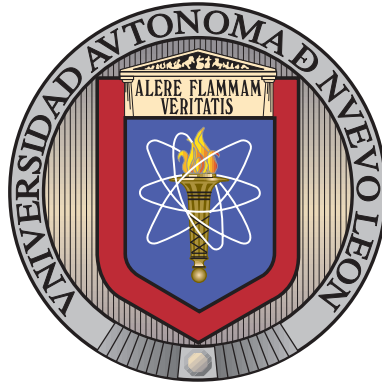


UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL  
PROCESO DE INYECCIÓN EMPLEANDO UN  
INYECTOR DIÉSEL SOLENOIDE Y  
PIEZOELÉCTRICO BAJO DIFERENTES  
ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN MÚLTIPLE

POR

RICARDO MARTÍNEZ CARRILLO

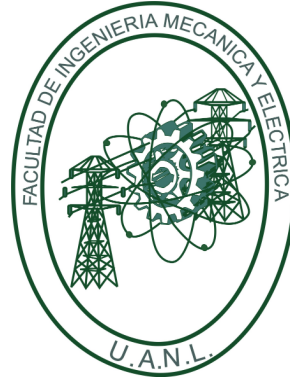
COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN TECNOLOGÍA ENERGÉTICA

NOVIEMBRE 2021

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA Y ELÉCTRICA

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO



ESTUDIO SOBRE EL COMPORTAMIENTO DEL  
PROCESO DE INYECCIÓN EMPLEANDO UN  
INYECTOR DIÉSEL SOLENOIDE Y  
PIEZOELÉCTRICO BAJO DIFERENTES  
ESTRATEGIAS DE INYECCIÓN MÚLTIPLE

POR

RICARDO MARTÍNEZ CARRILLO

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRÍA EN CIENCIAS DE LA INGENIERÍA  
CON ORIENTACIÓN EN TECNOLOGÍA ENERGÉTICA

NOVIEMBRE 2021

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

Los miembros del Comité de Evaluación de Tesis recomendamos que la Tesis “Estudio sobre el comportamiento del proceso de inyección empleando un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico bajo diferentes estrategias de inyección múltiple”, realizada por el estudiante Ricardo Martínez Carrillo, con número de matrícula 1104774, sea aceptada para su defensa como requisito parcial para obtener el grado de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Tecnología Energética.

**El Comité de Evaluación de Tesis**

Dr. Oscar Alejandro de la Garza de León  
Director

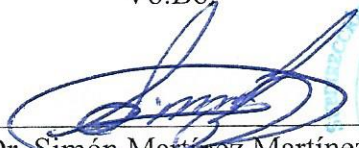
M.C. Miguel García Yera  
Co-director

Dr. Simón Martínez Martínez  
Revisor

Dr. Raúl Hernández Altamirano  
Revisor

Dr. Valente Hernández Pérez  
Revisor

Vo.Bo.

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Simón Martínez Martínez  
Subdirector de Estudios de Posgrado

Institución 190001

Programa 930753

Acta Núm. 3959

Ciudad Universitaria, a 05 de noviembre de 2021.

# AGRADECIMIENTOS

---

*A Dios, quien estoy seguro siempre me acompaña y permitió culminar de forma exitosa este proyecto.*

*A mi esposa Mayela Rosalia Rodríguez Martínez e hijos, Valentina Martínez Rodríguez y Rafael Rodríguez Martínez, quienes me acompañaron y apoyaron incondicionalmente.*

*A mi padre Santos Martínez Rivera y a mi madre Ma. Elena Carrillo Cruz, quienes con grandes valores y enormes deseos de salir adelante, forjaron esta gran familia. A mis hermanos, Jaime, Alejandro, Laura y Leticia, quienes siempre han estado al pendiente de mi y mi familia. A mis suegros, el Sr. José Rodríguez Gallegos y la Sra. Mayela Martínez Almendariz, quienes siempre estuvieron al pendiente de mi familia y que si pedirles, nos apoyaron en todo momento.*

*A todo el grupo de energías térmicas y renovables, compañeros alumnos y profesores, quienes me compartieron sus conocimientos para concluir satisfactoriamente este proyecto. Especialmente, al Dr. Oscar A. de la Garza de León, quien siempre estuvo atento, al pendiente y apoyándome en este proyecto. Al M. C. Miguel García Yera, de quien sus conocimientos y asesorías fueron fundamentales en este estudio. Al Dr. Simón Martínez Martínez, quien con su visión y asesoría nos llevo a buen puerto. Al Dr. Arturo Morales Fuentes, de quien admiro sus conocimientos y agradezco sus consejos, así como sus tutorías.*

*A la FIME por permitirme participar en su excelente programa de Maestría en Ciencias de la Ingeniería con Orientación en Tecnología Energética de excelencia.*

*Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) del Gobierno de México por apoyar esta investigación a través del proyecto número 315787 del LaN-DACBio.*

*Al Programa de Apoyo a la Investigación Científica y Tecnológica PAICYT-UANL (IT1829-21) por apoyar la presente investigación.*

*A la Fundación DENSO Norteamérica (proyecto: Influence of multiple-injection strategies on the injection process using direct-acting piezoelectric and solenoid diesel injectors) por contribuir en la realización del presente trabajo.*

*Este trabajo fue se realizó en los Laboratorios de Investigación e Innovación en Tecnología Energética (LIITE) del Grupo de Energías Térmica y Renovable (GETR) de la FIME-UANL.*

# DEDICATORIA

---

*A mis padres, que en todo momento y circunstancias han apoyando cada uno de mis proyectos de vida, inculcando el amor a la familia y la cultura del trabajo.*

*Muy especialmente a mi padre, quien me vio iniciar este proyecto, pero lamentablemente no pudo verlo culminado.*

*A mi esposa e hijos, quienes me apoyaron y acompañaron en todo momento en este proyecto.*

# ÍNDICE GENERAL

---

<b>Agradecimientos</b>	<b>IV</b>
<b>Dedicatoria</b>	<b>VI</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
1.1. Motivación . . . . .	2
1.2. Antecedentes . . . . .	6
<b>2. Estado actual del conocimiento del proceso de inyección</b>	<b>10</b>
2.1. Sistema de inyección diésel . . . . .	11
2.2. Sistema de inyección diésel: definición y función . . . . .	12
2.3. Sistemas de inyección directa . . . . .	13
2.3.1. Sistema de inyección diésel common-rail . . . . .	13
2.4. Flujo interno en las toberas diésel . . . . .	19
2.4.1. Principios de la tasa de inyección diésel . . . . .	20
2.4.2. Descripción del Flujo de cantidad de movimiento . . . . .	24
2.4.3. Parámetros del flujo interno . . . . .	25

---

2.5. Descripción del chorro diésel . . . . .	27
2.6. Regímenes de atomización del chorro diésel . . . . .	28
2.7. Parámetros macroscópicos del chorro de combustible . . . . .	30
2.8. Parámetros microscópicos del chorro de combustible . . . . .	32
2.9. Control de la combustión mediante el proceso de inyección . . . . .	33
2.9.1. Inyección simple . . . . .	33
2.9.2. Inyección múltiple . . . . .	34
<b>3. Planteamiento de la Tesis</b>	<b>36</b>
3.1. Resumen de la revisión bibliográfica . . . . .	37
3.2. Hipótesis . . . . .	39
3.3. Objetivos del estudio . . . . .	39
3.3.1. Objetivo general . . . . .	39
3.3.2. Objetivos específicos . . . . .	39
<b>4. Metodología</b>	<b>41</b>
4.1. Herramientas experimentales . . . . .	42
4.1.1. Instalación experimental del tasímetro . . . . .	42
4.2. Plan de trabajo . . . . .	49
4.2.1. Condiciones de operación . . . . .	49
4.3. Procesamiento de los datos obtenidos . . . . .	56
4.3.1. Obtención y procesamiento de datos . . . . .	56



---

4.3.2. Obtención de parámetros . . . . .	56
<b>5. Resultados</b>	<b>60</b>
5.1. Coeficiente de descarga . . . . .	61
5.2. Retraso hidráulico . . . . .	63
5.2.1. Retraso hidráulico en el inyector diésel solenoide . . . . .	63
5.2.2. Retraso hidráulico en el inyector diésel piezoeléctrico . . . . .	68
5.3. Masa de combustible inyectada . . . . .	74
5.3.1. Masa de combustible inyectada por el inyector diésel solenoide	74
5.3.2. Masa de combustible inyectada por el inyector diésel piezo- eléctrico . . . . .	79
<b>6. Conclusiones</b>	<b>85</b>
6.1. Trabajos futuros . . . . .	90
<b>A. Preparación y análisis de los archivos</b>	<b>91</b>
A.1. Preparación de los archivos para su análisis . . . . .	92
A.2. Análisis de los archivos . . . . .	97
<b>B. Calibración</b>	<b>114</b>
B.1. Calibración del tasímetro . . . . .	115

# ÍNDICE DE FIGURAS

---

1.1. Consumo final energético por sector y energético en 2018 en México (Petajoules). . . . .	3
1.2. Normas de emisiones de Europa, México y EUA de a) vehículos pesados y b) vehículos livianos. . . . .	4
1.3. Límites de emisiones de las normativas Euro para vehículos livianos. .	5
1.4. Descripción del ciclo de operación de un motor Diésel. . . . .	6
1.5. Sistema de inyección diésel Bosch. . . . .	7
1.6. Esquemas típicos de la tasa de inyección obtenidos al emplear estrategias de dos eventos de inyección: (a) piloto; (b) de post-inyección y (c) dividida. . . . .	9
2.1. Descripción del sistema de inyección Common-Rail . . . . .	13
2.2. Descripción del inyector diésel solenoide. . . . .	15
2.3. Válvula de accionamiento electromagnética de un inyector solenoide.	15
2.4. Descripción del inyector diésel piezoeléctrico. . . . .	16
2.5. Principio de apertura y cierre de un inyector tipo solenoide. . . . .	17

---

2.6. Esquema de la cavitación generada por flujo de combustible en los orificios de una tobera diésel. . . . .	20
2.7. Tasímetro: indicador de curva de descarga de tasa de inyección (IRDCI). . . . .	21
2.8. Señales registradas en un osciloscopio durante la medición del caudal másico al emplear una presión de inyección de 100 MPa, una contra-presión de 5 MPa, y una estrategia de post-inyección, con un tiempo de energización del pulso principal de 0.75 ms y de 0.5 ms para el pulso secundario, así como un dwell time de 1 ms. (a) Evolución temporal del pulso eléctrico; (b) Evolución temporal del caudal másico. . . . .	23
2.9. Principio de medida del flujo de cantidad de movimiento. . . . .	24
2.10. Fotografía del diésel atomizado en condiciones no evaporativas con 90 MPa de presión de inyección, 6 MPa de contra-presión y 2 ms después del fin de la inyección. . . . .	27
2.11. Regímenes de atomización. . . . .	28
2.12. Parámetros macroscópicos del chorro diésel. . . . .	30
2.13. Representación gráfica de las estrategias de inyección múltiple: (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección. . . . .	34
4.1. Esquema de la instalación empleada en la medición de la tasa de combustible inyectado con un inyector diésel solenoide. . . . .	43
4.2. Esquema de la instalación empleada en la medición de la tasa de combustible inyectado con un inyector diésel piezoeléctrico. . . . .	43
4.3. Diesel empleado en el estudio. . . . .	45
4.4. Inyectores diésel empleados. . . . .	46
4.5. Tasímetro IAV tipo N 050-050. . . . .	47

4.6. Evoluciones temporales de flujo másico de combustible para tiempos de energización en el rango de 0.5 a 2.7 ms, cuando se empleó una inyección simple en un inyector solenoide, con una  $p_{back} = 5$  MPa, y niveles de  $p_{rail} = 80$  MPa, (b)  $p_{rail} = 100$  MPa y (c)  $p_{rail} = 120$  MPa. 50

4.7. Evoluciones temporales de flujo másico de combustible para tiempos de energización en el rango de 0.5 a 2.7 ms, cuando se empleó una inyección simple en un inyector piezoeléctrico, con una  $p_{back} = 5$  MPa, y niveles de  $p_{rail} = 80$  MPa, (b)  $p_{rail} = 100$  MPa y (c)  $p_{rail} = 120$  MPa. 51

4.8. Evolución de la masa de combustible inyectada respecto al tiempo de energización, para los niveles de  $p_{rail}$  y nivel de  $p_{back}$  probados en un inyector diésel solenoide. . . . . 52

4.9. Evolución de la masa de combustible inyectada en función del tiempo de energización, para los niveles de  $p_{rail}$  y nivel de  $p_{back}$  probados en un inyector diésel piezoeléctrico. . . . . 53

4.10. Evoluciones temporales de flujo másico y del pulso eléctrico usando el inyector diésel solenoide, un DT de 2 ms, una  $p_{rail} = 120$  MPa, una  $p_{back} = 5$  MPa, y las inyecciones múltiples (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección. . . . . 54

4.11. Evoluciones temporales de flujo másico y del pulso eléctrico usando el inyector diésel piezoeléctrico, un DT de 2 ms, una  $p_{rail} = 120$  MPa, una  $p_{back} = 5$  MPa, y las inyecciones múltiples (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección. . . . . 55

4.12. Esquema de la metodología para determinar el inicio y fin de la inyección 57

4.13. Esquema del retraso hidráulico, evoluciones temporales del flujo másico y del pulso eléctrico, en una estrategia de inyección dividida. . . . 58

4.14. Esquema de la metodología para determinar la tasa de combustible promedio en una inyección simple con presión de inyección de 120 MPa, $p_{back}$ de 5 MPa y TE de 2.7 ms. . . . .	59
5.1. Coeficiente de descarga respecto a la $p_{rail}$ de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa y $p_{back} = 5$ MPa de un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico.	62
5.2. Comportamiento del retraso hidráulico de apertura y cierre de la primera inyección de un inyector diésel solenoide versus el DT para una $p_{rail}$ de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa y $p_{back} = 5$ MPa, y para las estrategias de inyección (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección. .	64
5.3. Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de $p_{rail}$ de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una $p_{back} = 5$ MPa, y para la estrategia de inyección piloto en la (a) apertura y (b) cierre de la aguja de un inyector diésel solenoide. . . . .	65
5.4. Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para para los niveles de $p_{rail}$ de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una $p_{back}$ de 5 MPa para la estrategia de inyección dividida en la (a) apertura y (b) cierre de un inyector diésel solenoide. . . . .	66
5.5. Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para una presión de inyección de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con $p_{back} = 5$ MPa para la estrategia de post inyección en la (a) apertura y (b) cierre de un inyector diésel solenoide. . . . .	66
5.6. Retraso hidráulico de apertura y cierre de un inyector diésel piezoeléctrico correspondiente al primer evento de inyección versus la presión de inyección, empleando una $p_{back}$ de 5 MPa para las estrategias de inyección (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección. . . . .	69

5.7. Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa, y para la estrategia de inyección piloto en la (a) apertura y (b) cierre de la aguja de un inyector diésel piezoeléctrico. . . . . 70

5.8. Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa para la estrategia de inyección dividida en la (a) apertura y (b) cierre de un inyector diésel piezoeléctrico. . . . . 71

5.9. Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa para la estrategia de post-inyección en la (a) apertura y (b) cierre de la aguja de un inyector diésel piezoeléctrico. . . . . 73

5.10. Masa de combustible inyectada durante el primer evento de inyección en un inyector diésel solenoide respecto a la presión de inyección, con una  $p_{back}$  de 5 MPa, y para las estrategias de inyección (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección. . . . . 75

5.11. (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección piloto en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple. . . . . 76

5.12. (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección dividida en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple. . . . . 77

5.13. (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de post-inyección en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple. . . . .	78
5.14. Masa de combustible inyectada durante el primer evento de inyección de un inyector diésel piezoeléctrico respecto a la presión de inyección, con una $p_{back}$ de 5 MPa, y para las estrategias de inyección (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección. . . . .	79
5.15. (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección piloto en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple. . . . .	81
5.16. (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección dividida en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple. . . . .	82
5.17. (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de post-inyección en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple. . . . .	83
5.18. Análisis cualitativo sobre el comportamiento hidráulico de un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico. . . . .	84
A.1. Creación de pestañas adicionales. . . . .	92

---

A.2. Copiado de información de archivo .txt. . . . .	93
A.3. Copiado de información de archivo excel bascula. . . . .	94
A.4. Apertura del archivo de referencia . . . . .	95
A.5. Copiado de las masas. . . . .	95
A.6. Copiando de pestaña de análisis y actualización de vínculos. . . . .	96
A.7. Datos que se modifican manualmente . . . . .	97
A.8. Asignación de la columna Tiempo. . . . .	98
A.9. Asignación de la columna Tiempo. . . . .	98
A.10.Columna corriente. . . . .	99
A.11.Columna Voltaje. . . . .	100
A.12.Columna Masa. . . . .	101
A.13.Columna bascula. . . . .	101
A.14.Columna TXT. . . . .	102
A.15.Gráficas de la bascula, Tasa y del software IAV. . . . .	103
A.16.Secciones de la gráfica de Tasa. . . . .	104
A.17.Porcentajes de tasa de flujo másico máxima. . . . .	105
A.18.Inicio del pulso eléctrico. . . . .	108
A.19.Fin del pulso eléctrico. . . . .	109
A.20.Medición de la masa de combustible inyectada del primer evento de inyección. . . . .	109
A.21.Medida del retraso hidráulico de apertura y cierre. . . . .	110



---

A.22. Masa registrada por la bascula y por el analizador de inyecciones. . .	111
A.23. Intervalo de confianza por experimento. . . . .	112
A.24. Tasa de flujo másico promedio. . . . .	113
B.1. Tabla de información del software IAV. . . . .	115
B.2. Ubicación del throttle en el tasímetro. . . . .	116
B.3. Visualización de la reflexiones en modo osciloscopio. . . . .	116
B.4. Inyección y sus reflexiones calibradas en modo osciloscopio. . . . .	117
B.5. Señal del tasímetro una vez calibrado. . . . .	118

# ÍNDICE DE TABLAS

---

1.1. Energía consumida en la República Mexicana (Petajoules). . . . .	2
1.2. Principales diferencias entre inyectores diésel solenoide y piezoeléctrico. . . . .	8
4.1. Nomenclatura del diagrama de la instalación experimental . . . . .	44
4.2. Propiedades físicas del combustible diésel empleado. . . . .	45
4.3. Detalles geométricos de los inyectores diésel estudiados. . . . .	46
4.4. Matriz de experimentos de inyecciones simples de los inyectores empleados. . . . .	49
4.5. Matriz de experimentos para el inyector diésel solenoide. . . . .	53
4.6. Matriz de experimentos para el inyector diésel piezoeléctrico. . . . .	54
5.1. Valores de tasa de combustible promedio, y teórico para los niveles de $p_{rail}$ de 80, 100, y 120 MPa en un inyector diésel tipo solenoide y piezoeléctrico. . . . .	61

## CAPÍTULO 1

# INTRODUCCIÓN

---

*En este capítulo se muestran las razones que motivaron el presente estudio, así como los estudios previos relacionados al área de estudio de esta investigación, con el fin de justificar la necesidad de ampliar el campo de conocimiento.*

## 1.1 MOTIVACIÓN

En nuestros días, la tecnología avanza rápidamente con una tendencia a mejorar nuestra calidad de vida e impactar lo menos posible de forma negativa al medio ambiente. Una consecuencia directa del avance tecnológico es la reducción en el consumo de energía ya que se tienen dispositivos y maquinas más eficientes. Lo anterior se puede evidenciar en la Tabla 1.1, donde se puede observar que en México en el 2019 el consumo energético total muestra una variación porcentual de -9.89% respecto al 2018, aun así el transporte fue el sector que consumió más energía (2,027.05 petajoules) representando el 41.78% del total, seguido por la industrial (1,680.77 petajoules) que representó el 32.76% del total [1].

	2018	2019	Variación porcentual (%) 2019/2018	Estructura porcentual (%) 2019
<b>Consumo final total</b>	<b>5,393.45</b>	<b>4,851.57</b>	<b>-10.05</b>	<b>100</b>
<b>Consumo</b>				
<b>no energético total</b>	<b>109.74</b>	<b>90.59</b>	<b>-17.45</b>	<b>1.87</b>
Petroquímica de Pemex	56.53	47.93	-15.20	0.99
Otras ramas	53.22	42.66	-19.84	0.88
<b>Consumo</b>				
<b>energético total</b>	<b>5,283.70</b>	<b>4,760.98</b>	<b>-9.89</b>	<b>98.13</b>
Transporte	2,454.70	2,027.05	-17.42	41.78
Industrial	1,680.77	1,589.45	-5.43	32.76
Residencial, comercial y público	958.97	952.59	-0.67	19.63
Agropecuario	189.27	191.89	1.39	3.96

Tabla 1.1: Energía consumida en la República Mexicana (Petajoules).

Por otro lado, en la Figura 1.1, se observa que en el sector del transporte, en conjunto las gasolinas y diésel conforman el 89.5% del consumo energético [1]. Lo anterior es de gran importancia ya que todos necesitamos trasladarnos diariamente de un punto a otro y para hacerlo de forma rápida usamos un medio de transporte, por lo general un vehículo motorizado que consume algún tipo de los combustibles mencionados.

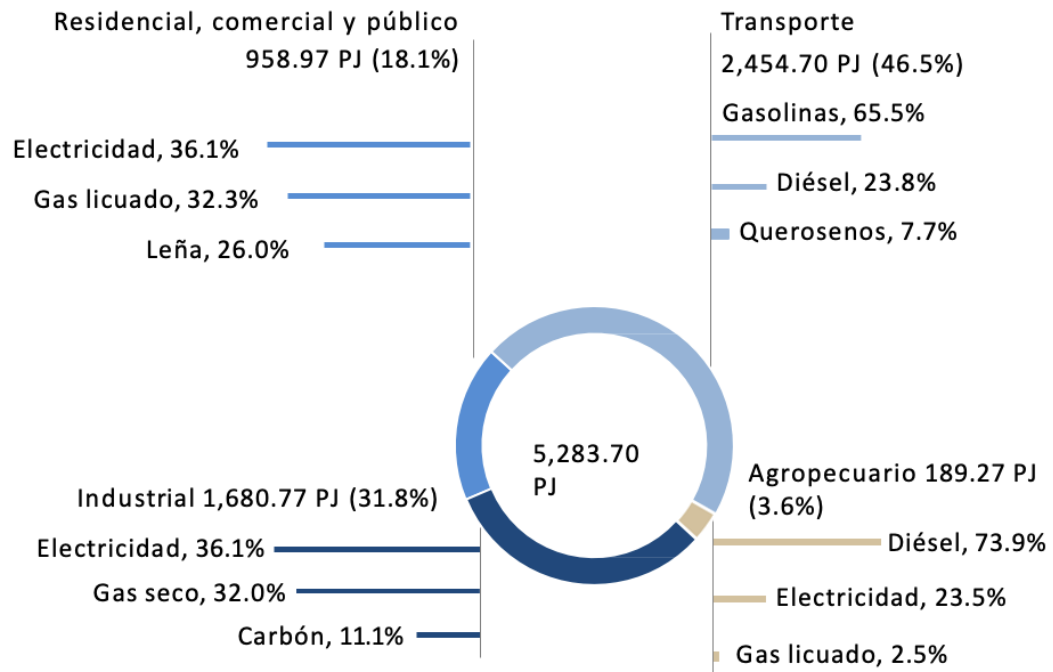


Figura 1.1: Consumo final energético por sector y energético en 2018 en México (Petajoules).

Los vehículos comerciales y pesados operan tanto con motores Diésel como de gasolina. Pero, es sabido que los motores Diesel presentan grandes ventajas respecto a los motores a gasolina ya que son más potentes, tienen un mejor rendimiento de combustible, fallan menos, duran más y son más fiables [2]. Por otro lado, también es bien sabido que estos tipos de vehículos expulsan gases contaminantes y material particulado que contribuyen al deterioro del medio ambiente y nuestra salud [3].

Todo vehículo motorizado al salir al mercado debe de cumplir ciertas normas establecidas por los gobiernos para poder circular afectando lo menos posible al medio ambiente, en México una de las normas ambientales que regulan las emisiones de gases contaminantes de los vehículos es la NOM-044-SEMARNAT-2017 [4], ”que fija los valores máximos permitidos de emisiones de monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), hidrocarburos no metano (HC), hidrocarburos no metano más óxidos de nitrógeno (HC+NOx), partículas (hollín) y amoníaco ( $NH_3$ ), expulsados del escape de los motores nuevos que emplean diésel como combustible y que se emplearán en vehículos automotores cuyo peso bruto sea mayor a 3,857 kg, así como del escape de vehículos automotores nuevos con peso bruto vehicular mayor a 3,857 kilogramos equipados con este tipo de motores”. En consecuencia, los fabricantes de automóviles y autopartes cumplen y superan estas normas aplicando normativas medioambientales europeas para poder exportar sus automóviles sin ningún inconveniente, incentivando la adopción de estas normativas en los países donde operan, como se muestra en la Figura 1.2 [5].

Region	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Unión Europea	Euro V				Euro VI											
Estados Unidos	U.S. 2010															
México	Euro IV / U.S. 2004									Euro V / U.S. 2007		Euro VI / U.S. 2010				

a)

Region	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	
Unión Europea	Euro 5a / b				Euro 6											
Estados Unidos	Tier 2							Tier 3								
México	Euro 3 / Tier 1+									Euro 4 / Tier 1+						

b)

Figura 1.2: Normas de emisiones de Europa, México y EUA de a) vehículos pesados y b) vehículos livianos.

