and Xiukun Han. Spray properties of alternative fuels: A comparative analysis of biodiesel and diesel. *International journal of energy research*, 32(14):1329–1338, 2008.
- [58] Stephen Busch, Kan Zha, Paul C Miles, Alok Warey, Francesco Pesce, Richard Peterson, and Alberto Vassallo. Experimental and numerical investigations of close-coupled pilot injections to reduce combustion noise in a small-bore diesel engine. *SAE International Journal of Engines*, 8(2):660–678, 2015.
- [59] Su Han Park, Seung Hyun Yoon, and Chang Sik Lee. Effects of multiple-injection strategies on overall spray behavior, combustion, and emissions reduction characteristics of biodiesel fuel. *Applied Energy*, 88(1):88–98, 2011.

- [60] Hua Zhao. *Advanced direct injection combustion engine technologies and development: diesel engines*, volume 2. Elsevier, 2009.
- [61] PV Farrell, CT Chang, and TF Su. High pressure multiple injection spray characteristics. *SAE transactions*, pages 1271–1280, 1996.
- [62] Seoksu Moon, Taku Tsujimura, Yuan Gao, Suhan Park, Jin Wang, Naoki Kurimoto, Yoshiaki Nishijima, and Mitsuharu Oguma. Biodiesel effects on transient needle motion and near-exit flow characteristics of a high-pressure diesel injector. *International Journal of Engine Research*, 15(4):504–518, 2014.

APÉNDICE A

MEDICIÓN DE INDUCTANCIA E IMPEDANCIA DE INYECTORES DIÉSEL SOLENOIDE

En el presente anexo se proporcionan los detalles del procedimiento realizado para la medición de la inductancia e impedancia de inyectores diésel solenoide, los cuales son fundamentales para la caracterización eléctrica de éstos. El presente anexo se divide en cuatro secciones: en el apartado “Objetivo” se describe la finalidad con la que se realizó la actividad. En el apartado “Metodología experimental y de análisis”, se presentan las herramientas experimentales y de análisis que se emplearon en el estudio. En la sección “Resultados”, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones. Finalmente, las conclusiones obtenidas de la actividad se resumen en la sección “Conclusiones”.

A.1 OBJETIVO

El objetivo principal de la actividad consiste en caracterizar el inyector diésel solenoide eléctricamente, a través de la medición de su inductancia (R) e impedancia (L), con lo cual será posible tener un modelo físico del inyector diésel solenoide y poder ser usado en simulaciones.

A.2 METODOLOGÍA DE LA ACTIVIDAD

Primeramente se seleccionaron los inyectores diésel solenoide con los cuales se cuenta en el laboratorio de fenómenos de transporte, éstos se muestran en la Figura A.1, también se les colocó una nomenclatura distinta para su identificación con la leyenda DUT (por sus siglas en ingles *Divice Under Test*).



Figura A.1: Inyectores diésel solenoide caracterizados eléctricamente

Para realizar las mediciones se utilizó, un multímetro digital Hewlett Packard 34401A, para la medición de la impedancia y un multímetro digital BK PRECISION 875B, para la medición de su inductancia, ambos equipos utilizados se pueden observar en la Figura A.2.

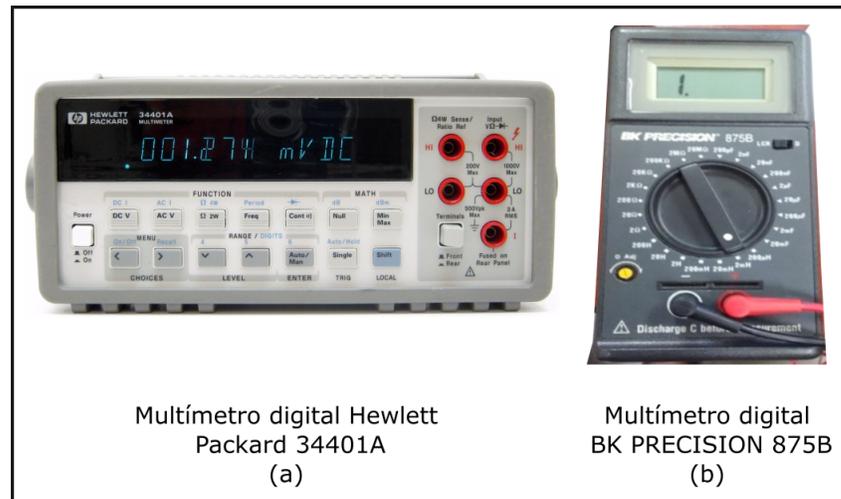


Figura A.2: Equipos utilizados para la medición de inductancia (a) e impedancia (b).