En la Figura 1.3 [6] se muestran las normas EURO para vehículos livianos, donde se muestran los límites de emisiones permitidos de CO, HC, HC+NOx, NOx y partículas sólidas (PM). Por otro lado, en esta figura se observa que con el paso del tiempo las normas se vuelven más estrictas.

Límite de emisiones para turismos con motores gasolina ( $\text{g km}^{-1}$ )						
Tipo	Año	CO	HC+NOx	HC	NOx	Partículas
Euro I	1992	2.72	0.97	-	-	-
Euro II	1996	2.2	0.5	-	-	-
Euro III	2000	2.3	-	0.2	0.15	-
Euro IV	2005	1	-	0.1	0.08	-
Euro V	2009	1	-	0.1	0.06	0.005
Euro VI	2014	1	-	0.1	0.06	0.005

Límite de emisiones para turismos con motores diésel ( $\text{g km}^{-1}$ )						
Tipo	Año	CO	HC+NOx	HC	NOx	Partículas
Euro I	1992	2.72	0.97	-	-	0.14
Euro II	1996	1	0.7	-	-	0.08
Euro III	2000	0.64	0.56	-	0.5	0.05
Euro IV	2005	0.5	0.30	-	0.25	0.025
Euro V	2009	0.5	0.23	-	0.18	0.005
Euro VI	2014	0.5	0.17	-	0.08	0.005

Figura 1.3: Límites de emisiones de las normativas Euro para vehículos livianos.

Existen dos soluciones comúnmente empleadas con el fin de disminuir las emisiones contaminantes por NOx y partículas sólidas en motores diésel, tales como:

- *Soluciones activas:* Se emplean con el fin de disminuir las emisiones contaminantes que se forman dentro de la cámara de combustión y se basan tanto en cambios en el diseño del motor, como en sus componentes. En lo que respecta al sistema de inyección se pueden mencionar las siguientes:
  - Sistemas de gestión de aire como la Turbo-alimentación que reducen las partículas sólidas y los NOx [7].
  - “Sistemas de recirculación de gases de escape (EGR)” que mejoran la mezcla aire-combustible [8, 9].
  - Implementar inyectores diésel solenoide o piezoeléctrico.
  - Aplicar altas presiones de inyección.
  - Reducir el diámetro geométrico de las toberas e incrementar el número de orificios.
  - Emplear inyecciones múltiples para controlar la mezcla entre el aire y

combustible, y en consecuencia su combustión, al incrementar la cantidad de inyecciones y su duración durante el ciclo del motor.

- *Soluciones pasivas*: Se emplean sobre los gases contaminantes resultantes de la combustión a la salida del motor. Por ejemplo, [10] “el filtro de partículas para motores diésel (DPF) y el SCR (Selective Catalytic Reduction) para la eliminación de los NOx”.

## 1.2 ANTECEDENTES

En 1892 en Berlín, en una Oficina de Patentes se leía una patente presentada por el ingeniero Rudolf Diesel el funcionamiento y diferencia entre un motor a gasolina y uno diésel [11]: “... el émbolo comprime aire puro en un cilindro, de modo que la temperatura resultante de la compresión es mucho mayor que la temperatura de inflamación del combustible que se ha de emplear. Después de la compresión y a partir del punto muerto, se efectúa la introducción gradual del combustible. . .” etc. Lo anterior se puede ver en la Figura 1.4.

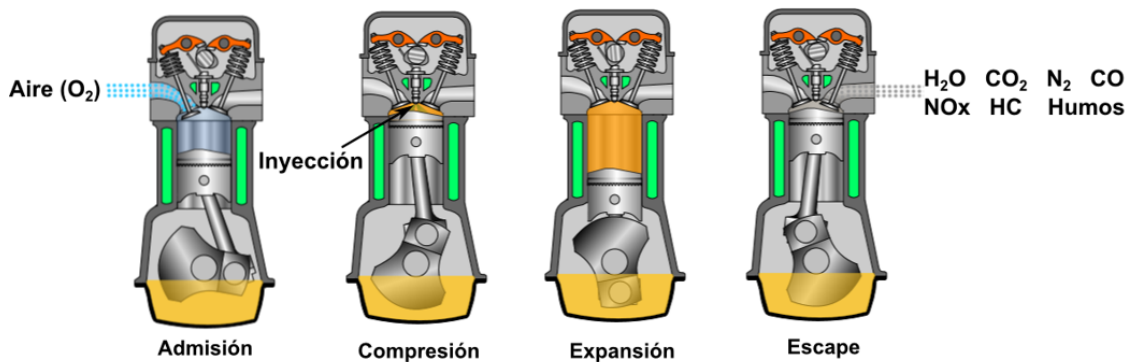


Figura 1.4: Descripción del ciclo de operación de un motor Diésel.



En la Figura 1.5, se puede observar el conjunto de elementos que suministra combustible al motor diésel de forma controlada a presiones altas a través del common-rail (sistema de almacenamiento de combustible presurizado), los cuales son conocidos como *sistema de inyección*. En cuanto a la presión de inyección Wang et. al. [12] han encontrado que conforme aumenta éste parámetro, la tasa de combustible inyectado se incrementa ya que el inyector abre más rápido.

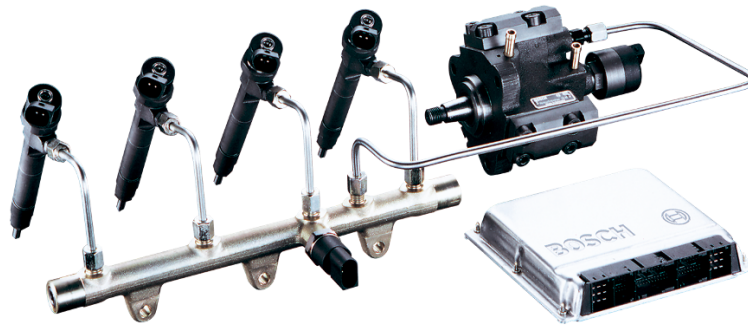


Figura 1.5: Sistema de inyección diésel Bosch.

Desde que fue presentado e implementado el motor diésel se han realizado estudios y en consecuencia mejoras con el fin de hacerlo más eficiente a la par de cumplir con las normativas de emisiones vigentes. Entre estas mejoras podemos destacar aquellas que van dirigidas al proceso de inyección, tal es el caso del tipo de inyector diésel empleado, tipo solenoide o piezoeléctrico, cuyas principales diferencias se aprecian en la Tabla 1.2. El funcionamiento del inyector diésel solenoide se distingue ya que dentro de éste contiene un solenoide que se activa al aplicarle un pulso eléctrico y en consecuencia ejerce una fuerza de atracción electromagnética sobre un vástago, permitiendo la inyección de combustible. Mientras que el funcionamiento del inyector diésel piezoeléctrico se basa en aplicar un pulso eléctrico para alargar un actuador piezoeléctrico y mediante fuerzas hidráulicas mover un vástago creando una diferencia de presiones para permitir la inyección de combustible. Aún y cuando estas diferencias son evidentes, d'Ambrosio et. al. [13] concluyen que las principales diferencias entre ambas familias de inyectores se deben al diseño de sus circuitos internos.

Características	Inyector solenoide	Inyector piezoeléctrico
Presión de inyección	25 MPa ... 160 MPa	25 MPa ... 180 MPa
Presión de retorno	0.07 MPa ... 0.1 MPa	0.8 MPa ... 1 MPa
Tasa de flujo de combustible de retorno en vacío	12.55 mg/s (80 MPa)	0 mg/s
Masa en movimiento	15.5 g	4.3 g
Velocidad de la aguja	0.5 m/s	1 m/s
Levantamiento de la aguja	0.2 mm ... 0.45 mm	0.9 mm

Tabla 1.2: Principales diferencias entre inyectores diésel solenoide y piezoeléctrico.

Otro tipo de soluciones empleadas con frecuencia son las estrategias de inyección múltiple, en las que se ha demostrado su efectividad al “reducir la tasa de liberación de calor (HRR) y los NO<sub>x</sub>” [12], respecto a una inyección simple (un solo evento de inyección) al separar la inyección en dos o mas eventos. Las estrategias de inyección múltiple comúnmente empleadas, se pueden observar en la Figura 1.6, por ejemplo, la inyección piloto que se observa en la Figura 1.6(a), en la que se inyecta primero una masa pequeña de combustible y en un segundo evento se inyecta la masa principal. Mientras tanto, en la Figura 1.6(b) se muestra la post-inyección, en la que la masa principal de combustible se inyecta primero y una masa pequeña en un segundo evento. Por último, en la Figura 1.6(c) se muestra la inyección dividida, en la que se inyecta la misma masa de combustible en ambos eventos.

Una forma de llevar a cabo los estudios antes mencionados [14, 15, 16, 17] es con instrumentos de alta precisión, como lo es el indicador de curva de descarga de tasa de inyección (IRDCCI), el cual se basa en el método Bosch [18] y consiste en un tubo largo por el cual se suministra combustible a alta presión mediante un inyector diésel. Por otro lado, dentro del IRDCCI se suministra nitrógeno presurizado para simular la contrapresión presente en todos los motores de combustión interna.

Además todos estos instrumentos son operados por dispositivos de alta precisión correspondientes a la unidad de control electrónica (ECU) de un vehículo.

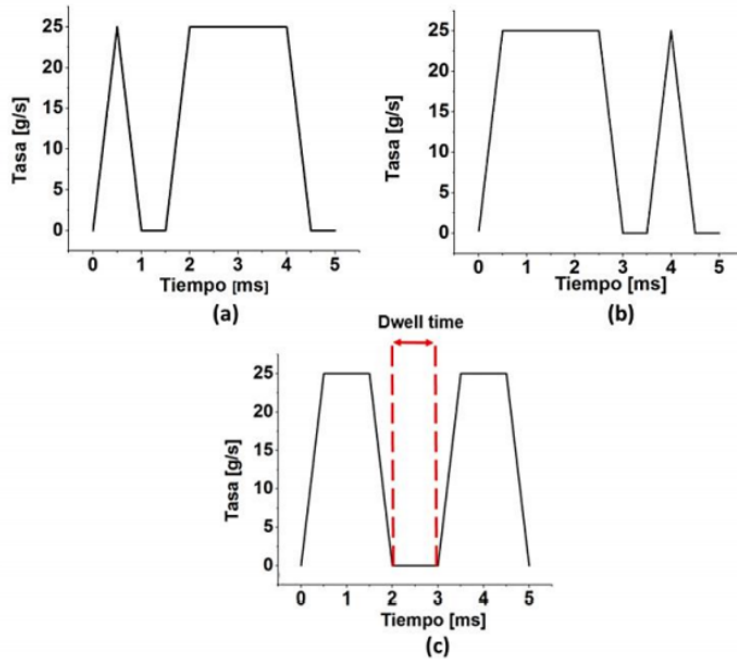


Figura 1.6: Esquemas típicos de la tasa de inyección obtenidos al emplear estrategias de dos eventos de inyección: (a) piloto; (b) de post-inyección y (c) dividida.

Por todo lo anterior, es de gran importancia continuar con los estudios del proceso de inyección utilizando inyectores diésel solenoide y piezoeléctricos, empleando estrategias de dos eventos de inyección (inyecciones múltiples), y variando la presión de inyección con instrumentos de alta precisión como el IRDCI.

## CAPÍTULO 2

# ESTADO ACTUAL DEL CONOCIMIENTO DEL PROCESO DE INYECCIÓN

---

En el presente capítulo se describe el proceso de inyección diésel, los fenómenos físicos que ocurren dentro del inyector y los efectos resultantes al aplicar las estrategias de inyección múltiple. A partir de esta revisión bibliográfica se establece la metodología de análisis de tasa de combustible para cada inyector.

## 2.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL

La mezcla de aire y combustible así como la combustión en los motores diésel, también conocidos como *motores de encendido por compresión* (MEC), están relacionadas al grado de producirse en parte simultáneamente, por lo que no es fácil encontrar una frontera entre ambos procesos. En general, “en los MEC la mezcla se realiza en el interior del cilindro al ser inyectada cierta cantidad de combustible en el *punto muerto superior* (PMS) después de la compresión” [19].

El combustible puede ser inyectado en un MEC de dos formas:

- *La inyección indirecta* (IDI): se basa en inyectar combustible en una precámara unida a la cámara de combustión para generar turbulencia, misma que favorece la mezcla aire-combustible, y en consecuencia el efecto de la presión de inyección es despreciable, siendo innecesarios los sofisticados sistemas de inyección.
- *La inyección directa* (DI): se basa en la inyección de combustible atomizado a elevadas presiones directamente en la cámara de combustión asegurando la mezcla. Una característica de la DI es la menor relación superficie/volumen que provoca pérdidas mínimas de calor, y en consecuencia un mayor rendimiento respecto a la IDI.

## 2.2 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL: DEFINICIÓN Y FUNCIÓN

La principal tarea del sistema de inyección es proporcionar combustible al motor, por lo tanto cumple las siguientes funciones:

- Inyectar el combustible dentro de la cámara de combustión según la ley de tasa de inyección, que en sincronía con el movimiento del pistón define el comportamiento de las fases de la combustión.
- Atomizar el combustible con el fin de incrementar el área de contacto con el aire caliente, y hacer que la evaporación se lleve a cabo de forma más rápida.
- Llevar a cabo la mezcla de aire y combustible dentro de la cámara de combustión.

## 2.3 SISTEMAS DE INYECCIÓN DIRECTA

### 2.3.1 SISTEMA DE INYECCIÓN DIÉSEL COMMON-RAIL

En la Figura 2.1 se describe el sistema de inyección diésel common-rail, el cual es el más común en el mercado por su flexibilidad y versatilidad. En esta figura se observa que el combustible es llevado desde el depósito de combustible hasta la bomba de alta presión. La cual suministra el combustible presurizado al common-rail, y éste a los inyectores que están unidos a los cilindros del motor. El sistema common-rail [19], también “actúa como amortiguador de las ondas de presión generadas tanto por la bomba de alta presión, como por las perturbaciones que se generan por el combustible que sale rápidamente por los orificios de la tobera de los inyectores”.

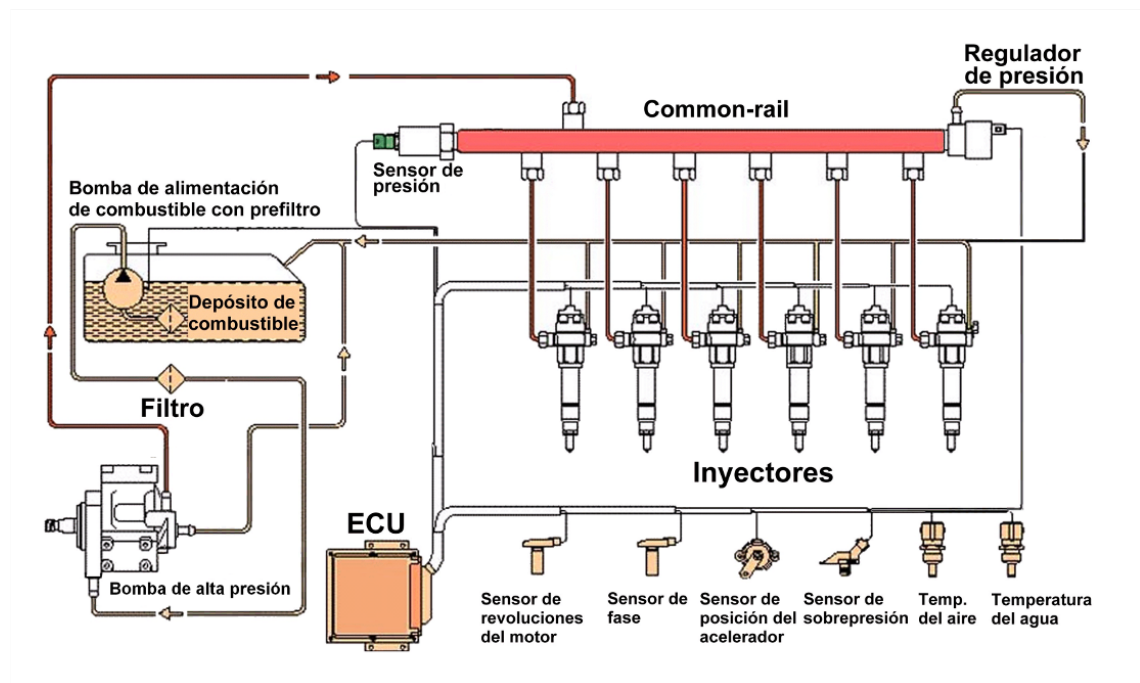


Figura 2.1: Descripción del sistema de inyección Common-Rail

La presión de inyección se controla por la apertura y cierre del regulador de presión, que compara el valor registrado por un sensor en el common-rail y el valor consigna registrado en la *unidad de control electrónico* (ECU). Por otro lado, la ECU también controla los inyectores y la masa de combustible que se inyecta al motor, la cual depende de la presión y la permeabilidad de los orificios de la tobera y la duración de la inyección.

El inyector es el elemento más importante del sistema common-rail y actualmente existen dos tipos, el inyector diésel solenoide y el piezoeléctrico, mostrados en la Figura 2.2 y en la Figura 2.4, respectivamente. El inyector piezoeléctrico es considerado de última generación debido a que responde de forma más rápida, reduciendo significativamente el *retraso hidráulico* entre el pulso eléctrico y el inicio de la inyección provocado por los fenómenos fluidodinámicos, además de ser más flexible y estable al emplear estrategias de inyecciones múltiples, sin embargo hay que destacar que con los inyectores diésel solenoide se controla con mayor precisión la inyección [20]. El principio de funcionamiento de un inyector diésel piezoeléctrico radica en que emplea un accionamiento piezoeléctrico de pilas de cristales de cuarzo intercalados entre placas metálicas, de tal forma que al aplicar una diferencia de voltaje se provoca un elongamiento del material piezoeléctrico que a su vez activa la válvula que provoca el desahogo del volumen de control. Por otro lado, Hu et. al. [21], en su estudio “de sensibilidad de la respuesta dinámica de un inyector de combustible electrónico respecto a las propiedades del combustible y las condiciones de funcionamiento”, observaron que el retraso hidráulico tanto de apertura como de cierre disminuye con el aumento del modulo de volumen y aumentan al incrementar la densidad del combustible.

El inyector solenoide está formado por una válvula electromagnética, el portainyector y la tobera diésel, como se observa en la Figura 2.2. La válvula electromagnética que se describe en la Figura 2.3 es una servoválvula con dos orificios, correspondientes a la entrada (Z) y a la salida del volumen de control (A), que están abiertos o cerrados, según el proceso que se este realizando.



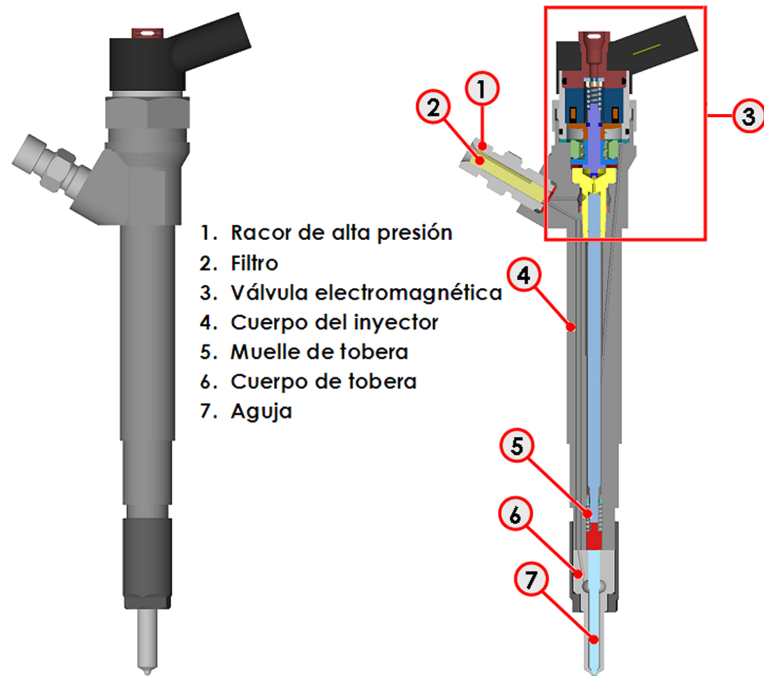


Figura 2.2: Descripción del inyector diésel solenoide.

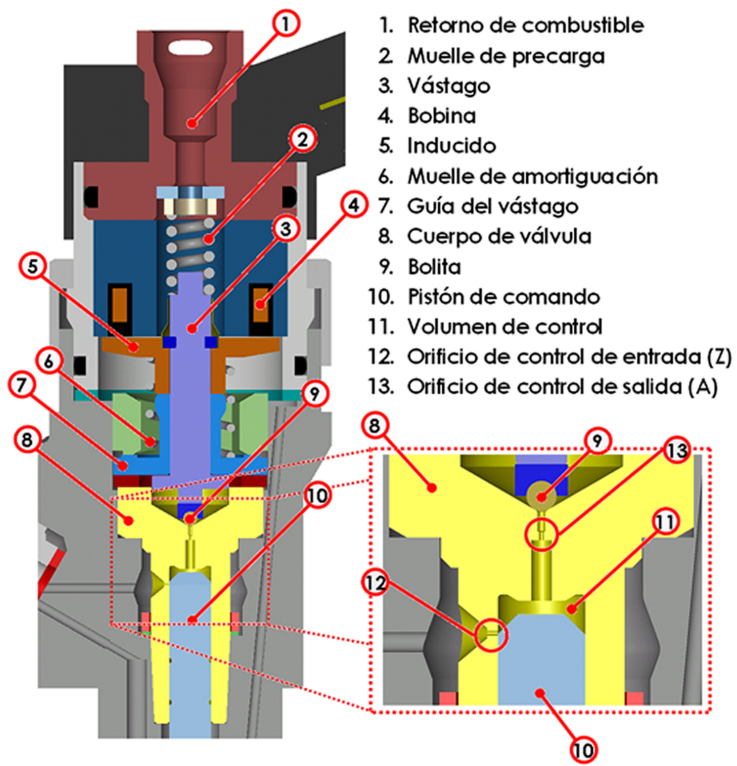


Figura 2.3: Válvula de accionamiento electromagnética de un inyector solenoide.

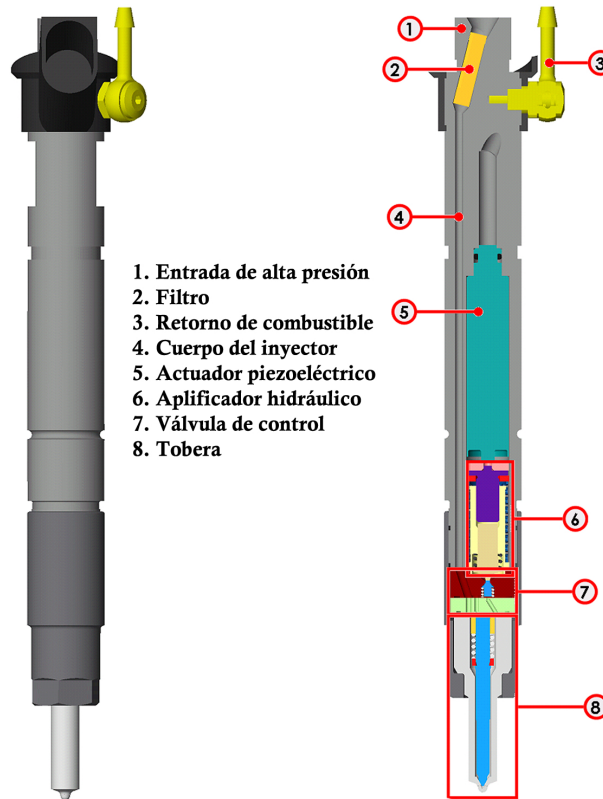


Figura 2.4: Descripción del inyector diésel piezoeléctrico.

El combustible es suministrado a alta presión al inyector desde el common-rail y dentro del inyector el combustible toma dos caminos. Uno conduce el combustible a la tobera del inyector y el otro a la región del volumen de control a través de la entrada Z, que se encuentra aguas arriba del pistón de comando. En la Figura 2.5(a) se observa que cuando el solenoide no está activado, el vástago está en reposo, con una esfera cerrando el orificio (A). En este estado, tanto la sección donde se encuentra el volumen de control, como aquella donde asienta la aguja de la tobera, se encuentran a la misma presión, la cual corresponde a la presión del common-rail, pero como el área de la sección superior es mayor que la inferior, la aguja mantiene bloqueados los orificios de la tobera en la zona donde asienta, lo que evita la inyección.

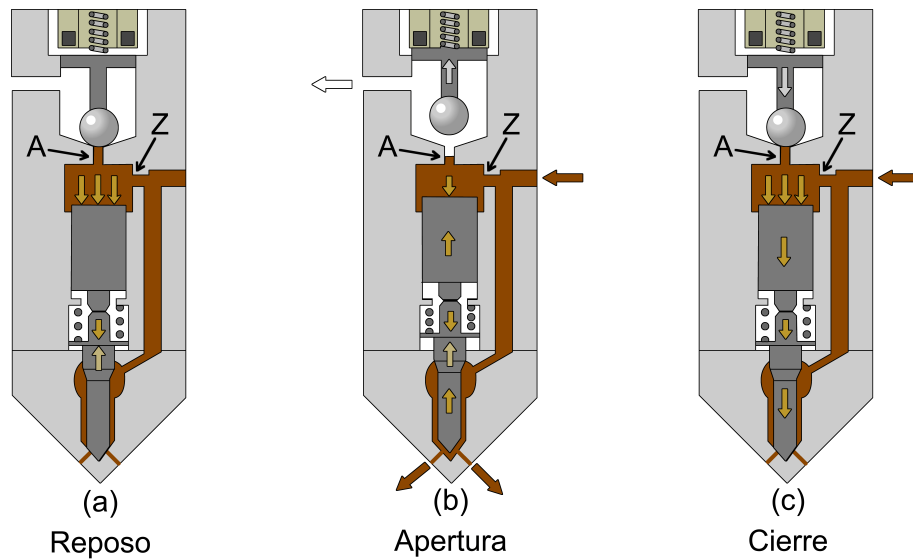


Figura 2.5: Principio de apertura y cierre de un inyector tipo solenoide.

Al momento de iniciar la inyección, la unidad de control electrónica manda mediante un pulso eléctrico la señal de activación, la duración de este pulso define el tiempo de inyección y en consecuencia el combustible inyectado. El pulso eléctrico genera un campo magnético por la excitación de la bobina solenoide, esta acción levanta el vástago, lo que libera la esfera y, por lo tanto, desbloquea el orificio (A), tal y como se observa en la Figura 2.5(b), con demoras del orden de 0.07 ms [22]. En esta posición, en el volumen de control se genera una pérdida de presión por el orificio de entrada (Z), porque ahora el combustible fluye en dirección del orificio (A), correspondiente a la dirección al retorno. Esto genera una diferencia de presión entre la sección del volumen de control y la parte baja de la aguja, la cual se encuentra a la presión de inyección. Lo anterior genera un movimiento ascendente del conjunto pistón-aguja, lo que abre los agujeros de la tobera y desencadena la inyección de combustible. Por otro lado, cuando finaliza el pulso eléctrico el vástago del solenoide desciende hasta su lugar de reposo así como la esfera, lo que vuelve a cerrar el orificio (A), bloqueando el flujo de retorno y llenando nuevamente el volumen de control mediante el orificio (Z). Unos microsegundos más tarde las presiones en ambas secciones vuelven a igualarse a la presión del common-rail, y como se había explicado, la diferencia entre las áreas de ambas secciones genera una fuerza que

hace que descienda el sistema aguja-pistón, lo que bloquea los orificios de la tobera y termina la inyección, como muestra la Figura 2.5(c).

“La cantidad de combustible inyectado esta condicionada a la cantidad de orificios de la tobera, al diámetro de los mismos, a la duración del pulso eléctrico y a la presión con que se inyecta el combustible” [17]. En consecuencia, si el tiempo de energización es pequeño, se inyectara una masa de combustible pequeña. Lo anterior se debe a que la aguja del inyector abre parcialmente para tiempos cortos y para tiempos largos abre hasta su tope mecánico.

## 2.4 FLUJO INTERNO EN LAS TOBERAS DIÉSEL

El comportamiento del combustible que fluye por los agujeros de descarga de la tobera condiciona la tasa de inyección y sus características a la salida del inyector. A su vez, la forma de los agujeros afecta las propiedades del flujo. Estas características influyen en gran medida en la atomización del chorro diésel, y la mezcla aire-combustible. Por lo tanto, los factores que afectan el flujo de combustible dentro de las toberas de los inyectores diésel son:

- Las orificios milimétricos de descarga del combustible y sus diámetros aun más pequeños.
- La alta velocidad del flujo en el interior de los orificios.
- El proceso de inyección transitorio (eventos en milisegundos).
- El flujo en fase líquida o en fase líquida y en gaseosa (por efecto de la cavitación) como se observa en la Figura 2.6.

En la Figura 2.6, se observa que en los orificios de descarga, las líneas de flujo sufren una desviación importante que da lugar al despegue de la capa límite, y en consecuencia se forma una zona de recirculación con un incremento significativo de la velocidad del fluido y a su vez un descenso por la presión estática, de tal forma que si esta desciende localmente hasta niveles de saturación se produce *cavitación*. Las presiones de inyección altas potencian la cavitación, así como las bajas presiones de descarga. Por otro lado, las toberas con orificios cilíndricos son más propensas a provocar cavitación y las toberas de orificios cónicos la disminuyen o inhiben.

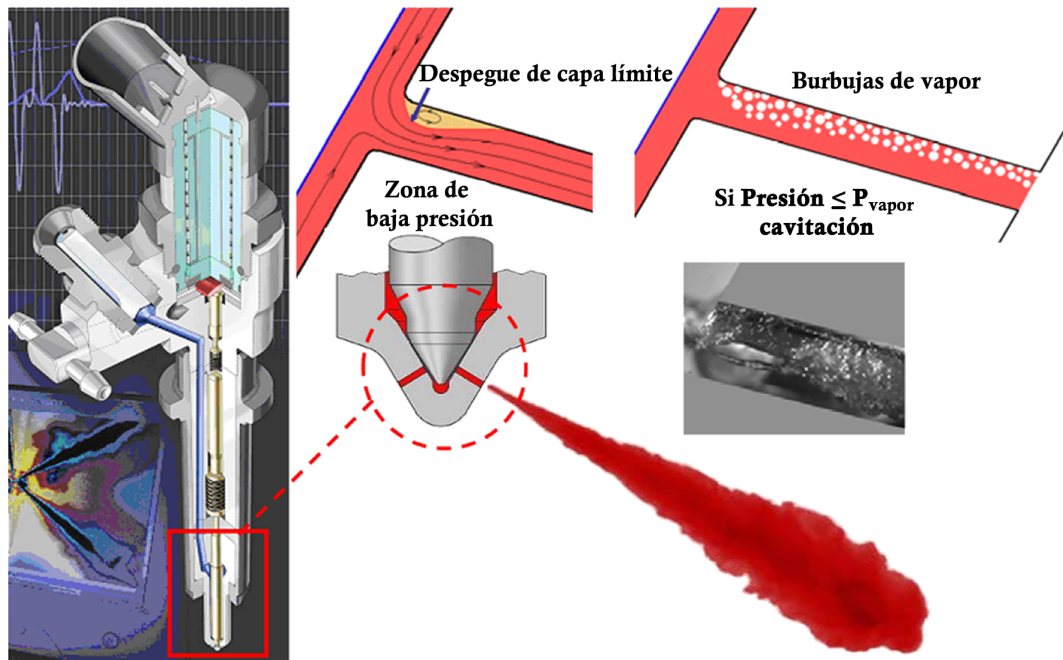


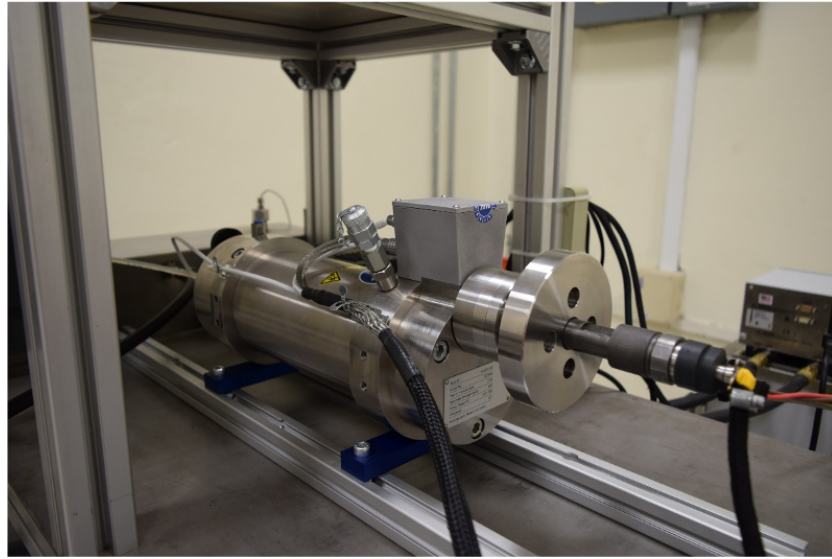
Figura 2.6: Esquema de la cavitación generada por flujo de combustible en los orificios de una tobera diésel.

Una consecuencia positiva derivada de la cavitación es que mejora el proceso de mezcla ya que se incrementa el ángulo del chorro [23]. Por otro lado, la cavitación también tiene efectos negativos ya que colapsa el flujo másico de combustible, disminuyendo la cantidad de combustible expulsado por la tobera así como el coeficiente de descarga [24].

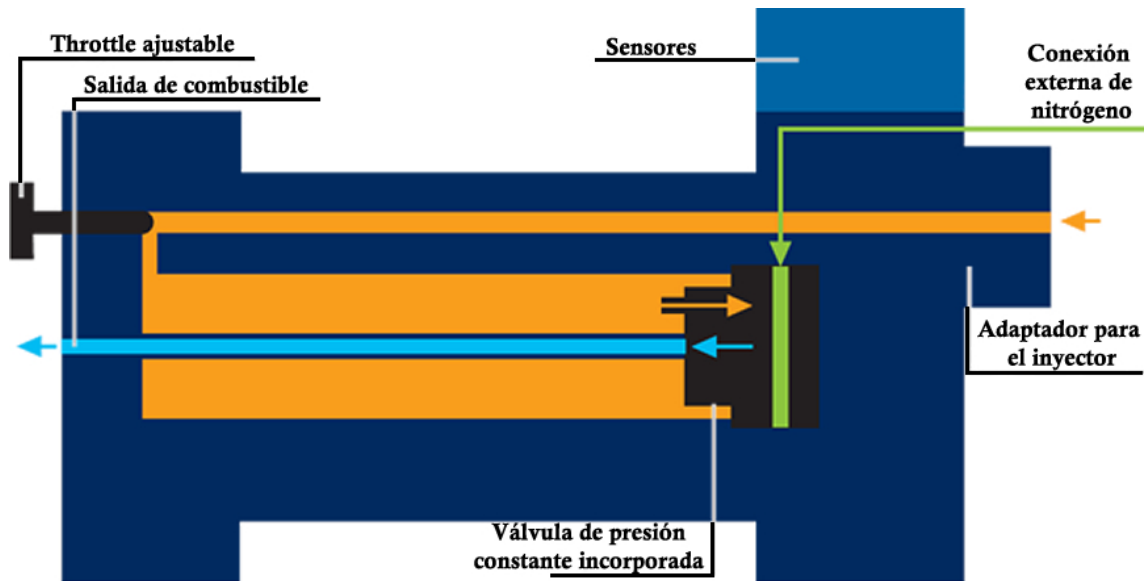
#### 2.4.1 PRINCIPIOS DE LA TASA DE INYECCIÓN DIÉSEL

- Tasa de inyección diésel

La *tasa de inyección* es un parámetro que se define como la suma del gasto másico instantáneo a la salida de todos los orificios de la tobera de un inyector diésel. Este parámetro se mide con un dispositivo llamado *tasímetro* como el que se muestra en la Figura 2.7, cuyo funcionamiento se basa en el sistema Bosch de tubo anecoico [18].



(a) Tasímetro IAV tipo N 050-050 empleado.



(b) Componentes principales del tasímetro.

Figura 2.7: Tasímetro: indicador de curva de descarga de tasa de inyección (IRDCI).

- Principio de funcionamiento

En el sistema Bosch, el inyector se fija en una cámara tubular cerrada llena de combustible. Con el fin de simular las condiciones de contrapresión que hay en un motor Diésel, el combustible en el interior del tasímetro se mantiene a la *contrapresión* ( $p_{back}$ ) deseada mediante una válvula de regulación.

Cuando da comienzo la inyección, se genera una onda de presión por la entrada de combustible en el sistema, y es registrada por un sensor piezoeléctrico ubicado cerca de la tobera del inyector. La onda de presión viaja por toda la longitud del tubo de sección transversal constante hasta el extremo final del tubo, donde la onda es atenuada y a su vez reflejada a causa de la geometría del sistema y de las condiciones de inyección. Los efectos de las ondas reflejadas sobre la medida son limitados por una válvula de control.

Una vez que se registra la señal de presión a la salida de los orificios de la tobera, se trata con el fin de relacionarla con el flujo másico de combustible inyectado, y para lograrlo se estudia la propagación de la onda dentro de el tubo de sección transversal constante,  $A_t$ , que viaja a la velocidad del sonido,  $a$ , provocando un cambio en la velocidad del fluido dentro del tubo,  $\Delta u$ .

Si se considera una porción de tubo con suficiente longitud y sección  $A_t$  como un volumen de control, y se desprecian los efectos de la gravedad, resulta que solo la presión actúa sobre el volumen de control. Al aplicar la ecuación de conservación de la cantidad de movimiento resulta la siguiente expresión:

$$(p_0 + \Delta p)A_t - p_0A_t = \rho A_t a \Delta u \quad (2.1)$$

donde al simplificar se obtiene la ecuación de Allievi [25]:

$$\Delta p = \rho a \Delta u \quad (2.2)$$

Por otro lado, el caudal másico (tasa de combustible),  $\dot{m}$ , al relacionarlo con la onda de presión es posible representarlo como:

$$\dot{m} = \rho A_t \Delta u \quad (2.3)$$

Al combinar la ecuación 2.2 con la ecuación 2.3 se obtiene la ecuación del gasto másico instantáneo respecto a la diferencia entre la presión instantánea y la de reposo:

$$\dot{m} = \frac{A_t}{a} \Delta p \quad (2.4)$$



Con esta ecuación, se obtiene la *tasa de inyección* si se conoce la sección transversal del tubo del tasímetro, la velocidad del sonido en el combustible a la presión y temperatura empleadas.

En la Figura 2.8, se observa la medición de un ensayo de tasa de inyección. En la parte superior se observa la evolución temporal del pulso eléctrico. En la parte central de la figura se muestra la evolución temporal de la tasa de inyección compuesta de dos eventos consecutivos de inyección. Una inyección principal seguida de una pequeña cantidad de combustible, denominada post-inyección.

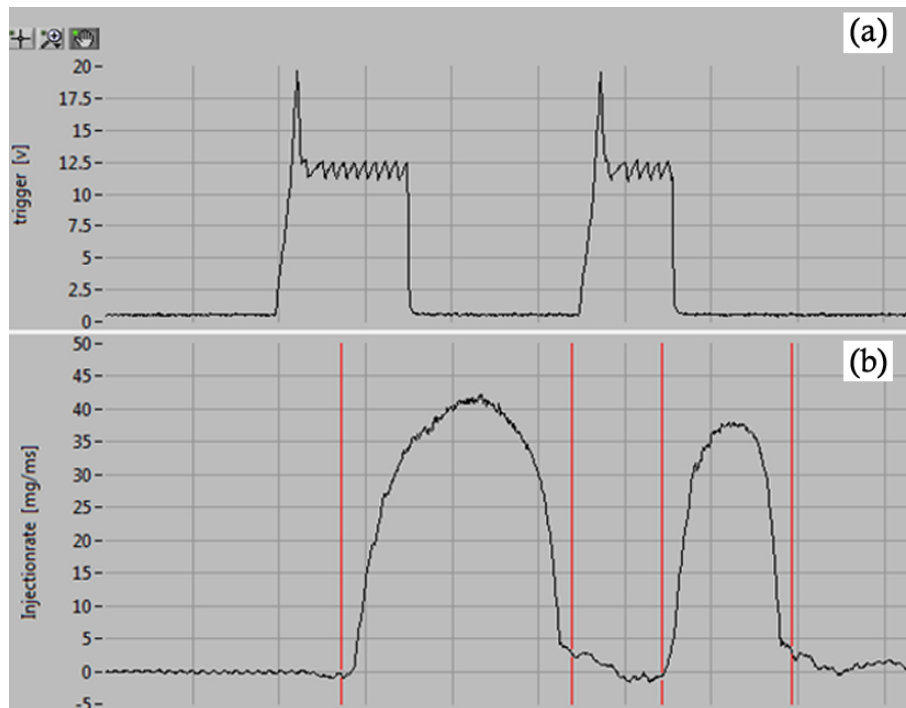


Figura 2.8: Señales registradas en un osciloscopio durante la medición del caudal másico al emplear una presión de inyección de 100 MPa, una contra-presión de 5 MPa, y una estrategia de post-inyección, con un tiempo de energización del pulso principal de 0.75 ms y de 0.5 ms para el pulso secundario, así como un dwell time de 1 ms. (a) Evolución temporal del pulso eléctrico; (b) Evolución temporal del caudal másico.

### 2.4.2 DESCRIPCIÓN DEL FLUJO DE CANTIDAD DE MOVIMIENTO

El *flujo de cantidad de movimiento* es un parámetro que influye en gran medida en la evolución del chorro diésel, y se caracteriza midiendo la fuerza con que impacta el chorro de combustible contra una pequeña placa con un sensor piezoeléctrico que mide la fuerza de impacto y esta colocada frente al orificio de estudio.

En la Figura 2.9 se describe la forma en como opera el sensor, “asumiendo que la presión es uniforme y que, tras el impacto, el chorro se desvía perpendicularmente al eje de inyección, y que el flujo de cantidad de movimiento al salir de los orificios de la tobera es igual a la magnitud de la fuerza con que impacta en una sección alejada de la salida del orificio”, [19]. Al final de la inyección se puede generar un ligero rebote producto del golpe del chorro con el sensor [14].

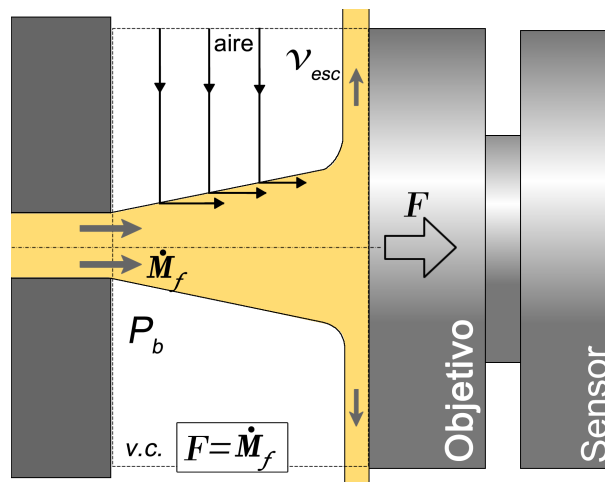


Figura 2.9: Principio de medida del flujo de cantidad de movimiento.

La cantidad de movimiento se mide de forma individual para cada orificio, de manera que, permite obtener la dispersión de funcionamiento entre los orificios, que puede ser debida al proceso de fabricación o al ensuciamiento u obstrucción de los orificios debido al tiempo de uso [26], flexión de la aguja del inyector, entre otros factores. Con esta medida combinada con la medida de tasa, se puede obtener la velocidad con la que sale el combustible, y la sección efectiva de los agujeros de descarga.

### 2.4.3 PARÁMETROS DEL FLUJO INTERNO

El *coeficiente de descarga* ( $C_d$ ) es muy útil para evaluar el flujo de combustible que pasa por los orificios de la tobera, y es igual a la razón entre el flujo másico real y el flujo másico máximo teórico. Por otro lado, para calcular el flujo másico teórico, se debe determinar la velocidad más alta para una diferencia de presiones dada. La velocidad máxima se consigue empleando la ecuación de Bernoulli entre dos puntos (suponiendo pérdidas nulas), un punto contra el flujo del orificio de la tobera y otro al exterior del orificio. Por lo tanto, considerando que aguas arriba la velocidad del fluido es despreciable, se obtiene la Ecuación 2.5.

$$\frac{p_i}{\rho_f} = \frac{p_b}{\rho_f} + \frac{1}{2} \cdot u_{teo}^2 \quad (2.5)$$

donde  $p_i$  es la presión contra el flujo,  $p_b$  es la presión a favor del flujo y  $\rho_f$  es la densidad del combustible. Por otro lado, “si el descenso de presión en el orificio de la tobera se obtiene como  $\Delta p = p_i - p_b$ , la velocidad máxima teórica también conocida como *velocidad de Bernoulli*” [19], es:

$$u_{teo} = \sqrt{2\Delta p / \rho_f} \quad (2.6)$$

Si el combustible que fluye por el orificio de salida ocupa toda la sección transversal,  $A_0$ , el caudal teórico es:

$$\dot{m}_{teo} = A_0 \rho_f u_{teo} \quad (2.7)$$

Por lo tanto, el  $C_d$  en función de la diferencia de presión es:

$$C_d = \frac{\dot{m}_f}{\dot{m}_{teo}} = \frac{\dot{m}_f}{A_0 \sqrt{2\rho_f \Delta p}} \quad (2.8)$$

Payri et. al. [15], en su publicación sobre la “influencia del envejecimiento de un inyector diésel en estrategias de inyección múltiple”, observaron que el coeficiente de descarga de en los inyectores viejos era menor que en inyectores nuevos debido a que los orificios de la tobera con el tiempo se obstruía. Por otra parte, Tarkastaja et. al. [27], en su *estudio de simulación de un inyector de combustible dual*, observaron que el  $C_d$  afecta solamente los parámetros presentes a la apertura de la aguja del inyector (velocidad y tasa de inyección, presión en el saco y levantamiento de la aguja) y no al cierre de la misma.

## 2.5 DESCRIPCIÓN DEL CHORRO DIÉSEL

El primer fenómeno presente cuando el diésel es expulsado por la tobera es la *vena líquida*, para que después de cierta distancia recorrida esta vena líquida se transforme en gotas que forman la atomización primaria. Conforme sigan reduciendo de tamaño las gotas pasan a formar la atomización secundaria formando una mezcla de gotas heterogénea. Como ya se había mencionado este proceso es de suma importancia ya que favorece la mezcla aire-combustible.

Cuando la aguja supera el estado transitorio el aspecto macroscópico del chorro cambia de forma radicalmente, adquiriendo una forma cónica con frente semielíptico como se muestra en la Figura 2.10 tomada por Rubio et. al. [28]. Cabe mencionar que el estudio se hace a temperatura ambiente, y en condiciones no evaporativas con el fin de investigar la estructura del chorro diésel y su comportamiento.

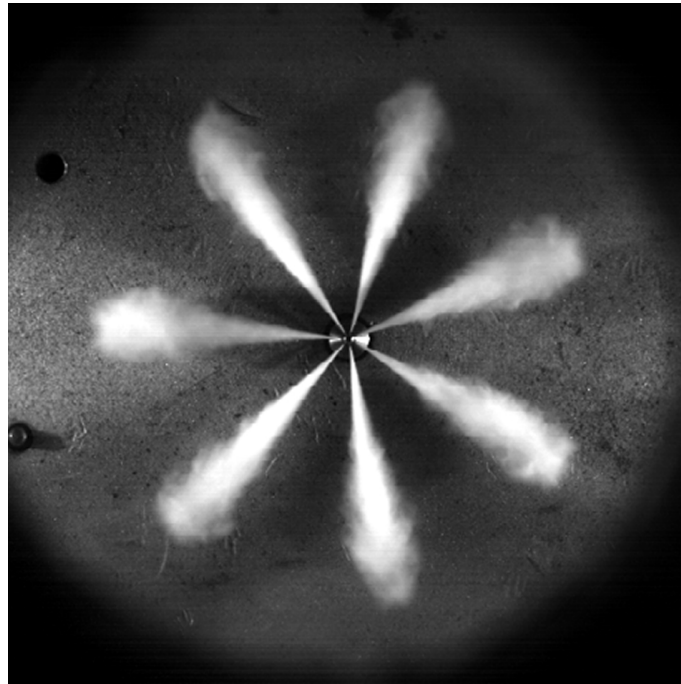


Figura 2.10: Fotografía del diésel atomizado en condiciones no evaporativas con 90 MPa de presión de inyección, 6 MPa de contra-presión y 2 ms después del fin de la inyección.

## 2.6 REGÍMENES DE ATOMIZACIÓN DEL CHORRO

### DIÉSEL

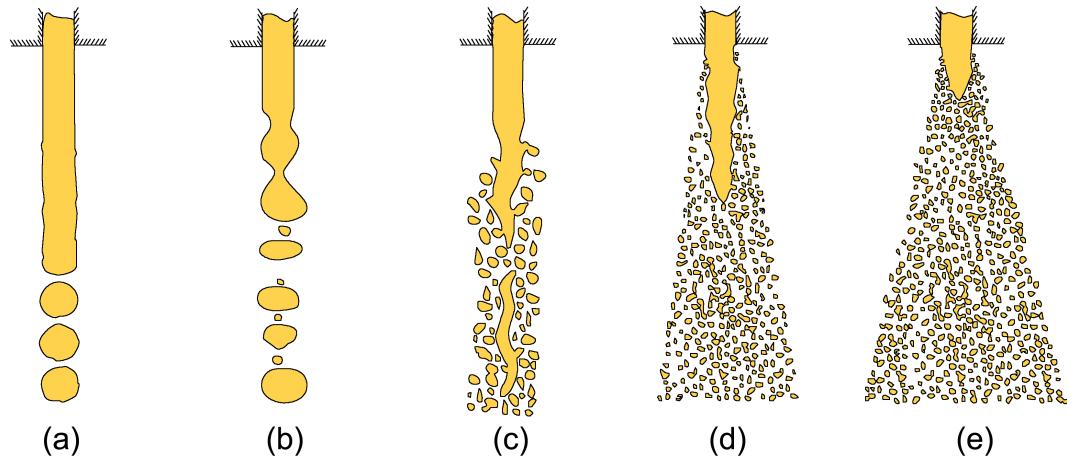


Figura 2.11: Regímenes de atomización.