Para cada inyector se realizaron tres mediciones de su inductancia e impedancia de acuerdo al siguiente procedimiento. Primeramente, al inyector DUT1 se le midió su impedancia e inductancia con los equipos mencionados anteriormente, seguido esto se llevó a cabo el mismo procedimiento para los inyectores DUT2, DUT3 y DUT4. Una vez finalizada la mediciones de los cuatro inyectores, el procedimiento se repitió dos veces más con la finalidad de observar si existían variaciones en las mediciones de los parámetros L y R, con lo que se preveía falsas mediciones.

Una vez obtenidas las tres mediciones de inductancia e impedancia, para cada inyector diésel solenoide, se obtuvo el promedio de las tres mediciones. Los resultados obtenidos se presentan en la siguiente sección.

A.3 RESULTADOS

A continuación se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de cada inyector diésel solenoide en las Tablas A.1, A.2 y A.3. Mientras que en la Tabla A.4, se muestra el promedio de las tres mediciones de cada inyector diésel solenoide.

Se observa que las mediciones y el promedio de los inyectores diésel solenoide DUT1 y DUT2 son muy parecidas, lo anterior debido a que éstos dos son del mismo modelo. Las mediciones pertenecientes al inyector DUT4, están por encima de las de los otros inyectores, lo anterior se debe a que éste en comparación de los otros tres inyectores diésel solenoide es de mayor tamaño, por lo que su sistema eléctrico es mas robusto.

Tabla A.1: Resultados obtenidos de la primera medición de impedancia e inductancia.

Medición 1				
	DUT1	DUT2	DUT3	DUT4
R (Ohms)	0.483	0.454	0.374	0.838
L (mH)	0.285	0.297	0.320	0.412

Tabla A.2: Resultados obtenidos de la segunda medición de impedancia e inductancia.

Medición 2				
	DUT1	DUT2	DUT3	DUT4
R (Ohms)	0.483	0.490	0.369	0.912
L (mH)	0.286	0.297	0.321	0.413

Tabla A.3: Resultados obtenidos de la tercera medición de impedancia e inductancia.

Medición 3				
	DUT1	DUT2	DUT3	DUT4
R (Ohms)	0.466	0.462	0.367	0.844
L (mH)	0.285	0.297	0.321	0.413

Tabla A.4: Promedio de los resultados obtenidos de la medición de impedancia e inductancia.

Promedio				
	DUT1	DUT2	DUT3	DUT4
R (Ohms)	0.477	0.462	0.367	0.844
L (mH)	0.285	0.297	0.321	0.413

A.4 CONCLUSIONES

El presente anexo se centró en la metodología utilizada para caracterizar eléctricamente un inyector diésel solenoide, éste fue caracterizado mediante la medición de su inductancia e impedancia. En las siguientes líneas se sintetizaran las principales conclusiones obtenidas del presente anexo.

- La caracterización eléctrica de los inyectores diésel solenoide a través de la obtención de los valores de impedancia e inductancia, permiten obtener un modelo físico de su sistema eléctrico.
- Los datos obtenidos de inductancia e impedancia, permiten realizar simulaciones de circuitos de activación para inyectores diésel solenoide, con los cuales se pueden operar éstos bajo estrategias de inyección simple y múltiple.

APÉNDICE B

SIMULACIÓN DE CIRCUITO DE CONTROL PARA INYECTORES DIÉSEL SOLENOIDE

En el presente anexo se proporcionan los detalles del desarrollo de un circuito de control para inyectores diésel solenoide, el cual puede ser operado bajo una estrategia de inyección simple o bajo estrategias de inyección múltiple. El presente anexo se divide en cuatro secciones: en el apartado “Objetivo” se describe la finalidad con la que se realizó la actividad. En el apartado “Metodología”, se presentan las herramientas teóricas utilizadas en la actividad y el desarrollo del circuito de control para inyectores diésel solenoide. En la sección “Resultados y discusiones”, se muestran los resultados obtenidos con el uso del circuito de control para inyectores diésel solenoide. Finalmente, las conclusiones obtenidas de la actividad se resumen en la sección “Conclusiones”.

B.1 OBJETIVO

El objetivo principal de la actividad consiste en el desarrollo de un circuito de control para inyectores diésel solenoide, el cual cumpla con los requerimientos necesarios para efectuar tanto estrategia de inyección simple como estrategias de inyección piloto, lo anterior a través de la simulación del circuito electrónico y haciendo uso del modelo físico del inyector diésel solenoide descrito en el Anexo A.

B.2 METODOLOGÍA

El accionamiento de un inyector diésel solenoide requiere una alta tensión y corriente, con lo cual se logra la apertura del inyector diésel solenoide, después de esto la corriente debe ser reducida al mínimo para mantener abierto el inyector y evitar su sobrecalentamiento. Para el correcto funcionamiento de un inyector diésel solenoide se adopta un circuito de activación PWM.