Existen cuatro regímenes de atomización, los cuales quedan definidos por la velocidad del chorro, es decir, por el número de Reynolds:

*Régimen de Rayleigh:* las velocidades de inyección características de este régimen son de 10 m/s y la tensión superficial provoca la atomización de la vena líquida. En la Figura 2.11(a), se observan las “deformaciones radiales axisimétricas generadas por la interacción entre las fuerzas de tensión superficial, y las perturbaciones iniciales en la superficie del chorro. Las deformaciones crecen y en consecuencia rompen la vena líquida formando gotas cuyo diámetro es uniforme” [19].

*Primer régimen inducido por interacción aerodinámica:* se genera en velocidades de inyección superiores a los 10 m/s, en consecuencia la velocidad relativa entre el gas ambiente y la vena líquida incrementa el efecto de las fuerzas aerodinámicas. Se lleva a cabo para velocidades bajas, donde la interacción aerodinámica incrementa las inestabilidades a consecuencia de la tensión superficial. En consecuencia se obtiene una atomización rápida y gotas con diámetro del tamaño de la vena líquida. Por otro lado, para velocidades altas el chorro comienza a oscilar, adquiriendo una

forma helicoidal, debido a las fuerzas aerodinámicas, como se observa en la Figura 2.11(b).

*Segundo régimen inducido por interacción aerodinámica:* “Con el incremento de la velocidad de inyección las fuerzas aerodinámicas se vuelven preponderantes, y en conjunto con la turbulencia de salida del inyector genera oscilaciones pequeñas en la vena líquida” [19]. Las perturbaciones se amplifican hasta la separación de gotas, como se observa en la Figura 2.11(c).

*Régimen de atomización:* este régimen se caracteriza por la proximidad a los agujeros de la tobera de las gotas del diésel generadas conforme aumenta la presión de inyección. Una consecuencia de las altas velocidades presentes en este régimen es que comienzan a generarse los fenómenos de turbulencia y cavitación. Martos. et. al. [29] observaron que la cavitación resulta por el aumento de la velocidad del combustible a consecuencia del aumento de la velocidad del motor a baja carga. En la Figura 2.11(d) se observa el régimen de atomización incompleta y al aumentar la velocidad se genera el régimen de atomización completa observado en la Figura 2.11(e).

## 2.7 PARÁMETROS MACROSCÓPICOS DEL CHORRO DE COMBUSTIBLE

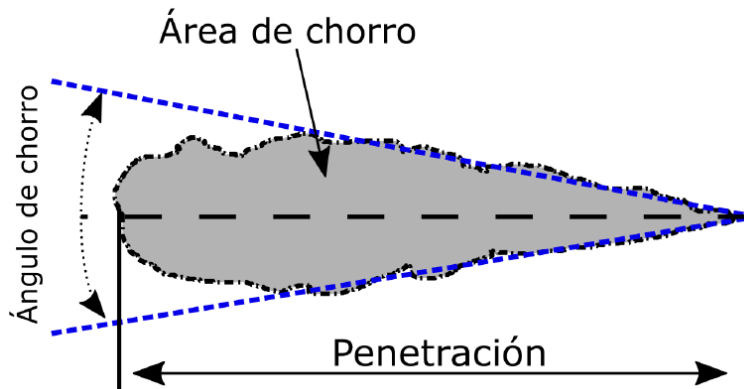


Figura 2.12: Parámetros macroscópicos del chorro diésel.

*Penetración*: es la distancia que recorre el frente del chorro desde su salida por los orificios de la tobera diésel hasta el frente del chorro, como se observa en la Figura 2.12. Este parámetro es afectado por la presión con la que se inyecta el combustible [30], la contra-presión, el diámetro de los orificios de la tobera, el  $C_d$ , la densidad del combustible, la cámara de combustión, el ángulo del chorro y del tiempo. Por otro lado, Huang et. al. [31] en su estudio sobre el *potencial de generación de ondas de choque en condiciones de motores diésel y su influencia en las características de chorro*, proponen que la penetración se puede incrementar por efecto de las ondas de choque generadas a la salida de los agujeros de la tobera. Por su parte, Desantes et. al. [32], en su “estudio óptico de las características del chorro en condiciones reactivas y no reactivas con diferentes estrategias de inyección dividida”, observo que en una inyección dividida, la penetración del chorro del segundo evento de inyección era más rápida.



*Ángulo del chorro:* se obtiene a partir del ángulo formado por dos rectas con un origen común en el orificio de la tobera del inyector diésel, tal y como se describe en la Figura 2.12. Este parámetro está influenciado por la geometría de la tobera, las condiciones bajo las cuales el combustible es inyectado, las propiedades físico-químicas del combustible empleado y del ambiente de la cámara donde se inyecta el combustible, de tal forma que “el ángulo del chorro aumenta conforme se incrementa la densidad del gas que se encuentra en la cámara de combustión” [30]. Por otro lado, Corral et. al. [33] en su estudio sobre el “efecto de las mezclas de diésel-biodiésel-etanol sobre los parámetros macroscópicos de pulverización en un sistema de inyección de diésel common-rail”, observaron que si la viscosidad cinemática y la tensión superficial del diésel disminuyen, el ángulo del chorro aumenta debido a la mejora en la atomización a consecuencia de la inestabilidad de chorro.

*Área del chorro:* es un indicador de la superficie de contacto del diésel atomizado con el aire dentro de la cámara de combustión, por lo tanto, este parámetro está directamente relacionado con la calidad de la mezcla aire-combustible. Las condiciones bajo las cuales el diésel es inyectado definen el área del chorro, y se calcula una vez que se ha determinado el contorno del chorro diésel, tal y como lo realizó Rubio et. al. [28] en su estudio sobre la *caracterización macroscópica automática del chorro diésel mediante un nuevo algoritmo de procesamiento de imágenes*.

## 2.8 PARÁMETROS MICROSCÓPICOS DEL CHORRO DE COMBUSTIBLE

*Distribución de diámetros de gotas:* ésta guarda dependencia de los mecanismos y procesos físicos propios de la inyección. El tamaño de las gotas de combustible es muy variado, “la forma en que se obtiene la distribución de los diámetros es empleando un diámetro medio característico, por ejemplo el diámetro medio aritmético y el diámetro medio de Sauter (SMD), que se caracteriza empleando un sistema de medida de anemometría de fase doppler (PDA)” [19]. Por otro lado, Desantes et. al. [34] encontraron que al emplear la estrategia de post-inyección aumentaba el diámetro medio de las partículas al aumentar la cantidad de combustible inyectado.

*Distribución de velocidades de gotas:* éste muestra un aspecto gaussiano, además de ser isomorfo y en la practica es representado por perfiles de tipo exponencial. Por otro lado, Dhanji et. al. [35] en su estudio sobre las *propiedades de la inyección dividida en las características del chorro utilizando un inyector solenoide de alta presión*, observaron que mientras el tamaño medio de las gotas aumentaba, su velocidad disminuía al final del primer evento de inyección debido a que durante el cierre de la válvula se inyectan ligamentos y gotas grandes con poco impulso.

## 2.9 CONTROL DE LA COMBUSTIÓN MEDIANTE EL PROCESO DE INYECCIÓN

La combustión es afectada por parámetros del proceso de inyección, tales como:

- *Características geométricas del inyector*: cantidad de orificios, diámetro [36], geometría interna y su ubicación.
- *Presión de inyección del combustible*: parámetro que controla la velocidad con la que el combustible es inyectado.
- *Estrategias de inyección*: parámetro que define la cantidad de pulsos aplicados al inyectar el combustible, el inicio y la duración de la inyección.

### 2.9.1 INYECCIÓN SIMPLE

Una *inyección simple* es la configuración más sencilla del proceso de inyección, y “con en este *pulso único* se puede modificar la combustión al variar la presión de inyección, el inicio de la inyección y la masa de combustible inyectada” [16]. En inyecciones pequeñas (relentí), casi toda la masa se quema en la premezcla. En inyecciones largas (aumento de masa [25]) las fases iniciales de la combustión no cambian, pero crece la temperatura y el tiempo de retraso disminuye así como la masa de combustible quemada en la premezcla por el aumento de trabajo del ciclo causado por el incremento de la masa inyectada. “Algunas consecuencias del incremento de la presión de inyección es el aumento de la tasa de inyección” [37] y la velocidad con que sale el combustible, por lo que aumenta la liberación de calor [38], facilita la atomización en gotas pequeñas, reduce los tiempos de mezcla aire-combustible y no modifica el tiempo de retraso, pero por otro lado, “reduce emisiones de hollín aunque aumenta las emisiones de NOx” [39, 40]. En conclusión, la combustión es más rápida y produce un mayor rendimiento del motor, debido al

incremento de la presión de inyección. El comienzo de la inyección define el punto donde inicia la combustión. Por otro lado, una consecuencia del aumento del tiempo retraso es que se incrementa la mezcla y como resultado el máximo de liberación de calor en premezcla aumenta.

## 2.9.2 INYECCIÓN MÚLTIPLE

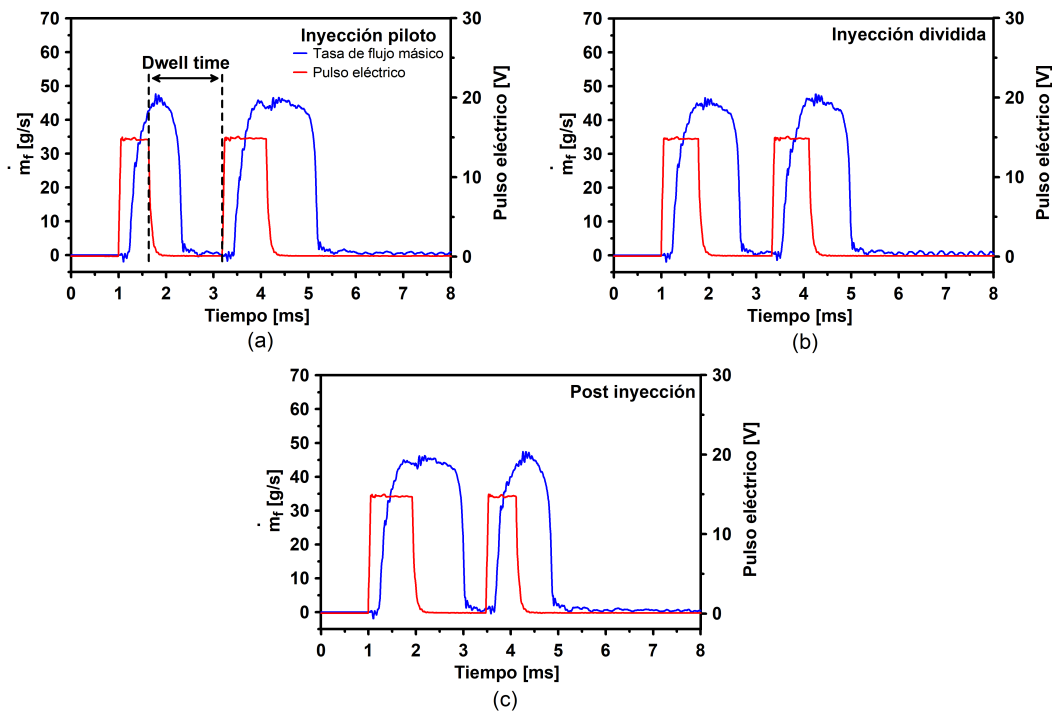


Figura 2.13: Representación gráfica de las estrategias de inyección múltiple: (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección.

Los sistemas de control de inyección más avanzados permiten flexibilizar las estrategias empleadas para inyectar combustible en la cámara de combustión. De tal modo, que es posible realizar dos o más pulsos por inyección, como lo llevó a cabo Ferrari et. al. [41], logrando reducir considerablemente el ruido del motor al aplicar una estrategia de inyección de tres pulsos. Por otro lado, cuando se emplean inyecciones dobles, se mejoran la eficiencia del combustible respecto a las inyecciones simples [39]. “Las estrategias de inyección múltiple son efectivas cuando se ajusta

correctamente la tasa de inyección y el dwell time” [42]. Las configuraciones predominantes son aquellas formadas por un pulso principal de mayor masa y un pulso secundario de menor masa. Al variar el orden de de estos pulsos se obtiene:

*Inyección piloto:* esta estrategia consiste en realizar primero una pequeña inyección (menor que la principal) y después de un lapso de tiempo (dwell time) se lleva a cabo la inyección principal como se observa en la Figura 2.13(a). Esta estrategia es comúnmente empleada para reducir el ruido de la combustión y reducir los NOx mientras el motor mantiene la eficiencia térmica [43, 39] y “si se aplican inyecciones piloto de tres eventos se reduce al máximo la tasa de liberación de calor en la cámara de combustión respecto a la inyección piloto tradicional” [44] así como el ruido del motor [45]. Por otra parte, la inyección piloto favorece las condiciones que para un encendido más rápido de la inyección principal [46, 47].

*Inyección dividida:* consiste en inyectar dos masas de combustible de igual magnitud separadas por un lapso de tiempo como se observa en la Figura 2.13(c). Por otro lado, Pelíc et. al. [48] en su estudio sobre el “impacto de la inyección dividida en el consumo de combustible y las emisiones de NOx del motor diésel marino de velocidad media”, concluyen que si se aplica esta estrategia de forma eficaz es posible disminuir las emisiones de NOx. Además, si se ajusta el inicio de la inyección también es posible reducir el hollín [49] y el ruido del motor [50].

*Post-inyección:* consiste en inyectar primero la inyección principal, y después de un lapso de tiempo una pequeña inyección de menor masa que la principal como se observa en la Figura 2.13(b). Esta estrategia se emplea con el fin de reducir el hollín [39], ya que en las fases finales de la combustión mejora la oxidación del hollín. Además, Payri et. al. [46] en su investigación sobre “la influencia de la inyección por aspersión diésel sobre el encendido y la formación de hollín en la estrategia de inyección múltiple”, observaron que el retraso del encendido del segundo evento de inyección se redujo entre un 40 % y un 50 % en comparación con su caso de referencia en una inyección simple.

## CAPÍTULO 3

# PLANTEAMIENTO DE LA TESIS

---

En este capítulo se realizó una revisión de la literatura para identificar las áreas de oportunidad, además se planteó la hipótesis de la tesis y se estableció el objetivo general así como los objetivos específicos.

### 3.1 RESUMEN DE LA REVISIÓN BIBLIOGRÁFICA

Hoy en día hay muchos vehículos y maquinaria pesada que operan con motores Diésel y que seguramente lo seguirán haciendo, por tal motivo es muy importante continuar investigando estas tecnologías con el fin de que sigan operando de forma eficiente y con un mínimo de emisiones contaminantes, a la par de cumplir con la normativas medioambientales vigentes. Una forma de contribuir a mejorar estas tecnologías es mediante las soluciones activas, entre las que se destacan aquellas que se llevan a cabo durante la inyección de combustible. Actualmente, el sistema de inyección diésel common-rail es empleado para llevar a cabo la inyección del combustible dentro de un motor Diésel, el cual está compuesto de una bomba de alta presión, un common-rail, en donde se acumula el combustible presurizado, una unidad de control, la cual se emplea para regular la presión, y para la energización de los inyectores, estos pueden ser de tipo solenoide o piezoeléctrico. El inyector se destaca en el sistema de inyección, ya que mediante esta tecnología se inyecta el diésel dentro de la cámara de combustión. Adicionalmente, al emplear más de un evento de inyección en los inyectores se logra reducir las emisiones de NOx y hollín, comunes de los motores diésel.

En la revisión de la literatura se puede observar que existen pocos estudios donde comparen los inyectores diésel solenoide y piezoeléctricos bajo las estrategias de inyección múltiple. Al respecto, Taskiran et. al. [51], llevaron a cabo un “estudio experimental sobre la autoignición e influencia de la forma de la tobera mediante un análisis de los parámetros macroscópicos”, por otro lado, Wenbin Yu et al. [52], compararon ambas tecnologías de inyectores usando diésel y keroseno.

Otros autores como M. Skowron et. al. [20], han realizado estudios donde compararon estos inyectores empleando inyecciones simples, concluyendo que el inyector solenoide tiene un menor retraso hidráulico en la inyección. Autores como S. d’Ambrosio et. al. [13], estudiaron el rendimiento hidráulico de ambos inyectores

mediante inyecciones simples y la estrategia de inyección piloto, en donde concluyen que las diferencias entre los inyectores diésel tipo solenoide y piezoeléctricos, se deben a la configuración interna de cada uno, de tal modo que si tuvieran en común el mismo diseño, las diferencias serían mínimas, proponiendo como mejor opción el inyector solenoide, por su precio más bajo.

Una comparativa más reciente de estas dos tecnologías de inyectores es la realizada por Alessandro Ferrari et. al. [41], que incluye las estrategias de inyección múltiple piloto y post, además de un modelo numérico, el cual validan experimentalmente, y concluyen que los inyectores muestran efectos similares en las emisiones de NOx y hollín del motor diésel.

Bajo este análisis se observa la necesidad de un estudio más completo donde se incluyan las tres principales estrategias de inyección múltiple, piloto, dividida y post-inyección, para comprender mejor como operan los inyectores diésel solenoide y piezoeléctrico inyectando una masa de combustible constante.

Para este estudio se emplearon dos inyectores diésel, uno tipo solenoide y otro piezoeléctrico con diferentes geometrías en sus toberas, lo que impide una comparación directa entre ambos inyectores, por lo que se recurrió a establecer una masa de combustible fija a inyectar en los dos inyectores para que de este modo sea posible entender el comportamiento hidráulico de cada uno de los inyectores estudiados. Teniendo en cuenta estas limitantes y sus consecuencias, lo que se busca con este estudio es llevar a cabo un análisis individual de cada inyector.



## 3.2 HIPÓTESIS

El retraso hidráulico y la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección en las estrategias de inyección piloto, dividida y post-inyección son afectados por la presión de inyección y el dwell time tanto en inyector diésel solenoide y piezoeléctrico.

## 3.3 OBJETIVOS DEL ESTUDIO

### 3.3.1 OBJETIVO GENERAL

Determinar como afecta el dwell time y la presión de inyección al retraso hidráulico y la masa de combustible inyectada en el segundo evento de inyección aplicando las estrategias de inyección piloto, dividida y post-inyección en un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico.

### 3.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Obtener las ecuaciones que definen el caudal másico en función del tiempo de energización en el inyector diésel tipo solenoide y piezoeléctrico.
- Determinar las condiciones de operación en las que ambos inyectores diésel inyectan la misma masa de combustible.
- Determinar la matriz de experimentos basada en la isomasa y en las estrategias de inyección múltiple piloto, dividida y post-inyección para el inyector diésel solenoide y piezoeléctrico.

- 
- Obtener la tasa de combustible empleando de las estrategias de inyección múltiple piloto, dividida y post-inyección, empleado los niveles de presión de 80, 100 y 120 MPa en un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico.
  - Determinar retraso hidráulico respecto al dwell time empleando de las estrategias de inyección múltiple estudiadas.
  - Obtener la masa de combustible inyectada respecto al dwell time empleando la estrategias de inyección múltiple piloto, dividida y post-inyección, empleado los niveles de presión de 80, 100 y 120 MPa en un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico.

## CAPÍTULO 4

# METODOLOGÍA

---

En este capítulo se muestra y describe la instalación experimental utilizada en el presente estudio, así como sus elementos más importantes, el plan de trabajo y la descripción de los parámetros de operación, y de la matriz de experimentos para las inyecciones simples y las estrategias de inyección múltiple empleadas. Finalmente, se describe el procesamiento de los datos obtenidos, así como su análisis, para lograr los objetivos establecidos en este estudio.

## 4.1 HERRAMIENTAS EXPERIMENTALES

### 4.1.1 INSTALACIÓN EXPERIMENTAL DEL TASÍMETRO

La instalación de pruebas empleada tiene los dispositivos necesarios para simular el funcionamiento y control de la inyección de un motor diésel. En la Figura 4.1 se puede observar la descripción gráfica de la instalación experimental empleada para la medición de la tasa de combustible inyectado con un inyector diésel solenoide, misma que ha sido empleado por Martínez-Martínez et. al. [53] en estudios previos. Además, en la Tabla 4.1 se muestra la nomenclatura de los componentes de la instalación. Por otro lado, en la Figura 4.2 se puede observar la descripción gráfica de la instalación experimental para la medición de la tasa de combustible inyectado con el inyector diésel piezoeléctrico, en donde se destaca en la línea de retorno del inyector un *remanso* de combustible presurizado a 0.6 MPa, sin el cual el inyector no podría funcionar de forma correcta.

Para realizar las inyecciones de este estudio se empleó un banco de pruebas equipado con todos los dispositivos auxiliares necesarios para la correcta operación y control de la instalación. La instalación experimental se compone esencialmente de un sistema hidráulico de baja presión que es el encargado de suministrar diésel a una bomba de alta presión, la cual lo presuriza y lo suministra al common-rail que a su vez lo dirige al inyector, el cual es controlado por el amplificador de potencia GENOTEC para suministrar el combustible al tasímetro de acuerdo a los parámetros programados, al tasímetro se le suministra nitrógeno presurizado para crear la contra-presión presente en la cámara de combustión de un motor diésel. Mediante una serie de sensores dentro del tasímetro, el analizador de inyecciones IAV recopila información de presión y temperatura en cada inyección y manda los datos a la computadora. Por último, el combustible sale directamente a una balanza analítica y se compara con la que se registra en la computadora.

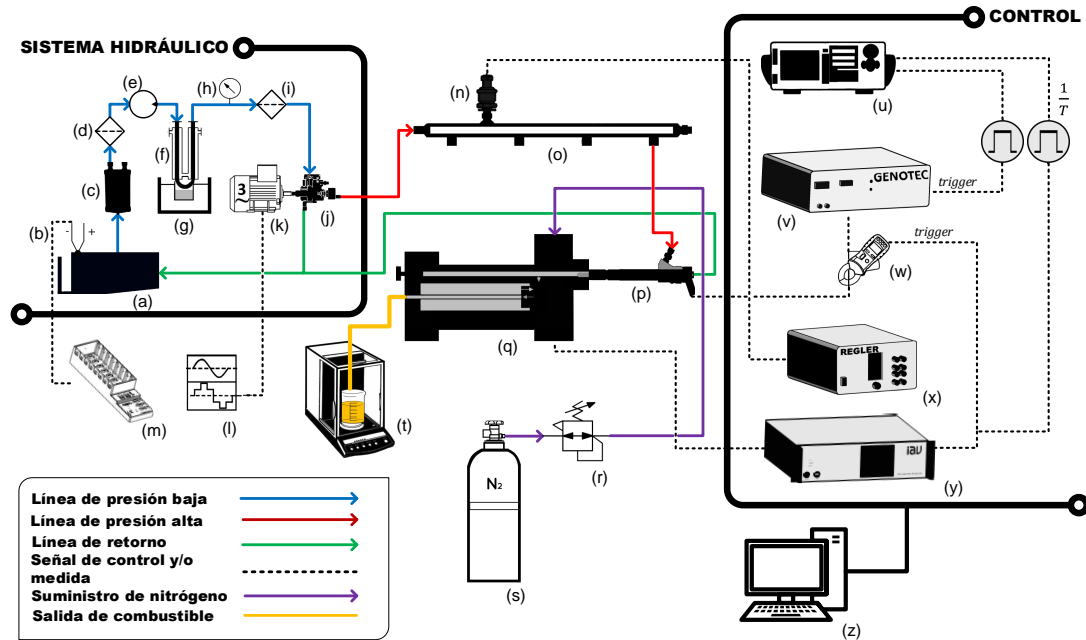


Figura 4.1: Esquema de la instalación empleada en la medición de la tasa de combustible inyectado con un inyector diésel solenoide.

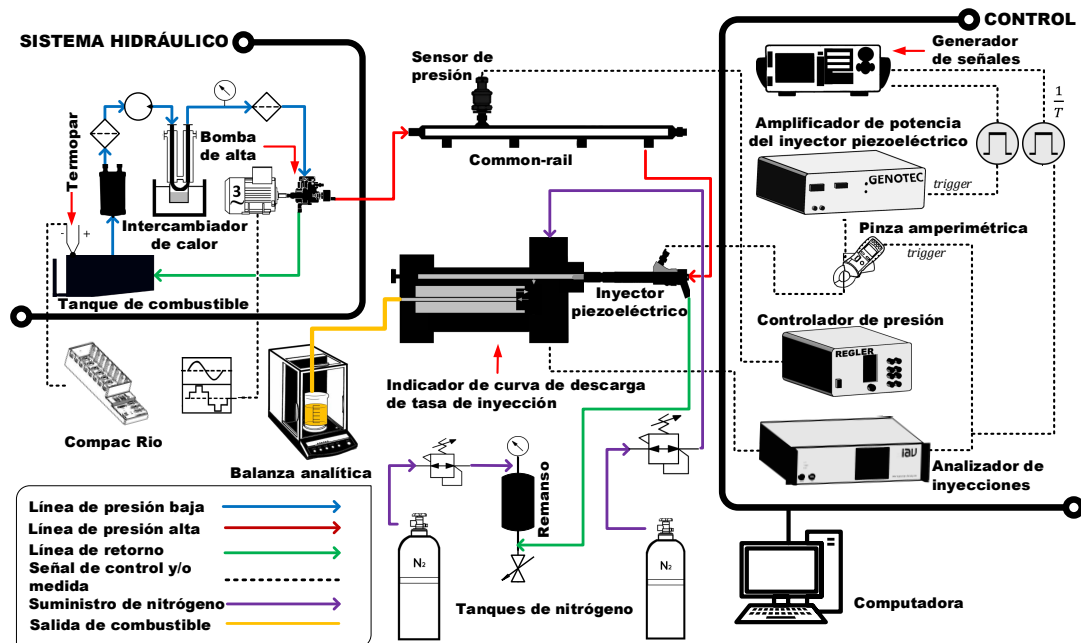


Figura 4.2: Esquema de la instalación empleada en la medición de la tasa de combustible inyectado con un inyector diésel piezoeléctrico.

Inciso	Componente	Inciso	Componente
a	Deposito de combustible	n	Sensor de presión
b	Termopar	o	Common-rail
c	Purgador	p	Inyector solenoide
d	Filtro 1	q	Tasímetro
e	Bomba de baja presión	r	Válvula reguladora de presión
f	Intercambiador de calor	s	Tanque de Nitrógeno
g	Baño térmico	t	Balanza analítica
h	Manómetro	u	Generador de pulsos
i	Filtro 2	v	Control de inyector (GENOTEC)
j	Bomba de alta presión	w	Pinza amperimétrica
k	Motor trifásico	x	Regulador de presión C
l	Variador de frecuencia	y	IAV
m	CompactRio	z	Computadora

Tabla 4.1: Nomenclatura del diagrama de la instalación experimental

**Sistema de inyección Common-Rail:** Este sistema está formado por dos circuitos, uno de baja presión, formado por un depósito de combustible con capacidad de 21 litros (a), válvula de purga (c), dos filtros de combustible (d) y (i), bomba de baja presión (e), un intercambiador de calor (f) y un regulador de presión (h), mientras que el de alta presión tiene un inyector diésel (p), un sistema common-rail (o), una bomba de alta presión (j), un motor eléctrico (k) y un convertidor de frecuencia (l) para controlar la velocidad.

**Combustible:** El combustible empleado en el presente estudio fue diésel comercial y se muestra en la Figura 4.3. Por otro lado, las propiedades físicas del diésel que se resumen en la Tabla 4.2, fueron tomadas del estudio de Fernando Guevara [54], debido a que el combustible se tomó del mismo contenedor.

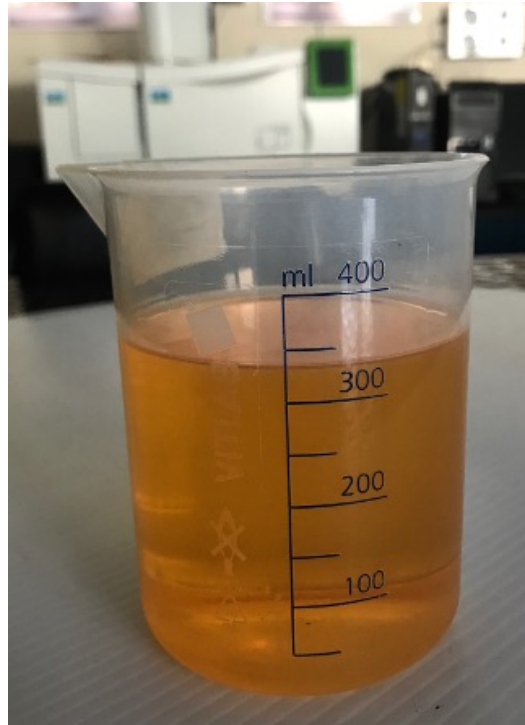


Figura 4.3: Diesel empleado en el estudio.

Densidad [Kg/m <sup>3</sup> ]	Viscosidad [mm <sup>2</sup> /s]	Tensión superficial [mN/m]
823.42	1.42	26.38

Tabla 4.2: Propiedades físicas del combustible diésel empleado.

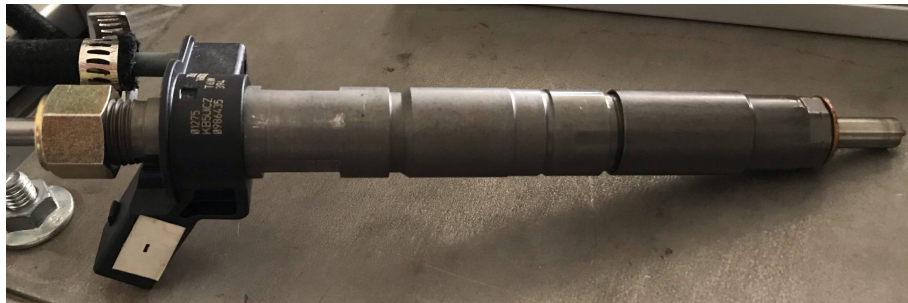
**Inyectores diésel:** En el presente estudio se emplearon dos tipos de inyectores diésel, uno de tipo solenoide y otro de tipo piezoeléctrico, ambos de la firma Bosch. En las Figuras 4.4a y 4.4b se muestra una imagen del inyector diésel tipo solenoide, y del tipo piezoeléctrico, respectivamente. Por otro lado, en la Tabla 4.3, se muestran las geometrías de los inyectores estudiados, tales como el número de orificios, el diámetro interno ( $D_{in}$ ), el diámetro externo ( $D_{out}$ ) y el k-factor. Éste último parámetro es de gran importancia ya que es un indicador respecto al tipo de boquilla, cilíndrica o cónica del inyector empleado. Cabe mencionar que la boquilla cónica reduce el fenómeno de cavitación, por otro lado, la boquilla cilíndrica lo promueve [23]. La

forma de calcular el k-factor es mediante la Ecuación 4.1, donde  $D_{in}$  corresponde al diámetro interno de la boquilla y  $D_{out}$  al externo.

$$k - factor = \frac{D_{in} - D_{out}}{10} \quad (4.1)$$



(a) Inyector diésel solenoide.



(b) Inyector diésel piezoeléctrico.

Figura 4.4: Inyectores diésel empleados.

Inyector	Número de orificios	$D_{in}$ [ $\mu m$ ]	$D_{out}$ [ $\mu m$ ]	k-factor [-]
Piezoeléctrico	7	$158 \pm 12$	$140 \pm 12$	1.8
Solenoide	7	$143 \pm 12$	$128 \pm 12$	1.5

Tabla 4.3: Detalles geométricos de los inyectores diésel estudiados.



**Tasímetro:** El tasímetro empleado en esta investigación es de la marca IAV, tipo N 050-050 y se muestra en la Figura 4.5. Los cuatro sensores encargados de enviar la señal recibida durante las inyecciones al analizador de señales se describen a continuación:

- Rate signal: registra la presión dinámica.
- Temperature: registra la temperatura cerca de la tobera de inyección.
- Static pressure: registra la presión estática (contrapresión) dentro del sistema.
- Key: representa la codificación del sistema.

El tasímetro cuenta con una unidad de control electrónico (UE), cuya función es suministrar señales y energía a los sensores. Para el correcto funcionamiento de la UE, las señales de orden básicas son: la señal  $1/T$ , que transmite la frecuencia con que se lleva a cabo la inyección, y el trigger que controla el pulso eléctrico en cada inyección.

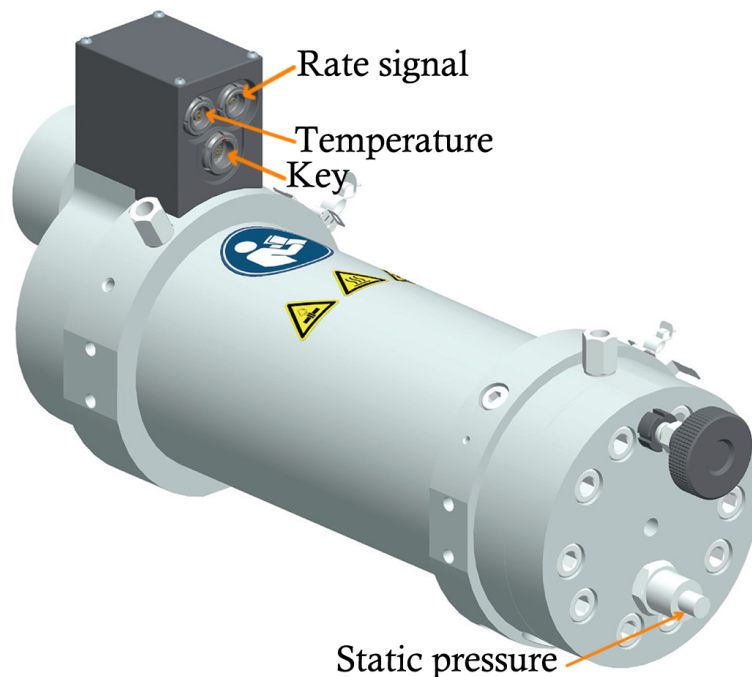


Figura 4.5: Tasímetro IAV tipo N 050-050.

El *principio de medición física en el tasímetro* se basa en la *ley de inyección*. El inyector inyecta combustible dentro del tasímetro en una tubería de medición hasta llenarla, y a partir de este punto la inyección provoca un *aumento dinámico de la presión* ( $p(t)$ ) proporcional a la tasa de inyección. “Esta proporción es igual a la razón del área de la sección transversal de la tubería ( $A$ ), y la velocidad del sonido en el fluido ( $a$ )” [55]. En conclusión, para obtener la *tasa de combustible inyectado* así como la *masa de combustible inyectada* se usa la Ecuación 4.2 y la Ecuación 4.3, respectivamente.

$$\dot{m} = \frac{A}{a}p(t) \quad (4.2)$$

$$m = \frac{A}{a} \int p dt \quad (4.3)$$

La señal de presión dinámica se mide junto con dos señales adicionales: la temperatura cerca de la tobera y la contrapresión del combustible. El analizador de inyección adquiere las señales captadas durante la inyección, éstas se almacenan y analizan mediante el software medidor de tasa IAV.

**Dispositivo de suministro de nitrógeno presurizado:** al tasímetro se le suministra nitrógeno mediante una conexión para emular la contrapresión de un motor Diésel. El nitrógeno es suministrado a través de un cilindro con nitrógeno, cuya presión de entrada esta regulada de 0 a 20.68 MPa, y la de salida de 0 a 17.23 MPa. También se tiene instalado un sistema de despresurización de nitrógeno para expulsar el nitrógeno que se ha introducido en el sistema cuando se requiere.

## 4.2 PLAN DE TRABAJO

### 4.2.1 CONDICIONES DE OPERACIÓN

Para lograr los objetivos de este estudio, es necesario conocer el comportamiento de cada inyector en cuanto a la masa de combustible que inyecta por unidad de tiempo, por tal motivo, primero se realizaron inyecciones simples empleando tiempos de energización (TE) desde  $500 \mu s$  hasta  $2700 \mu s$  para los niveles de presión de 80, 100 y 120 MPa. Con el fin de estabilizar el sistema de inyección se realizaron 300 inyecciones de las cuales se tomaron en cuenta para este estudio las últimas 100 inyecciones ya que éstas son las que mostraron ser más estables. En la Tabla 4.4 se muestran los parámetros de operación para el barrido con inyecciones simples para el inyector diésel solenoide y piezoeléctrico. Cabe mencionar que para definir estos parámetros se tomaron en cuenta los límites de operación de los inyectores y del tasímetro con el fin de no comprometer la instalación experimental.

$p_{rail}$ [MPa]	$p_{back}$ [MPa]	TE [ $\mu s$ ]
80	5	500 - 2700
100	5	500 - 2700
120	5	500 - 2700

Tabla 4.4: Matriz de experimentos de inyecciones simples de los inyectores empleados.

En la Figura 4.6 se observan las evoluciones características de tasa de flujo másico para los niveles de presión de 80, 100 y 120 MPa de un inyector diésel solenoide, mientras que en la Figura 4.7 se muestran las del inyector diésel piezoeléctrico. En estas figuras también se define la zona estacionaria para cada nivel de presión con el fin de calcular la tasa promedio del combustible inyectado, y así de esta manera poder determinar el coeficiente de descarga, para ello se usó un tiempo de energización largo de 2.7 ms.

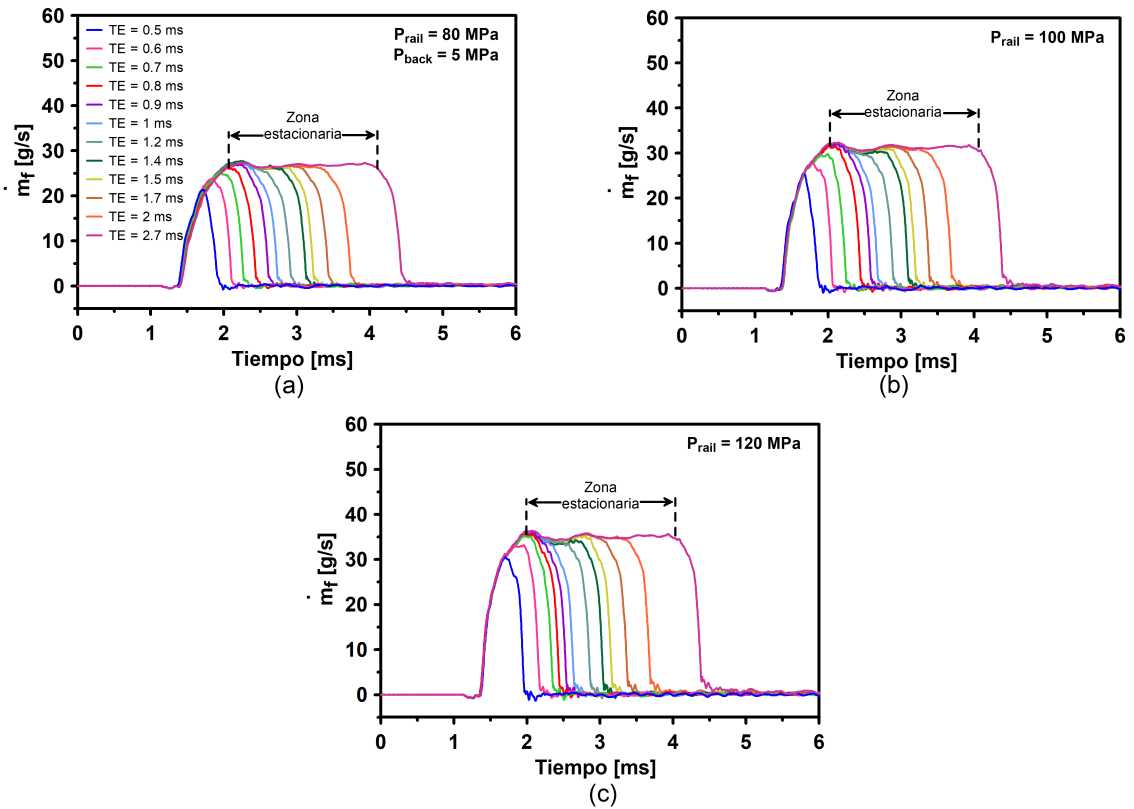


Figura 4.6: Evoluciones temporales de flujo másico de combustible para tiempos de energización en el rango de 0.5 a 2.7 ms, cuando se empleó una inyección simple en un inyector solenoide, con una  $p_{back} = 5$  MPa, y niveles de  $p_{rail} = 80$  MPa, (b)  $p_{rail} = 100$  MPa y (c)  $p_{rail} = 120$  MPa.

A partir de estos resultados es posible calcular la masa de combustible inyectada para cada tiempo de energización aplicando la integral al flujo másico de combustible obtenido (área debajo de cada una de las curvas de tasa). En la Figura 4.8 se muestran las curvas correspondientes a la masa de combustible inyectada por nivel de presión, para un inyector diésel solenoide, así como las ecuaciones obtenidas mediante un ajuste lineal, que definen los tiempos de energización correspondientes a la masa de combustible que se desea inyectar. En la Figura 4.8 se aprecia un comportamiento no lineal para el TE de 0.5 ms a 0.9 ms y un comportamiento lineal 0.9 ms a 2.7 ms para todos los niveles de presión estudiados. Mientras que en la Figura 4.9 se muestran las curvas características para un inyector diésel piezoeléctrico, donde también se aprecia un doble comportamiento lineal, teniendo como punto de

inflexión el TE de 1.5 ms, 1.7 ms y 2 ms, con valores de presión de inyección de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. El doble comportamiento también lo han reportado Ferrari et al. [17] y d'Ambrosio et al. [13], en ambos inyectores y se puede atribuir a que la aguja no alcanza a elevarse completamente en los TE pequeños y cuando ésta se encuentra completamente levantada para los TE largos, cambia su comportamiento, tal y como se aprecia en la gráfica.

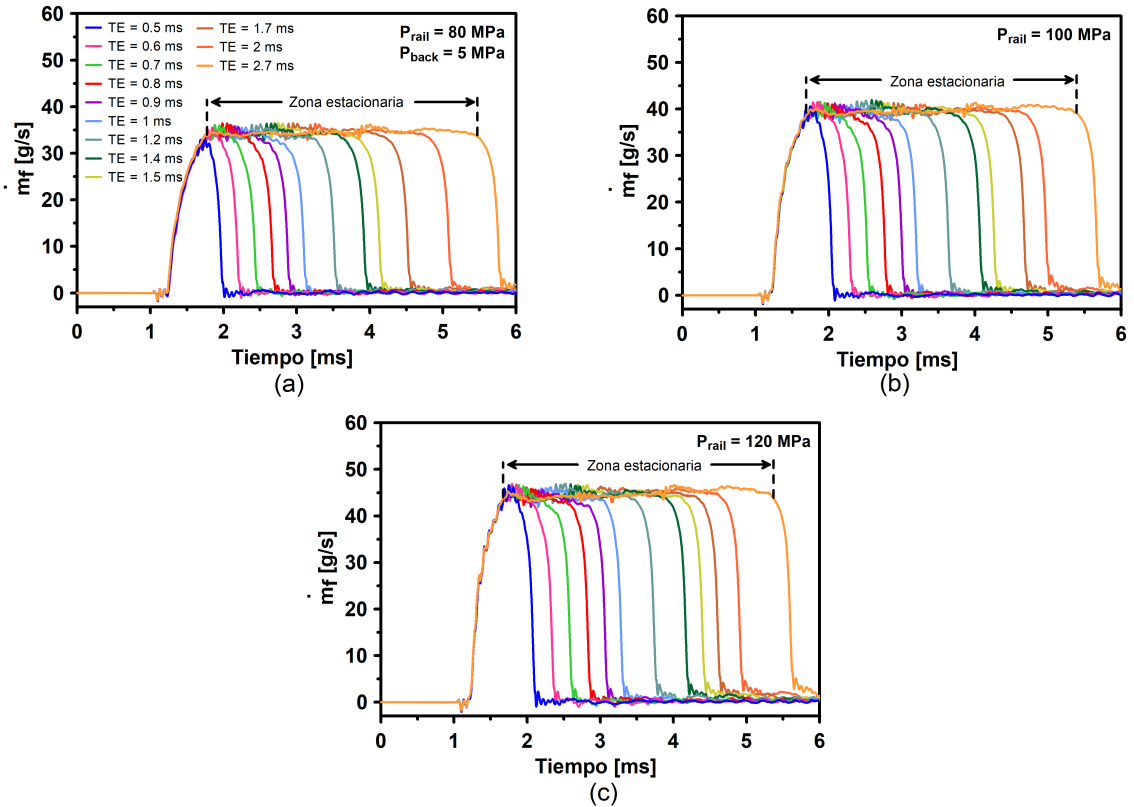


Figura 4.7: Evoluciones temporales de flujo másico de combustible para tiempos de energización en el rango de 0.5 a 2.7 ms, cuando se empleó una inyección simple en un inyector piezoeléctrico, con una  $p_{back} = 5$  MPa, y niveles de  $p_{rail} = 80$  MPa, (b)  $p_{rail} = 100$  MPa y (c)  $p_{rail} = 120$  MPa.

Tomando en cuenta las ecuaciones características para cada nivel de presión y las limitantes de operación de la instalación experimental, se establecieron las condiciones de operación para asegurar una masa de combustible constante de 110 mg en ambos inyectores. Los 110 mg se dividieron en dos partes para cada estrategia de inyección, en consecuencia se obtuvieron 3 masas diferentes, donde la masa 1 fue

de 40 mg (36%), la masa 2 de 55 mg (50%) y la masa 3 de 70 mg (64%). Aplicando las ecuaciones obtenidas mediante la regresión lineal a las masas calculadas, se obtuvieron los tiempos de energización empleados en las estrategias de inyección múltiple.

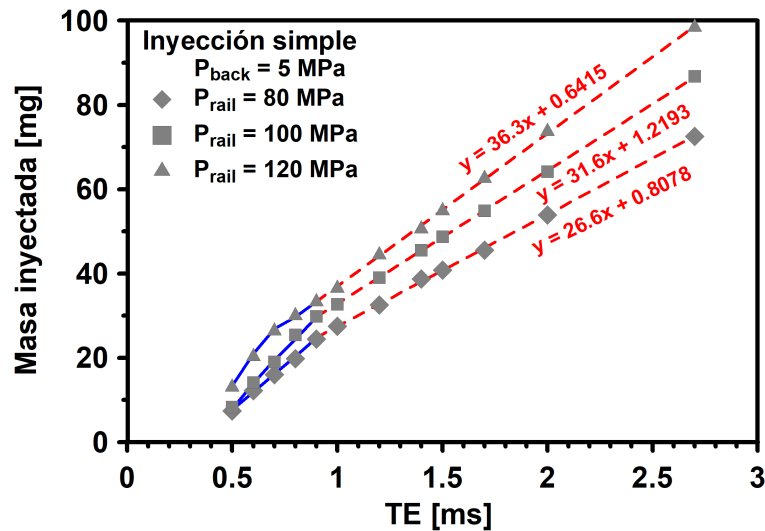


Figura 4.8: Evolución de la masa de combustible inyectada respecto al tiempo de energización, para los niveles de  $p_{rail}$  y nivel de  $p_{back}$  probados en un inyector diésel solenoide.

Otro parámetro de estudio empleado fue el Dwell Time (DT), el cual se definió a partir de la separación mínima necesaria (zona sensible) para que las inyecciones de las estrategias de inyección no se transformen en una sola inyección, con el fin de evaluar el impacto de este parámetro sobre la masa inyectada y el retraso hidráulico del segundo evento de inyección. Se consideraron valores consecutivos de DT en la zona sensible, y espaciados lejos de esta zona. La matriz de experimentos resultante para un inyector solenoide se muestra en la Tabla 4.5, mientras que la del inyector piezoeléctrico se puede apreciar en la Tabla 4.6.

A partir de estas condiciones de funcionamiento se obtuvieron las evoluciones temporales del flujo másico y el pulso eléctrico correspondiente a las tres inyecciones múltiples y a los niveles de presión estudiados. En la Figura 4.10 se observa la evolución temporal del flujo másico y del pulso eléctrico para las estrategias de

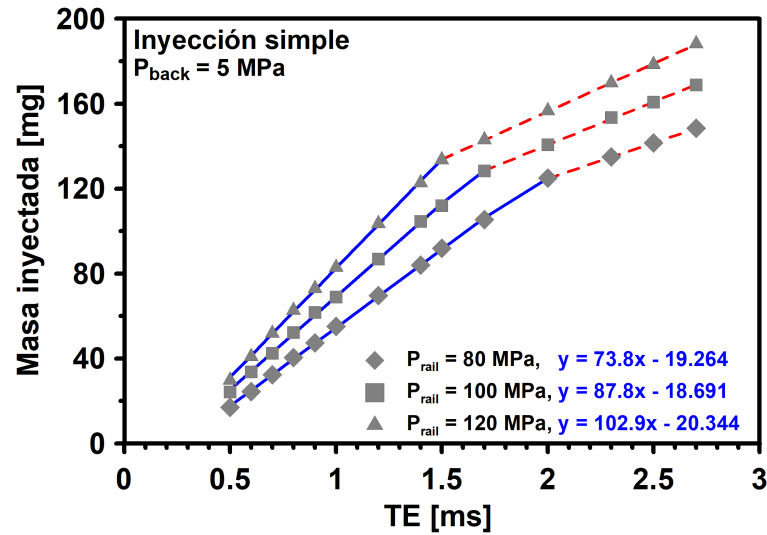


Figura 4.9: Evolución de la masa de combustible inyectada en función del tiempo de energización, para los niveles de  $p_{rail}$  y nivel de  $p_{back}$  probados en un inyector diésel piezoeléctrico.

$p_{rail}$ [MPa]	$p_{back}$ [MPa]	1ra. Iny. [ $\mu s$ ]	DT [ $\mu s$ ]	2da. Iny. [ $\mu s$ ]	Estrategia
80	5	1473	550 - 2000	2601	Piloto
		2601		1473	Post
		2037		2037	Dividida
100	5	1227	550 - 2000	2177	Piloto
		2177		1227	Post
		1702		1702	Dividida
120	5	1084	550 - 2000	1911	Piloto
		1911		1084	Post
		1497		1497	Dividida

Tabla 4.5: Matriz de experimentos para el inyector diésel solenoide.

inyección piloto, dividida, y post inyección, al emplear una  $p_{rail} = 120$  MPa,  $p_{back} = 5$  MPa,  $DT = 2$  ms y un inyector diésel solenoide; mientras que en la Figura 4.11 se observa la información del inyector piezoeléctrico.