Una vez determinado el tipo de circuito electrónico necesario para la operación del inyector diésel solenoide, éste fue modelado en el software Ni Multisim 14.0. El modelo del circuito de conducción se puede observar en la Figura B.1, asimismo se puede observar la representación del inyector diésel solenoide como un circuito en serie LR (circuito eléctrico que contiene una resistencia y una bobina eléctrica en serie), un POWERMOSFET IRL530 el cual puede trabajar con hasta 100 V y una corriente de 30 A además de una fuente de 24 V.

Para los datos introducidos a la simulación del circuito de control para inyectores diésel solenoide que se muestran en la Figura B.1, primeramente se retoman los valores promedio de la inductancia e impedancia obtenidos en el Anexo A, los cuales fueron de una L de 285 μ H y una R de 0.477 Ohms, seguidamente se introducen los valores de los pulsos V1, V2 y V3, los cuales fueron de 176 μ s para el pulso de apertura, mientras que el pulso de mantenida el cual es una señal PWM, tiene un

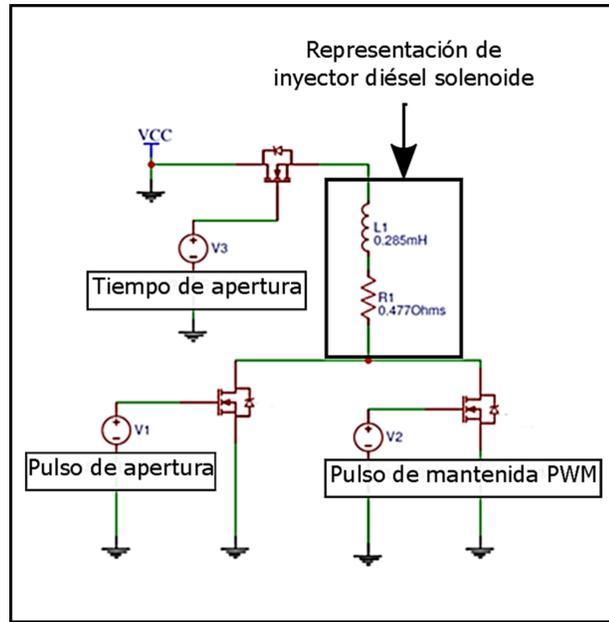


Figura B.1: Modelo de circuito de control para inyectores diésel solenoide.

ancho de pulso de $100 \mu\text{s}$ y un periodo de $110 \mu\text{s}$, con lo cual la corriente se reduce al mínimo necesario para que el inyector se mantenga abierto durante el evento de inyección.

En la Figura B.2, se muestra el resultado de la simulación del circuito de control, esto mediante la respuesta en corriente del inyector diésel solenoide, la cual alcanza un pico máximo de 20 A y una corriente de mantenida de 10 A , lo que satisface por completo la demanda de trabajo del inyector diésel solenoide.

B.3 RESULTADOS Y DISCUSIONES

Para validar la precisión y adaptabilidad del modelo del circuito de accionamiento para inyectores diésel solenoide, éste se implementó en PCB (por sus siglas en inglés, *Printed Circuit Board*) y se probó en un inyector diésel solenoide, del cual fueron tomados los datos utilizados en la simulación. Se dispuso de un osciloscopio de la marca KEYSIGHT y una pinza amperimétrica i310s de la marca FLUKE, con

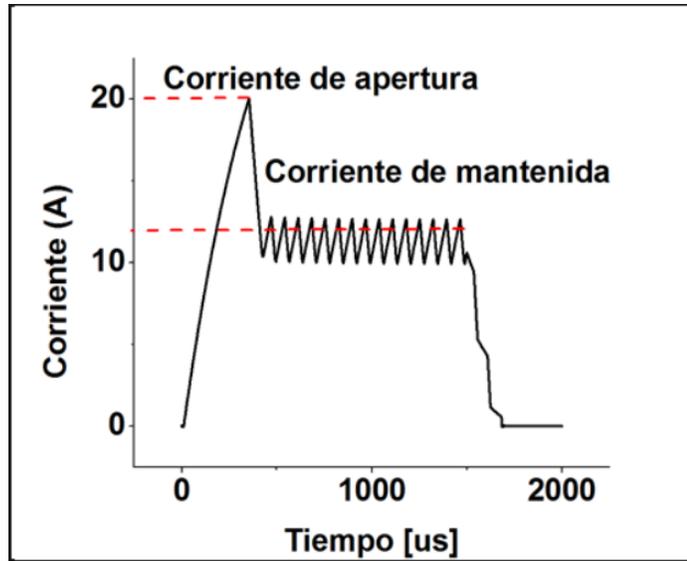


Figura B.2: Resultado de simulación del circuito de conducción y representación del inyector diésel solenoide, esto mediante la respuesta en corriente.

la cual se obtuvo la respuesta en corriente del inyector diésel solenoide.