$p_{rail}$ [MPa]	$p_{back}$ [MPa]	1ra. Iny. [ $\mu s$ ]	DT [ $\mu s$ ]	2da. Iny. [ $\mu s$ ]	Estrategia
80	5	803	1150 - 3000	1210	Piloto
		1210		803	Post
		1006		1006	Dividida
100	5	668	1150 - 3000	1010	Piloto
		1010		668	Post
		839		839	Dividida
120	5	586	1150 - 3000	878	Piloto
		878		586	Post
		732		732	Dividida

Tabla 4.6: Matriz de experimentos para el inyector diésel piezoeléctrico.

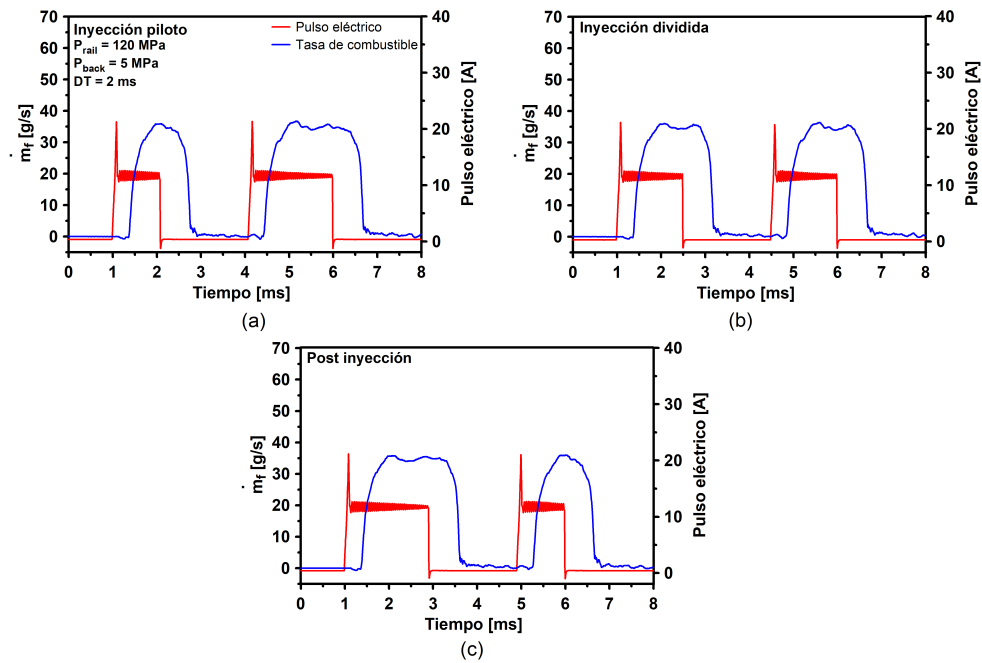


Figura 4.10: Evoluciones temporales de flujo másico y del pulso eléctrico usando el inyector diésel solenoide, un DT de 2 ms, una  $p_{rail} = 120$  MPa, una  $p_{back} = 5$  MPa, y las inyecciones múltiples (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección.



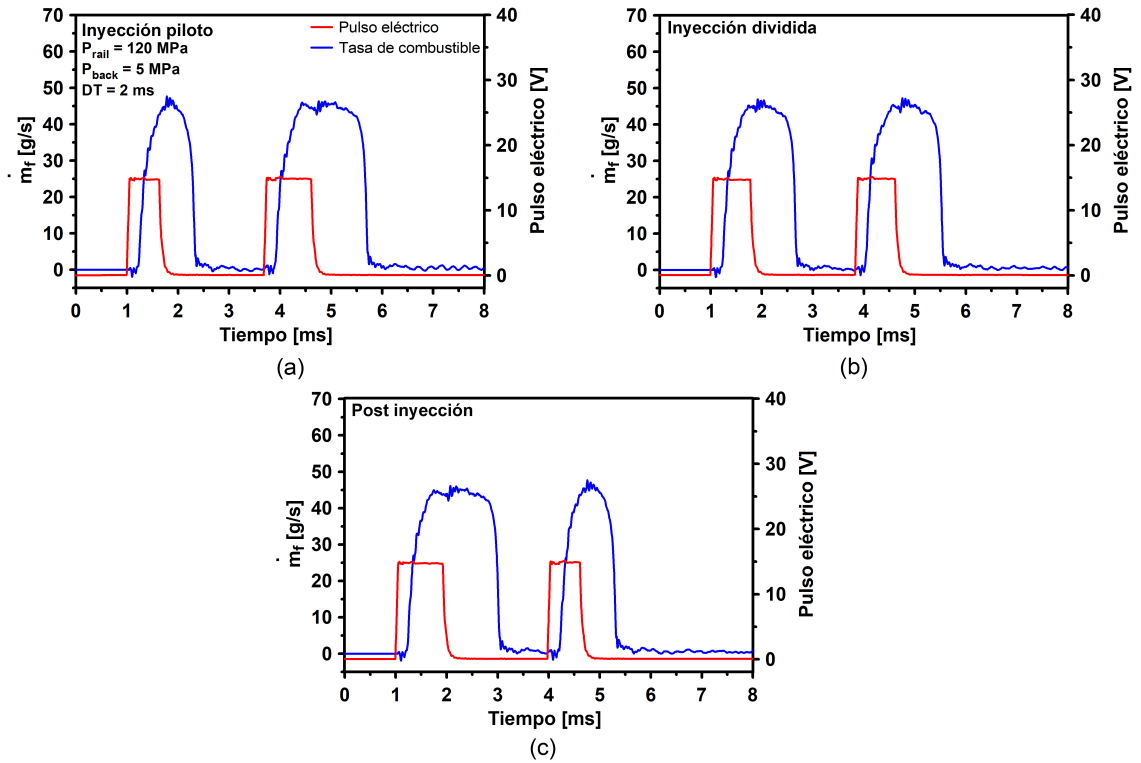


Figura 4.11: Evoluciones temporales de flujo másico y del pulso eléctrico usando el inyector diésel piezoeléctrico, un  $DT$  de 2 ms, una  $p_{rail} = 120$  MPa, una  $p_{back} = 5$  MPa, y las inyecciones múltiples (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección.

## 4.3 PROCESAMIENTO DE LOS DATOS OBTENIDOS

### 4.3.1 OBTENCIÓN Y PROCESAMIENTO DE DATOS

Una vez llevada a cabo la experimentación con los parámetros de operación establecidos se procedió a convertir los archivos obtenidos del software IAV a un formato amigable, y fácil de usar para obtener los datos a analizar. Por otro lado, del software IAV se obtuvieron 3 archivos con las extensiones .tdms, .tdms-index y .txt, de los cuales el archivo que contenía la información de tasa y pulso fue el de la extensión .tdms, por lo que se convirtió a .xlsx (Excel), y esto se hace abriendo el archivo directamente desde el software LabView versión 14. Una vez que se tiene la información en el archivo Excel se procede a analizarla con el fin de obtener el flujo másico, la masa de combustible inyectada, el coeficiente de descarga y el retraso hidráulico.

### 4.3.2 OBTENCIÓN DE PARÁMETROS

Uno de los parámetros más relevantes a obtener en este estudio es la **masa de combustible inyectada** [mg]. Este parámetro se obtiene a partir de la sumatoria de los productos de los valores discretos del flujo másico y el tiempo, tomando como límites el inicio y el fin de la inyección. Para definir el inicio y fin de cada inyección se aplicó la metodología de Salvador et al. [56] mostrada de forma gráfica en la Figura 4.12, y descrita a través de los siguientes pasos:

1. Se obtiene el valor máximo del flujo másico.
2. Se obtienen los puntos correspondientes al 10 % y 50 % del máximo del flujo másico.
3. Se obtiene la ecuación de la recta de los puntos definidos.

4. Se obtiene el punto donde la recta cruza con el eje del tiempo (tasa = 0).
5. El punto obtenido corresponde al inicio de la inyección.
6. Se determina el fin de la inyección repitiendo los pasos anteriores en la zona descendente de la gráfica.

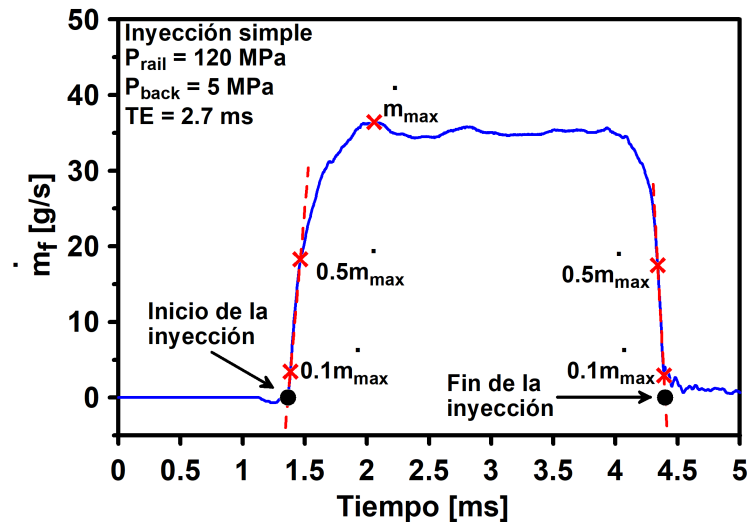


Figura 4.12: Esquema de la metodología para determinar el inicio y fin de la inyección

Otro parámetro importante que indica cuanto demora en comenzar a inyectar combustible un inyector es el **retraso hidráulico** [ms], y su esquema representativo se muestra en la Figura 4.13, concretamente, el retraso hidráulico está definido como la diferencia entre el punto donde inicia la inyección, y el punto de inicio del pulso eléctrico.

$$\text{Retraso hidráulico} = \text{Inicio de la inyección} - \text{Inicio del pulso eléctrico}$$

El inicio del pulso eléctrico se define como el punto donde comienza a crecer en magnitud el pulso eléctrico y se corrobora gráficamente. El fin del pulso eléctrico es útil para conocer la duración del pulso eléctrico, y se define como el punto donde comienza a decrecer el amperaje o voltaje a cero, y también se corrobora de forma gráfica.

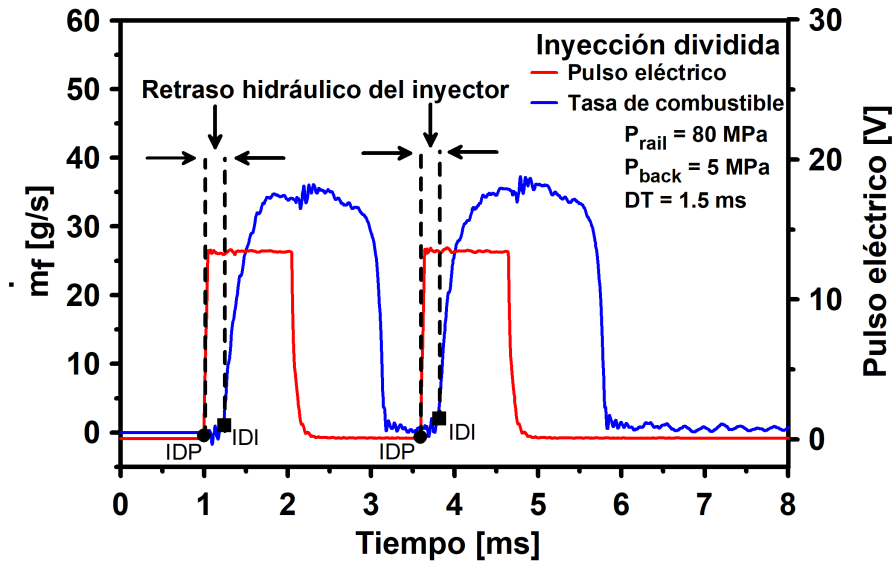


Figura 4.13: Esquema del retraso hidráulico, evoluciones temporales del flujo másico y del pulso eléctrico, en una estrategia de inyección dividida.

El **coeficiente de descarga** [ - ] corresponde a la razón entre la tasa de combustible inyectado obtenida de forma experimental, y la tasa de combustible inyectado teórica esperada. Este valor se obtuvo a partir de la Ecuación 4.4, donde se puede observar que la tasa experimental corresponde a la tasa promedio, la cual se calculó en la inyección simple con el tiempo de energización más largo (2.7 ms) para los niveles de presión de 80, 100 y 120 MPa, ya que bajo estas condiciones de operación se tiene una señal de flujo másico, con una zona estacionaria, a partir de la cual se puede obtener un valor robusto de caudal másico.

$$C_d = \frac{Tasa_{exp}}{Tasa_{teo}} = \frac{Tasa\ promedio}{A\sqrt{2\rho\Delta p}} \quad (4.4)$$

donde:

$A$  = Área de la sección de salida de los orificios de la tobera

$\rho$  = Densidad del combustible

$\Delta p = p_{rail} - p_{back}$

Para obtener la tasa promedio de cada nivel de presión se aplicó la metodología de Salvador et al. [56], mostrada de forma esquemática en la Figura 4.14, y descrita a continuación:

1. Se obtiene el valor máximo del flujo másico de combustible.
2. Se determina la zona estacionaria como todos los puntos que se encuentran por encima del 95 % del máximo del flujo másico de combustible.
3. Se promedian todos estos puntos y el valor resultante corresponde a la tasa de combustible promedio.

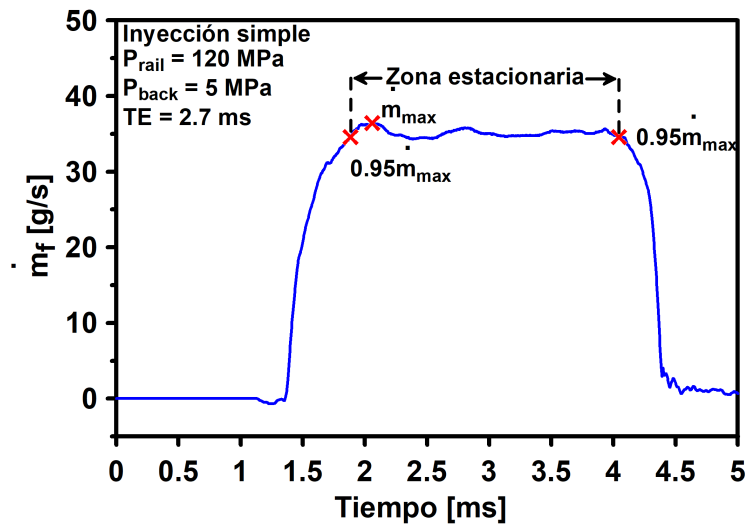


Figura 4.14: Esquema de la metodología para determinar la tasa de combustible promedio en una inyección simple con presión de inyección de 120 MPa,  $p_{\text{back}}$  de 5 MPa y TE de 2.7 ms.

## CAPÍTULO 5

# RESULTADOS

---

En la presente sección se muestra los resultados correspondientes a la tasa de flujo másico promedio y teórica, así como el coeficiente de descarga correspondiente al inyector diésel solenoide y piezoeléctrico. También se muestra el retraso hidráulico de apertura y el retraso hidráulico de cierre de la aguja del inyector, tanto para el primero, como para el segundo evento de inyección de las inyecciones piloto, dividida y post-inyección. Por último, se analiza la masa de combustible inyectada y se normaliza respecto a la masa de referencia de una inyección simple para las estrategias e inyectores antes mencionados.

## 5.1 COEFICIENTE DE DESCARGA

El  $C_d$  se obtuvo a partir de la tasa de combustible promedio (obtenida a partir de la inyección simple con una duración larga del tiempo de energización) y la tasa de combustible teórica, cuyos valores obtenidos se muestran en la Tabla 5.1, Adicionalmente, este parámetro se obtuvo para los valores de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, y  $p_{back} = 5$  MPa, y para los inyectores diésel tipo solenoide y piezoeléctrico.

Inyector diésel	$p_{rail}$ [MPa]	$p_{back}$ [MPa]	$\dot{m}_{prom}$ [g/s]	$\dot{m}_{teo}$ [g/s]	$D_{out}$ [ $\mu m$ ]
Solenoide	80		3.826	4.522	
	100	5	4.464	5.09	$128 \pm 12$
	120		5.033	5.6	
Piezoeléctrico	80		4.942	5.410	
	100	5	5.683	6.089	$140 \pm 12$
	120		6.402	6.699	

Tabla 5.1: Valores de tasa de combustible promedio, y teórico para los niveles de  $p_{rail}$  de 80, 100, y 120 MPa en un inyector diésel tipo solenoide y piezoeléctrico.

En la Figura 5.1, se muestra el coeficiente de descarga ( $C_d$ ) de ambos inyectores para los valores de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa con una  $p_{back} = 5$  MPa. En esta figura se observa que el  $C_d$  se incrementa conforme aumenta la presión de inyección en ambos inyectores, tal y como lo reporta Payri et. al. [15], en su estudio sobre la influencia del envejecimiento de un inyector diésel empleando estrategias de inyección múltiple. El  $C_d$  en el inyector diésel solenoide es menor en un 7.975 %, 6.419 % y 6.329 % para los valores de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa respectivamente, evidenciando una mayor fiabilidad.

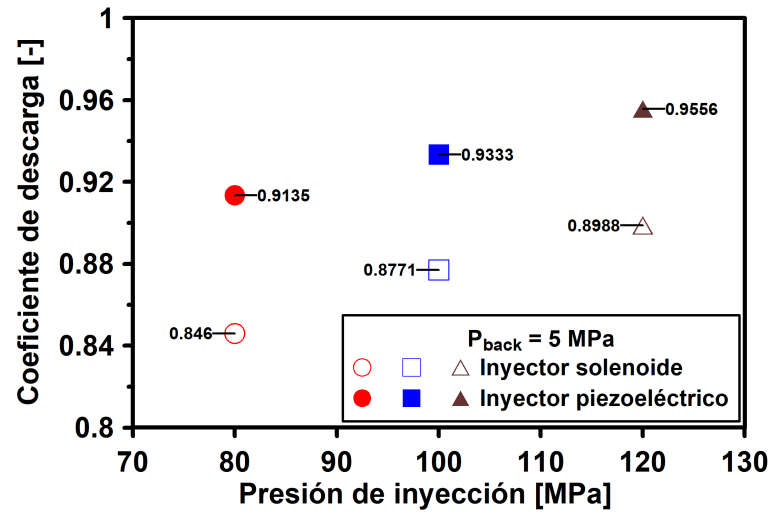


Figura 5.1: Coeficiente de descarga respecto a la  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa y  $p_{back} = 5$  MPa de un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico.



## 5.2 RETRASO HIDRÁULICO

### 5.2.1 RETRASO HIDRÁULICO EN EL INYECTOR DIÉSEL SOLENOIDE

#### 5.2.1.1 RETRASO HIDRÁULICO DE APERTURA Y CIERRE DEL PRIMER EVENTO DE INYECCIÓN

En la Figura 5.2, se muestra el comportamiento del retraso hidráulico de apertura y cierre de la aguja de un inyector diésel solenoide versus el DT de la primera inyección para una  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa y una  $p_{back} = 5$  MPa para las inyecciones múltiple piloto, dividida y post-inyección. En esta figura se puede observar que tanto el retraso hidráulico de apertura como el de cierre decrecen en las tres estrategias de inyección empeladas conforme se incrementa la presión de inyección, tal como lo observó en la estrategia de inyección dividida, Alhohani et. al. [37], en su estudio de medición de la tasa de inyección in situ para estudiar inyecciones simples y divididas en un motor diésel de servicio pesado.

#### 5.2.1.2 RETRASO HIDRÁULICO DE APERTURA Y CIERRE EN EL SEGUNDO EVENTO DE INYECCIÓN

En la Figura 5.3, se observa el comportamiento del retraso hidráulico de apertura y cierre de la aguja del inyector diésel solenoide, correspondiente al segundo evento de inyección versus el DT para los valores de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back} = 5$  MPa, y para la estrategia de inyección piloto. En la Figura 5.3(a), se observa que el retraso hidráulico de apertura de la aguja registra sus valores mínimos para el DT de 0.55 ms con valores de 0.27 ms, 0.3 ms y 0.3 ms y

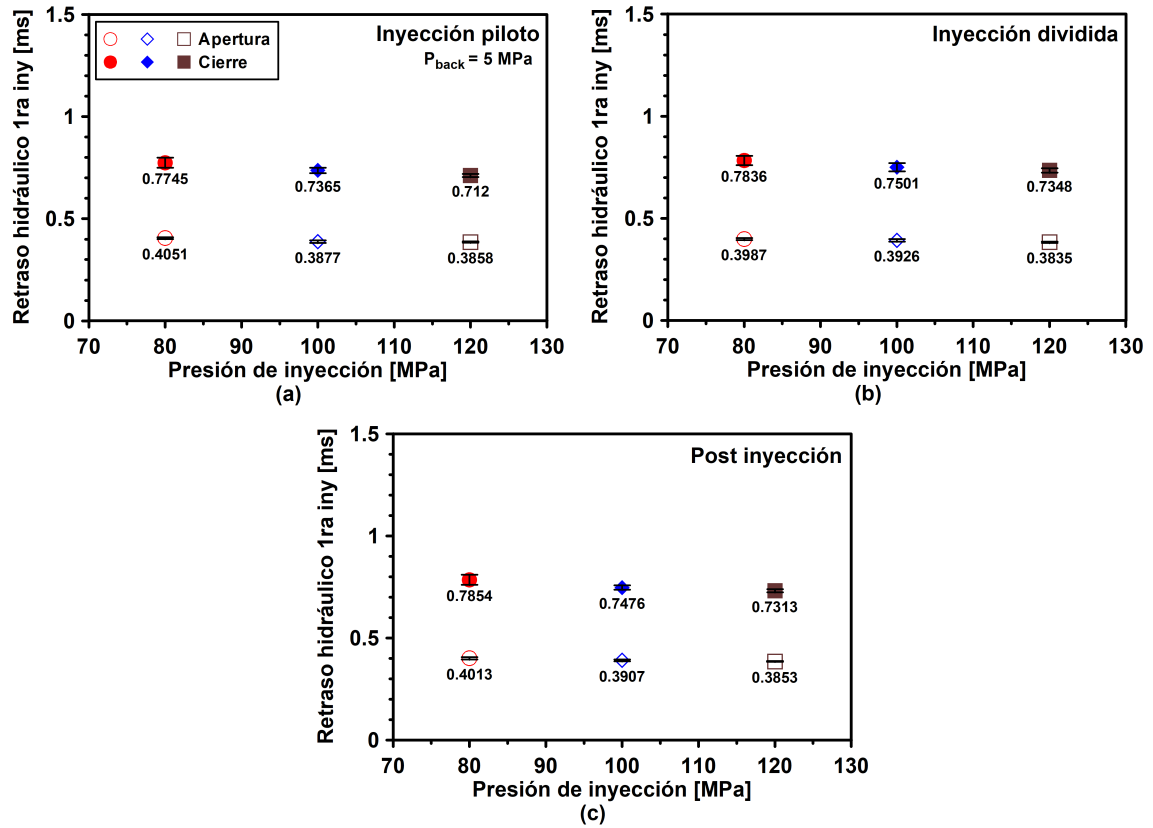


Figura 5.2: Comportamiento del retraso hidráulico de apertura y cierre de la primera inyección de un inyector diésel solenoide versus el DT para una  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa y  $p_{back} = 5$  MPa, y para las estrategias de inyección (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección.

máximos de 0.43 ms, 0.44 ms y 0.41 ms para el DT de 0.9 ms, y para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Por otro lado, en la Figura 5.3(b), se observa que el retraso hidráulico de cierre para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa varía muy poco, alrededor del valor de 0.79 ms, 0.75 ms y 0.74 ms, respectivamente.

En la Figura 5.4, se muestra el retraso hidráulico de apertura y cierre del segundo evento de inyección versus el DT para los valores de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back} = 5$  MPa para la estrategia de inyección dividida del inyector diésel tipo solenoide. En la Figura 5.4(a), se observa que el retraso hidráulico de apertura de la aguja registra sus valores mínimos de 0.25 ms, 0.25 ms y 0.28 ms

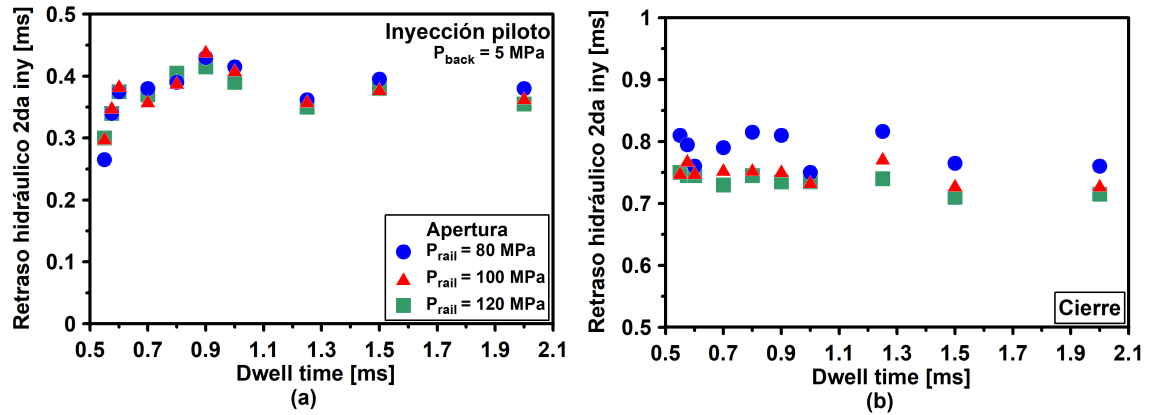


Figura 5.3: Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back} = 5$  MPa, y para la estrategia de inyección piloto en la (a) apertura y (b) cierre de la aguja de un inyector diésel solenoide.

para el DT de 0.55 ms y máximos de 0.44 ms, 0.45 ms y 0.42 ms para el DT de 0.9 ms, para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Mientras tanto, en la Figura 5.4(b), se observa que el retraso hidráulico de cierre para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa varía muy poco, alrededor del valor de 0.79 ms, 0.75 ms y 0.73 ms, respectivamente.

En la Figura 5.5, se muestra el retraso hidráulico de apertura y cierre del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa para la estrategia de post-inyección del inyector diésel solenoide. En la Figura 5.5(a), se observa que el retraso hidráulico de apertura de la aguja registra sus valores mínimos de 0.27 ms, 0.29 ms y 0.28 ms para el DT de 0.55 ms y máximos de 0.45 ms, 0.43 ms y 0.42 ms para el DT de 0.9 ms para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa respectivamente. En la Figura 5.5(b), se observa que el retraso hidráulico de cierre para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa varía muy poco, alrededor del valor de 0.78 ms, 0.73 ms y 0.71 ms, respectivamente.

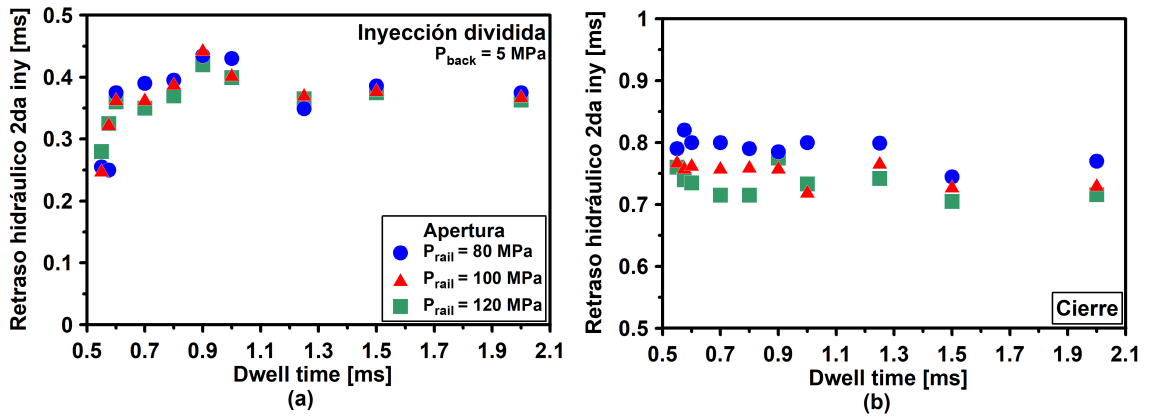


Figura 5.4: Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa para la estrategia de inyección dividida en la (a) apertura y (b) cierre de un inyector diésel solenoide.

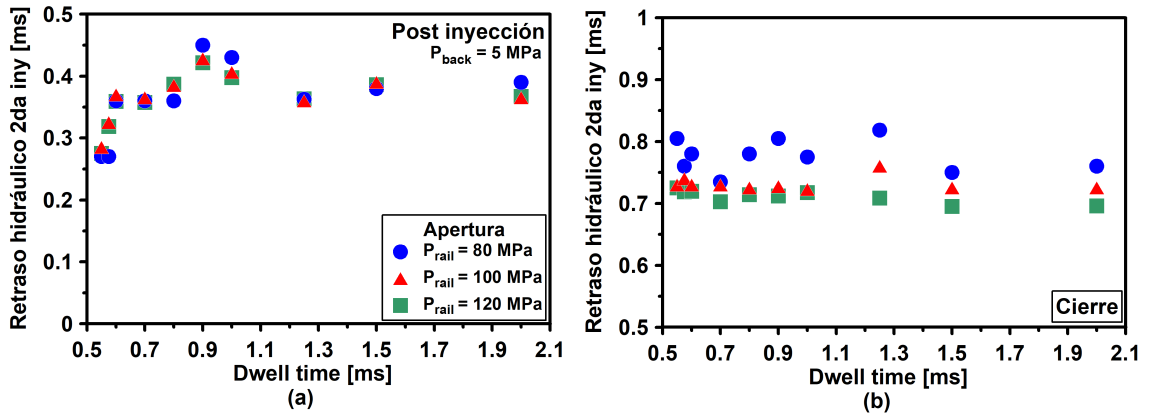


Figura 5.5: Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para una presión de inyección de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con  $p_{back} = 5$  MPa para la estrategia de post inyección en la (a) apertura y (b) cierre de un inyector diésel solenoide.

En general, se observa que el retraso hidráulico de apertura del segundo evento de inyección en las inyecciones piloto, dividida y de post-inyección aumenta desde el DT de 0.55 ms hasta el DT de 0.9 ms y después de este valor el retraso hidráulico decrece para los tres niveles de  $p_{rail}$ . El valor mínimo alcanzado de retraso hidráulico de apertura se debe a que dentro del saco del inyector y el volumen de control se generan y propagan ondas de presión durante el primer evento de inyección [57, 14], y conforme aumenta el DT disminuye la propagación de las ondas de presión debido a que se reduce el efecto dinámico de la aguja del inyector, y consecuencia aumenta el retraso hidráulico hasta su valor máximo. Después de este valor, el retraso hidráulico disminuye por las ondas de presión reflejadas aguas abajo de la tobera del inyector diésel solenoide. De todo lo anterior se concluye que el retraso hidráulico de apertura de la segunda inyección no depende de la masa de combustible inyectada durante el primer evento de inyección pero si del DT empelado. Por otro lado, el retraso hidráulico al cierre del segundo evento de inyección depende de la presión de inyección y no del DT.

## 5.2.2 RETRASO HIDRÁULICO EN EL INYECTOR DIÉSEL PIEZOELÉCTRICO

### 5.2.2.1 RETRASO HIDRÁULICO DE APERTURA Y CIERRE DEL PRIMER EVENTO DE INYECCIÓN

En la Figura 5.6, se muestra el comportamiento del retraso hidráulico de apertura y cierre del inyector diésel piezoeléctrico versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa y una  $p_{back}$  de 5 MPa y para las estrategias de inyección múltiple piloto, dividida y post-inyección. Por otro lado, en esta figura se puede ver que el valor del retraso hidráulico de apertura es de 0.22 ms para las tres estrategias de inyección, es decir, el retraso hidráulico no es afectado por la presión de inyección. Por otro lado, el retraso hidráulico al cierre se ve afectado por la presión de inyección, de tal forma que decrece conforme aumenta la presión de inyección en cada una de las estrategias de inyección empleadas, y aumenta conforme se incrementa la duración del TE del primer evento de inyección, tal y como lo observó Armas et al. [58], en su estudio sobre un método alternativo para la estimación del módulo de volumen de los combustibles diésel. Este comportamiento puede ser explicado por el efecto de la presión con que el combustible es inyectado sobre la dinámica de la aguja del inyector.

### 5.2.2.2 RETRASO HIDRÁULICO DE APERTURA Y CIERRE EN EL SEGUNDO EVENTO DE INYECCIÓN

En la Figura 5.7, se muestra el comportamiento del retraso hidráulico de apertura y cierre del inyector diésel piezoeléctrico versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa para la estrategia de inyección piloto en un inyector diésel piezoeléctrico. En la Figura 5.7(a), se observa que el retraso hidráulico de apertura para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa

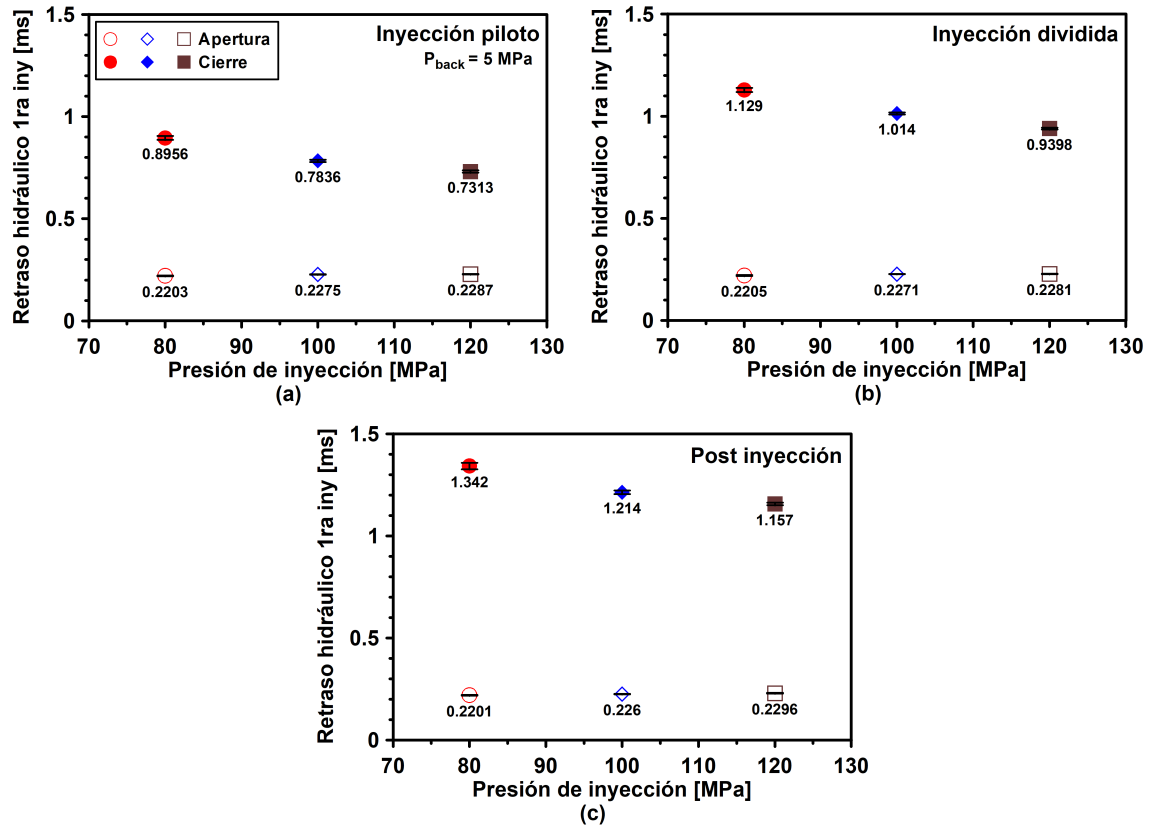


Figura 5.6: Retraso hidráulico de apertura y cierre de un inyector diésel piezoeléctrico correspondiente al primer evento de inyección versus la presión de inyección, empleando una  $p_{back}$  de 5 MPa para las estrategias de inyección (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección.

es del orden de 0.2 ms. Éste valor es del mismo orden al observado durante el primer evento de de inyección. Por lo tanto, podemos concluir que el retraso hidráulico de apertura no se ve afectado por el DT. Por otro lado, en la Figura 5.7(b), se observa que conforme se aumenta la  $p_{rail}$ , disminuye el retraso hidráulico. También se puede ver que el retraso hidráulico para el nivel de  $p_{rail}$  de 80 MPa crece desde el DT = 1.15 ms hasta alcanzar su valor máximo de 1.41 ms en el DT = 1.3 ms, a partir de este punto decrece hasta su valor mínimo de 1.29 ms para el DT de 1.7 ms. En cuanto al nivel de  $p_{rail}$  de 100 MPa, el mayor retraso hidráulico se registra para el DT de 1.15 ms con un valor de 1.28 ms, y a partir de este punto decrece hasta su valor mínimo de 1.16 ms para el DT = 1.5 ms. Mientras tanto, para el nivel de  $p_{rail}$  de 120 MPa

el retraso hidráulico máximo es de 1.2 ms para el DT de 1.15 ms, a partir de este punto decrece hasta su valor mínimo de 1.09 ms para el DT = 1.4 ms. Este efecto se puede atribuir a la diferencias de presión presentes en volumen de control mostrado por Salvador et. al. [59]. En general, para los tres niveles de  $p_{rail}$  en el rango de DT de 1.7 ms a 3 ms los valores del retraso hidráulico son del orden de 1.34 ms, y 1.21 ms y 1.32 ms para los 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Hay que destacar que la duración de la energización del elemento piezoeléctrico durante la apertura del inyector para los tres niveles de  $p_{rail}$  fue de 0.05 ms, mientras que la desenergización durante el cierre fue de 0.11 ms.

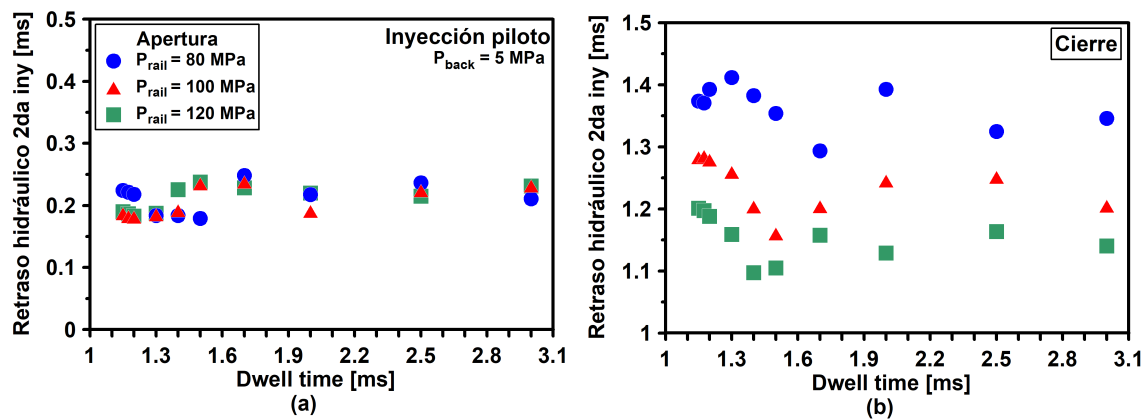


Figura 5.7: Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa, y para la estrategia de inyección piloto en la (a) apertura y (b) cierre de la aguja de un inyector diésel piezoeléctrico.

En la Figura 5.8, se muestra el retraso hidráulico de apertura y cierre del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa para la estrategia de inyección dividida en un inyector diésel piezoeléctrico. En la Figura 5.8(a), se observa que al igual que la estrategia de inyección piloto, el retraso hidráulico de apertura para los tres niveles de  $p_{rail}$  es del orden de 0.2 ms, además de que no se observa efecto del DT. Por otro lado, en la Figura 5.8(b), se observa que el retraso hidráulico al cierre crece en el intervalo de DT de 1.15 ms a 1.7 ms, donde para el nivel de  $p_{rail}$  de 80 MPa el valor



mínimo de retraso hidráulico es de 1.06 ms y máximo de 1.18 ms. Con respecto al nivel de  $p_{rail}$  de 100 MPa, el valor mínimo del retraso hidráulico es de 0.97 ms y el máximo de 1.07 ms, mientras que para el nivel de  $p_{rail}$  de 120 MPa el valor mínimo es de 0.9 ms y máximo es de 0.99 ms. Por otro lado, en el intervalo de 1.7 ms a 2 ms de DT, el retraso hidráulico para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, es del orden de 1.15 ms, 1 ms y 0.94 ms, respectivamente. En esta figura también se observa que conforme se incrementa el nivel de  $p_{rail}$  el retraso hidráulico disminuye

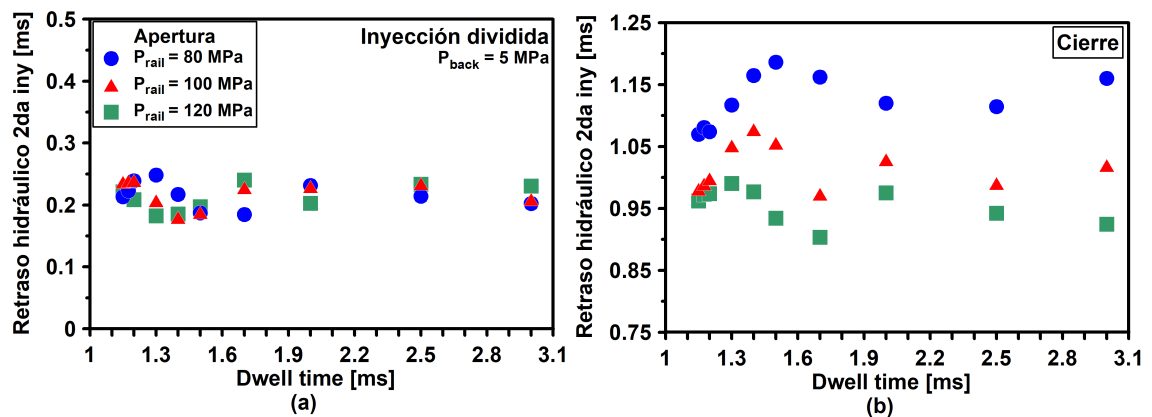


Figura 5.8: Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa para la estrategia de inyección dividida en la (a) apertura y (b) cierre de un inyector diésel piezoeléctrico.

En la Figura 5.9, se muestra el retraso hidráulico de apertura y cierre del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa, para la estrategia de post-inyección en un inyector diésel piezoeléctrico. En la Figura 5.9(a), se observa que el retraso hidráulico de apertura de los niveles de  $p_{rail}$  de 100 MPa y 120 MPa, es del orden de 0.2 ms, tal y como se observó en las estrategias de inyección piloto y dividida. En cambio, para el nivel de  $p_{rail}$  de 80 MPa se observa una clara tendencia ascendente en el intervalo de  $1.15 \text{ ms} \leq DT \leq 1.5 \text{ ms}$ , registrando un retraso hidráulico de apertura mínimo del orden de 0.098 ms y máximo de 0.249 ms. Este comportamiento particular puede

ser explicado por el efecto de las ondas de presión resultantes del primer evento de inyección sobre el segundo [53]. Por otro lado, en la Figura 5.9(b), se observa que el retraso hidráulico máximo al cierre para el nivel de  $p_{rail}$  de 80 MPa es de 1.07 ms para el DT de 1.15 ms y a partir de este valor decrece hasta alcanzar su valor mínimo de 0.84 ms para el DT de 1.4 ms. En cuanto al nivel de  $p_{rail}$  de 100 MPa, el menor retraso hidráulico es del orden de 0.73 ms para el DT de 1.2 ms, y a partir de este punto crece hasta su valor máximo de 0.83 ms para el DT de 1.5 ms. Mientras tanto, para el nivel de  $p_{rail}$  de 120 MPa, se observa que el retraso hidráulico mínimo es de 0.69 para el DT de 1.15 ms, a partir de este punto crece hasta su valor máximo de 0.81 ms para el DT de 1.5 ms. Además, se observa que en el intervalo de 1.5 ms a 3 ms de DT el retraso hidráulico es del orden de 0.9 ms, 0.8 ms y 0.76 ms, para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Al igual que en las estrategias de inyección piloto y divididas, se observa que conforme aumenta el nivel de  $p_{rail}$  disminuye el retraso hidráulico. En la Figura 5.9, se observa que un retraso hidráulico al cierre alto, es consecuencia de un retraso hidráulico de apertura bajo, esto puede ser explicado por la naturaleza transitoria de los eventos de inyección, ya que la aguja del inyector no se encuentra a pleno levantamiento [37]. Por lo tanto, durante la apertura donde se involucran retrasos hidráulicos pequeños, el inyector adquiere una mayor cantidad de movimiento, y en consecuencia se requiere un mayor trabajo para frenar la aguja del inyector durante el cierre [60].

En general, se observa que el retraso hidráulico de apertura del segundo evento de inyección en las estrategias de inyección piloto, dividido y de post-inyección no se ve afectado por el valor del DT, a excepción del nivel de  $p_{rail}$  de 80 MPa en la estrategia de post-inyección, que corresponde a inyecciones estrechamente acopladas para sus valores de DT más pequeños, y por lo tanto, influenciada por el primer evento de inyección, debido al efecto de las ondas de presión dentro del saco del inyector y volumen de control, por otro lado este efecto disminuye conforme aumenta el nivel de  $p_{rail}$  [14]. Además, el retraso hidráulico de cierre del segundo evento de inyección en las estrategias de inyección piloto, dividido y de post-inyección se ve

afectado por el valor del DT y el nivel de  $p_{rail}$ , de tal forma que el retraso hidráulico de cierre disminuye conforme el nivel de  $p_{rail}$  aumenta. Más aún, se observa que para los valores de DT donde el retraso hidráulico de apertura es mínimo, su retraso hidráulico de cierre es máximo y viceversa.

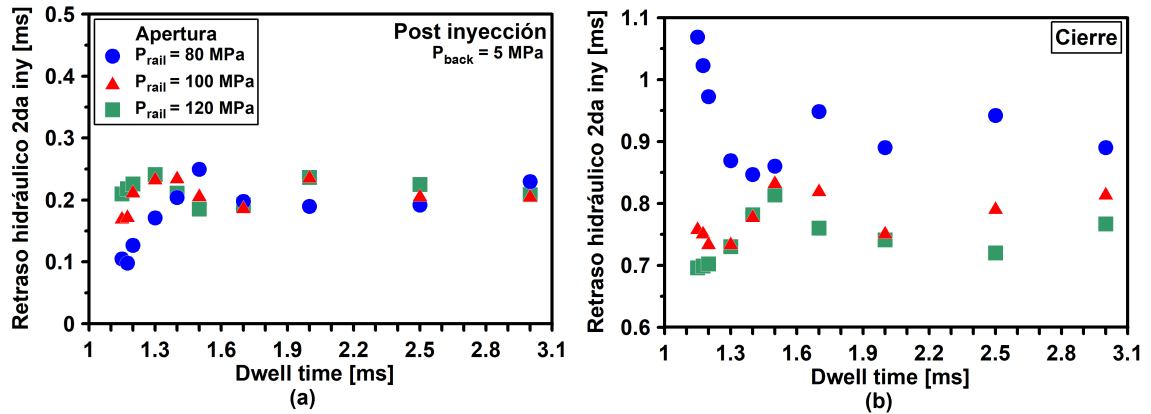


Figura 5.9: Retraso hidráulico del segundo evento de inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa para la estrategia de post-inyección en la (a) apertura y (b) cierre de la aguja de un inyector diésel piezoeléctrico.

## 5.3 MASA DE COMBUSTIBLE INYECTADA

### 5.3.1 MASA DE COMBUSTIBLE INYECTADA POR EL INYECTOR DIÉSEL SOLENOIDE

#### 5.3.1.1 MASA DE COMBUSTIBLE INYECTADA DURANTE EL PRIMER EVENTO DE INYECCIÓN

En la Figura 5.10, se muestra la masa de combustible inyectada por un inyector diésel solenoide durante el primer evento de inyección de las estrategias de inyección piloto, dividida y post-inyección respecto a los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, así como la desviación estándar obtenida para cada estrategia de inyección a partir de los 10 valores de la masa obtenida para los valores de DT analizados. En la Figura 5.10(a), se observa que la masa de combustible inyectada al emplear la estrategia de inyección piloto, tiene una dispersión muy pequeña, con valores promedio de 40.53 mg, 40.31 mg y 40.64 mg para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Por otro lado, en la Figura 5.10(b), correspondiente a la estrategia de inyección dividida, también se observa una dispersión muy pequeña, donde sus valores promedio de masa inyectada son de 55.87 mg, 55.6 mg y 56 mg, para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Por último, en la Figura 5.10(c), correspondiente a la estrategia de post-inyección también se observa una dispersión mayor en comparación al de las estrategias de inyección piloto y dividida, aunque sigue siendo muy pequeña, donde sus valores promedio de masa inyectada son de 70.96 mg, 70.02 mg y 70.4 mg, para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Esto último se debe a que la masa del primer evento de inyección en la estrategia de post-inyección es mayor que la de las estrategias de inyección piloto y dividida. En general, no se observa un efecto del nivel de  $p_{rail}$  sobre la masa de combustible inyectada durante

el primer evento de inyección.