En la Figura B.3, se muestra el perfil de corriente el perfil de corriente del inyector diésel solenoide, al igual que el tiempo que le toma llegar a la corriente de apertura, cuyo valor es de 20 A y un tiempo de 182 μ s. En la Figura B.4, se ilustra la corriente de mantenida, cuyo valor aproximado es de 10 A, esto durante el tiempo que resta del evento de inyección.



Figura B.3: Perfil de corriente de inyectores diésel solenoide y su corriente de apertura



Figura B.4: Perfil de corriente de inyectores diésel solenoide y su corriente de mantenida

La medición de la corriente de apertura y mantenida es muy cercana a los resultados obtenidos en la simulación, lo que indica que el circuito de control para inyectores diésel solenoide trabaja de manera adecuada.

Una vez comprobado, el correcto funcionamiento del circuito de conducción y comprobar que se cumplen las condiciones necesarias para la operación de éste, se procedió a probar el circuito de accionamiento bajo la condición de una estrategia de inyección piloto.

En las Figuras B.5 y Figura B.6, se muestra la respuesta en corriente del inyector diésel solenoide, para una estrategia de inyección piloto, en la cual se tiene un tiempo de energización de $400 \mu s$ para la inyección piloto y $1500 \mu s$ para la inyección principal, y utilizando un Dwell time de 1000 y $200 \mu s$, respectivamente. Esto permite comprobar que el circuito de accionamiento, tiene la capacidad de operar el inyector diésel solenoide y modificar diferentes parámetros involucrados en una estrategia de inyección piloto.

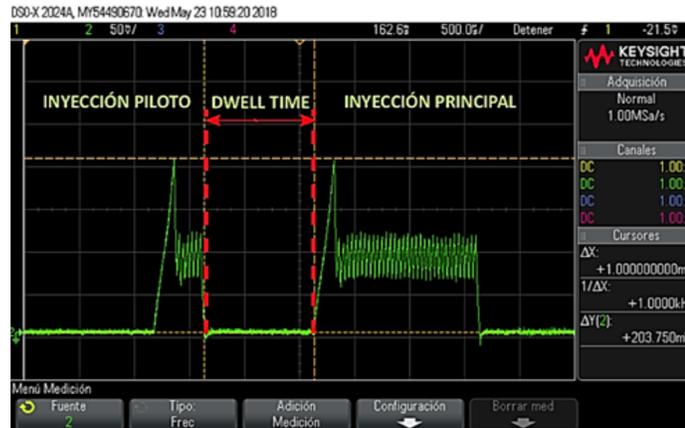


Figura B.5: Perfil de corriente de inyectores diésel solenoide, bajo una estrategia de inyección piloto y un Dwell time de $200 \mu s$



Figura B.6: Perfil de corriente de inyectores diésel solenoide, bajo una estrategia de inyección piloto y un Dwell time de $1000 \mu s$

B.4 CONCLUSIONES

El presente anexo se centró en la metodología utilizada para el diseño de un circuito de control para inyectores diésel solenoide, haciendo uso de una simulación en la cual se implementa un modelo físico de la parte eléctrica del inyector diésel solenoide. Seguidamente, se sintetizaran las principales conclusiones alcanzadas en el presente Anexo.

- El circuito de control para inyectores diésel solenoide cumple con los requisitos necesarios para operar de manera eficiente diferentes tipos de inyectores diésel solenoide, satisfaciendo las necesidades de la inyección diésel common-rail de alta presión.
- El método del diseño de simulación del circuito y la representación del inyector diésel solenoide, en un modelo físico RL, es un método confiable y eficiente, permitiendo caracterizar diferentes inyectores y operar de manera adecuada cada uno de ellos.
- En las estrategias de inyección múltiple, como es el caso de la estrategia de inyección piloto se incrementan significativamente el número de variables que intervienen en un evento de inyección (i.e. duración de la inyección piloto, duración del Dwell time y duración de la inyección principal) y éstas pueden ser controladas de manera eficiente con el uso del circuito de control para inyectores diésel solenoide.
- Los resultados obtenidos de la simulación del circuito del control para inyectores diésel solenoide son consistentes, con lo resultados obtenido experimentalmente. Por consiguiente, el circuito de control desarrollado será de gran utilidad para las personas que deseen estudiar el proceso de inyección bajo estrategias de inyección múltiple, y no cuenten con equipos especializados para la aplicación de dichas estrategias.