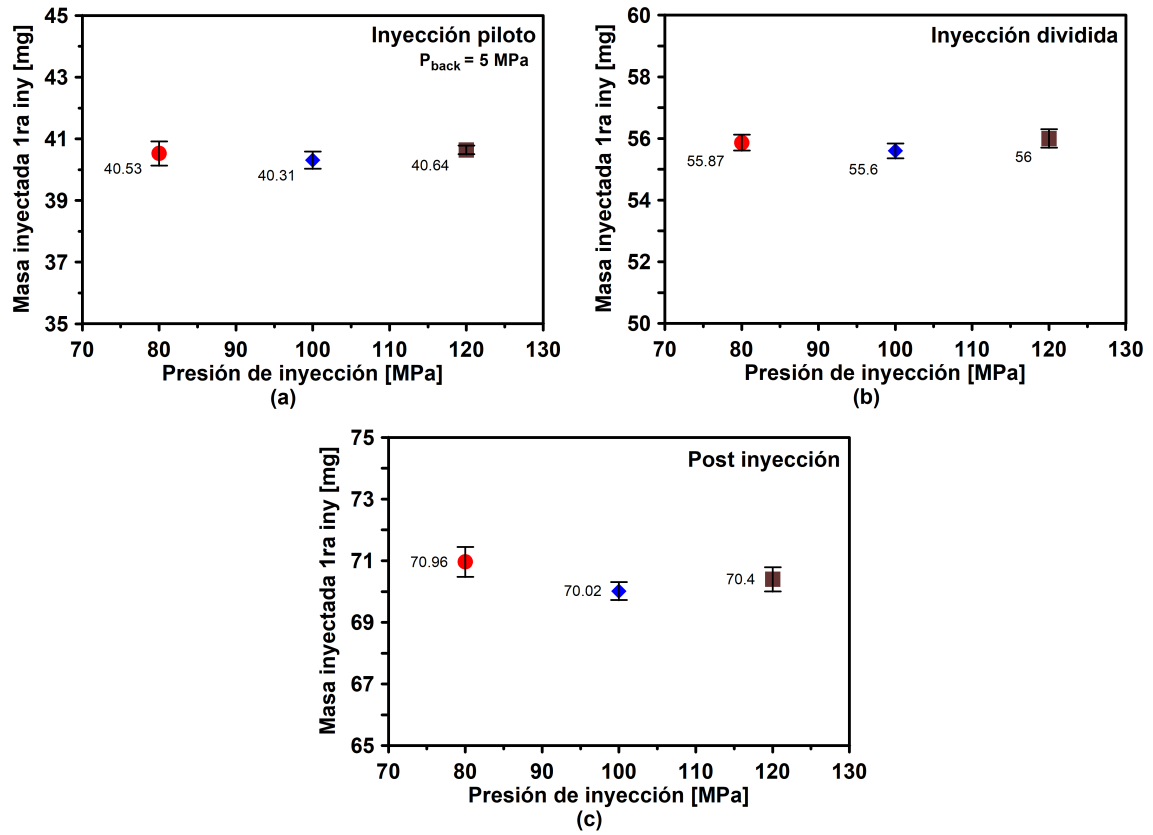


Figura 5.10: Masa de combustible inyectada durante el primer evento de inyección en un inyector diésel solenoide respecto a la presión de inyección, con una  $p_{back}$  de 5 MPa, y para las estrategias de inyección (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección.

### 5.3.1.2 MASA DE COMBUSTIBLE INYECTADA DURANTE EL SEGUNDO EVENTO DE INYECCIÓN

En la Figura 5.11, se muestra la masa de combustible inyectada por un inyector diésel solenoide durante el segundo evento de inyección al emplear la estrategia de inyección piloto versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, y con una  $p_{back}$  de 5 MPa, así como la masa de combustible inyectada normalizada respecto a su valor correspondiente de una inyección simple. En la Figura 5.11(a), se observa en todos los niveles de  $p_{rail}$  estudiados que la masa de combustible inyectada

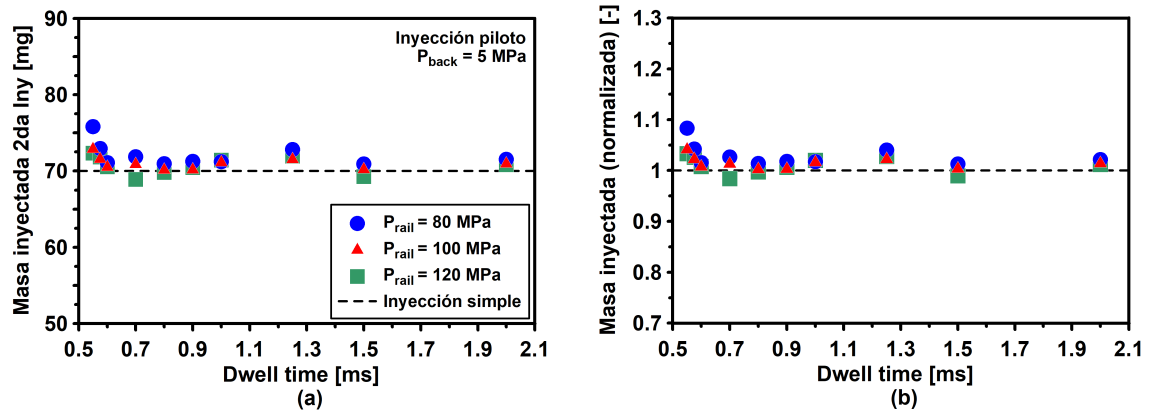


Figura 5.11: (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección piloto en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple.

aumenta para valores de DT menores a 0.6 ms; mientras que para valores de DT mayores a 0.6 ms la masa de combustible inyectado tiende a estabilizarse en el valor esperado de 70 mg. Por otro lado, en la Figura 5.11(b), se observa que para el valor de DT de 0.55 ms se obtiene el valor máximo de masa de combustible inyectada que supera su correspondiente valor de referencia de una inyección simple en 8.3 %, 4.1 % y 3.3 % para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente.

En la Figura 5.12, se muestra la masa de combustible inyectada versus el DT durante el segundo evento de inyección al emplear la estrategia de inyección dividida para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, con una  $p_{back}$  de 5 MPa, y la masa de combustible inyectada normalizada respecto a una inyección simple. En la Figura 5.12(a), al igual que en la inyección piloto, se observa que la masa de combustible inyectada aumenta en todos los niveles de  $p_{rail}$  estudiados para valores de DT menores a 0.6 ms, mientras que para valores de DT mayores a 0.6 ms la masa de combustible inyectado tiende a estabilizarse en el valor esperado de 55 mg. Por otra parte, en la Figura 5.12(b), se observa que el valor máximo de masa de combustible inyectada se obtiene para el valor de DT de 0.55 ms y supera su correspondiente valor de referencia de una inyección simple en 12.4 %, 9.2 % y 8.9 %

para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente.

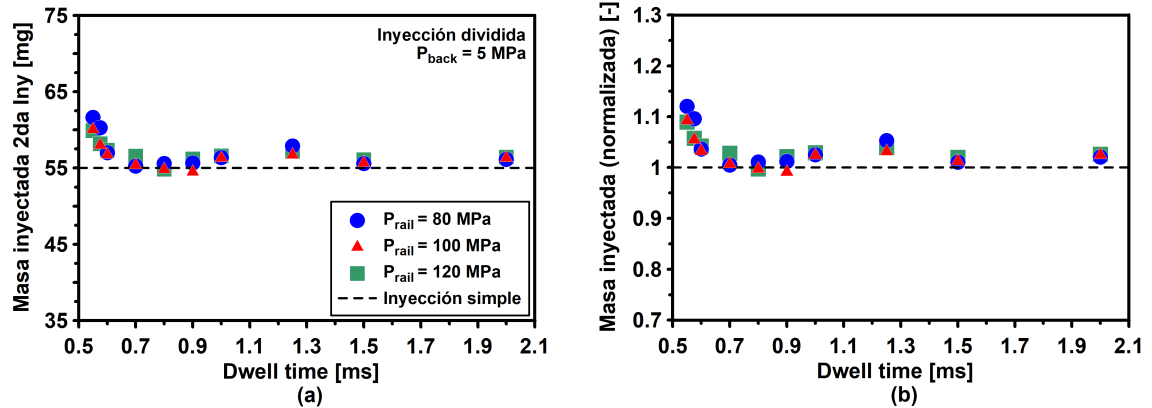


Figura 5.12: (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección dividida en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple.

En la Figura 5.13, se muestra la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de post-inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  y  $p_{back}$  estudiados, así como la masa de combustible normalizada respecto a una inyección simple. En la Figura 5.13(a), se observa que al igual que en las estrategias de inyección piloto y dividida, la masa de combustible inyectada aumenta para valores de DT menores a 0.6 ms, para todos los niveles de  $p_{rail}$  empleados, mientras que para valores de DT mayores a 0.6 ms la masa de combustible se estabiliza en el valor de 40 mg. Por otro lado, en la Figura 5.13(b), también se observa que el valor máximo de masa de combustible inyectada corresponde al valor de DT de 0.55 ms y supera a su valor de referencia de una inyección simple en 14.8%, 8.2% y 10.1% para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente.

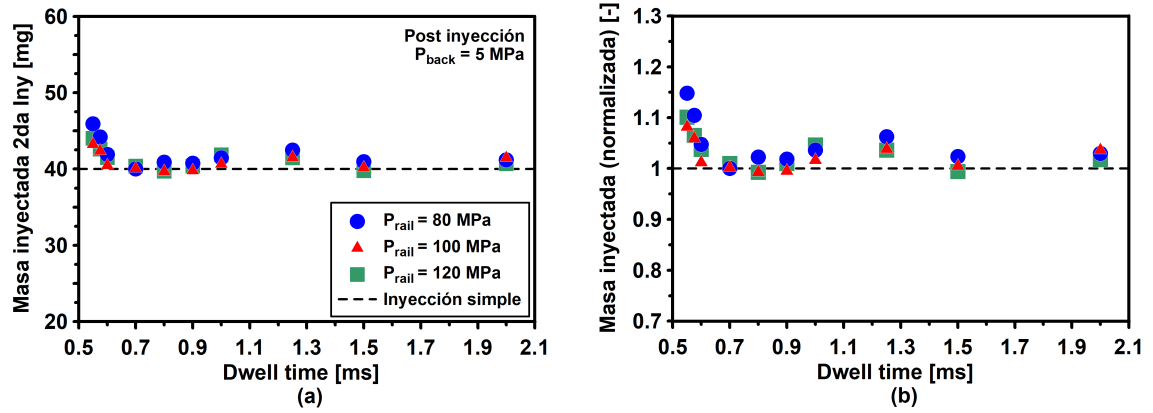


Figura 5.13: (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de post-inyección en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple.

En general, se puede concluir que el comportamiento observado de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección en las estrategias de inyección múltiple piloto, dividida y post-inyección, se puede explicar por las ondas de presión generadas en la región de asiento de la aguja dentro del inyector diésel solenoide, al cierre de la aguja del primer evento de inyección [57]. Por otro lado, este efecto disminuye considerablemente para los valores de DT mayores a 0.6 ms, mostrando un comportamiento oscilatorio.



### 5.3.2 MASA DE COMBUSTIBLE INYECTADA POR EL INYECTOR DIÉSEL PIEZOELÉCTRICO

#### 5.3.2.1 MASA DE COMBUSTIBLE INYECTADA DURANTE EL PRIMER EVENTO DE INYECCIÓN

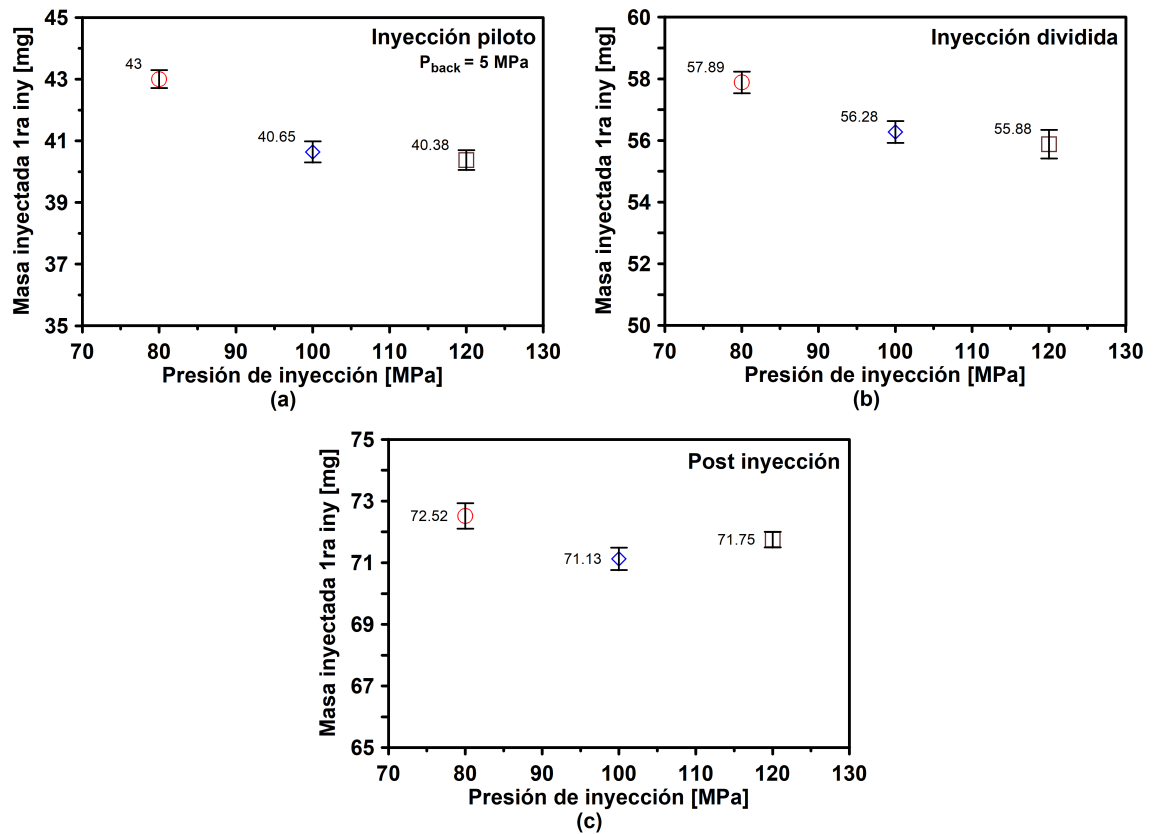


Figura 5.14: Masa de combustible inyectada durante el primer evento de inyección de un inyector diésel piezoeléctrico respecto a la presión de inyección, con una  $p_{back}$  de 5 MPa, y para las estrategias de inyección (a) piloto, (b) dividida y (c) post-inyección.

En la Figura 5.14, se muestra la masa de combustible inyectada por un inyector diésel piezoeléctrico durante el primer evento de inyección de las estrategias de inyección piloto, dividida y post-inyección en función de los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, así como la desviación estándar de los 10 valores de la masa obtenida. En la Figura 5.14(a), se observa que la masa de combustible inyectada

al emplear la estrategia de inyección piloto tiene una dispersión muy pequeña, con valores promedio de 43 mg, 40.65 mg y 40.36 mg para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. En la Figura 5.14(b), correspondiente a la estrategia de inyección dividida, también se observa una dispersión muy pequeña, donde sus valores promedio de masa inyectada son de 57.89 mg, 56.28 mg y 55.88 mg para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa respectivamente. En la Figura 5.14(c), correspondiente a la estrategia de post-inyección, se observa una dispersión mayor en comparación con las estrategias de inyección piloto y dividida, donde sus valores promedio de masa inyectada son de 72.52 mg, 71.13 mg y 71.75 mg para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Esto último, se puede atribuir a que durante este evento de inyección se inyecta una mayor masa de combustible respecto a las estrategias de inyección piloto y dividida. Por otro lado, también se observa que conforme se incrementa la  $p_{rail}$ , la masa de combustible inyectada disminuye.

### 5.3.2.2 MASA DE COMBUSTIBLE INYECTADA DURANTE EL SEGUNDO EVENTO DE INYECCIÓN

En la Figura 5.15, se muestra la masa de combustible inyectada por un inyector diésel piezoeléctrico durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección piloto versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, y una  $p_{back}$  de 5 MPa, así como la misma masa de combustible inyectada normalizada respecto a una inyección simple. En la Figura 5.15(a), se observa que no coinciden los máximos y mínimos en los niveles de presión respecto a un valor de DT a causa de las variaciones de presión generadas durante el primer evento de inyección [61], por lo tanto, para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa los valores máximos de masa de combustible inyectada corresponden a los DT de 1.3 ms, 1.175 ms y 1.175 ms, respectivamente. También se observa que conforme aumenta el valor del DT la masa de combustible inyectado tiende a estabilizarse en el valor esperado

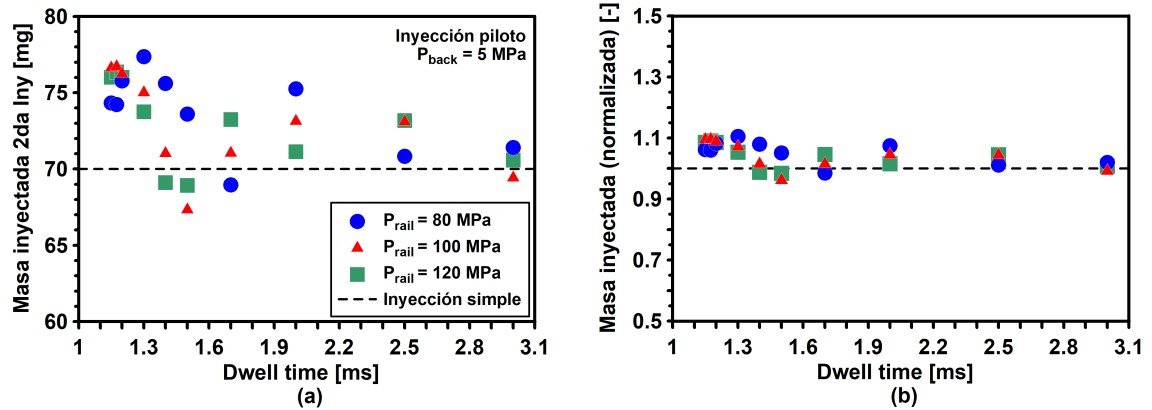


Figura 5.15: (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección piloto en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple.

de 70 mg. Con respecto a la Figura 5.15(b), se deduce que los valores máximos de masa de combustible obtenida superan a la masa de referencia en un 10.5 %, 9.6 % y 9 % a para los niveles de presión de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente.

En la Figura 5.16, se muestra la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección dividida versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, y una  $p_{back}$  de 5 MPa, así como la masa de combustible normalizada respecto a una inyección simple. En la Figura 5.16(a), también se observa que no coinciden los máximos y mínimos de los niveles de presión respecto a un valor del DT debido a la presión de inyección, en consecuencia para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, los valores máximos de masa de combustible inyectada corresponden a los DT de 1.5 ms, 1.4 ms y 1.3 ms, respectivamente. Al igual que en la estrategia de inyección piloto, se observa que conforme aumenta el valor del DT la masa de combustible inyectado tiende a estabilizarse en el valor esperado de 55 mg. De la Figura 5.16(b), se deduce que los valores máximos de masa de combustible obtenida superan a la masa de referencia en un 12 %, 11 % y 10 % para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Cabe destacar en esta estrategia, que la masa de combustible

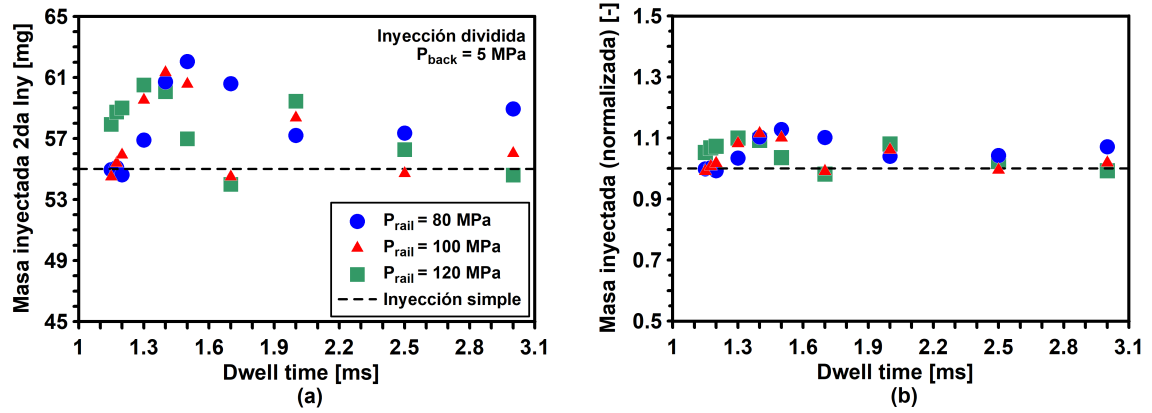


Figura 5.16: (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de inyección dividida en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple.

inyectada durante el primer evento de inyección fue mayor respecto a la inyección piloto, provocando un incremento en la intensidad de las ondas de presión generadas en este evento [12], reflejándose en un mayor porcentaje de masa de combustible inyectada en el segundo evento de inyección [53].

En la Figura 5.17, se muestra la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de post-inyección versus el DT para los niveles de  $p_{rail}$  y  $p_{back}$  estudiados, así como la misma masa de combustible normalizada con respecto a la masa de combustible de una inyección simple. En la Figura 5.17(a), se vuelve a observar el desfase conforme aumenta la presión de inyección, de tal forma que no coinciden los máximos y mínimos de los niveles de presión respecto a un valor del DT, por lo tanto, para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, los valores máximos de masa de combustible inyectada corresponden a los DT de 1.15 ms, 1.5 ms y 1.5 ms, respectivamente. Al igual que en las estrategias de inyección piloto y dividida, se observa que conforme aumenta el valor del DT la masa de combustible inyectado tiende a estabilizarse en el valor esperado de 40 mg. De la Figura 5.17(b), se deduce que los valores máximos de masa de combustible obtenida superan a la masa de referencia en un 38.4 %, 10.1 % y 16.5 % para los niveles de  $p_{rail}$

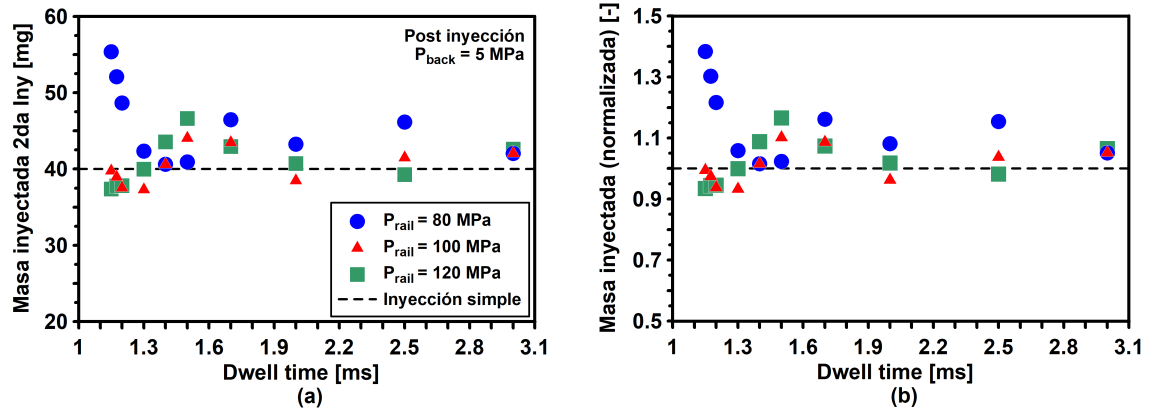


Figura 5.17: (a) Comportamiento de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de la estrategia de post-inyección en función del DT. (b) El valor de la segunda masa inyectada ha sido normalizada por el correspondiente valor de la masa inyectada en el evento de inyección simple.

de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. El incremento observado de la masa de combustible inyectada en el nivel de  $p_{rail}$  de 80 MPa se debe al solapamiento entre el primer y segundo evento de inyección presente en esta estrategia [15], que provoco un aumento en el retraso hidráulico al cierre del inyector, observado en la Figura 5.9.

En general, se puede concluir que el comportamiento observado de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección de las estrategias de inyección múltiple de un inyector diésel piezoeléctrico se puede explicar por la influencia del primer evento de inyección, esto es, mientras más largo sea el primer evento de inyección más combustible se inyectará en el segundo evento de inyección para DT pequeños [12], ya que el inyector sigue abierto y suministrando combustible cuando se le da la señal de apertura del segundo evento de inyección, tal y como se observa para en las tres estrategias de inyección empleadas. Además, las oscilaciones de masa de combustible inyectada se deben a las oscilaciones de presión que surgen del cierre de la tobera cuando la golpea la aguja [13]. Al mismo tiempo, ambos efectos se reducen conforme aumenta la presión de inyección.

Para complementar los resultados alcanzados se presenta un análisis cualitativo sobre el comportamiento hidráulico de un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico en la Figura 5.18, donde se puede observar que el parámetro que mas influye es la presión de inyección [60].

Parámetro	Inyector solenoide			Inyector piezoeléctrico		
	Aumento de la presión de inyección	Aumento del DT	Aumento del TE del 1er evento	Aumento de la presión de inyección	Aumento del DT	Aumento del TE del 1er evento
Retraso hidráulico de apertura 1er. evento	Disminuye	-	-	-	-	-
Retraso hidráulico de cierre 1er. evento	Disminuye	-	Aumenta	Disminuye	-	Aumenta
Retraso hidráulico de apertura 2do. evento	-	Aumenta	-	-	-	Disminuye
Retraso hidráulico de cierre 2do. evento	Disminuye	-	-	Disminuye	Disminuye	Aumenta
Masa de combustible inyectada 1er. evento	-	-	-	Disminuye	-	-
Masa de combustible inyectada 2do. evento	-	Disminuye	Aumenta	Disminuye	Disminuye	Aumenta
Coficiente de descarga	Aumenta	-	-	Aumenta	-	-

Figura 5.18: Análisis cualitativo sobre el comportamiento hidráulico de un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico.

## CAPÍTULO 6

# CONCLUSIONES

---

En esta sección se muestra las conclusiones obtenidas de los resultados de la serie de experimentos realizados al emplear las estrategias de inyección múltiple, es decir, piloto, dividida y post-inyección en los inyectores diésel solenoide y piezo-eléctrico. En general se hace énfasis en el retraso hidráulico de apertura y cierre del primer y segundo evento de inyección, así como la masa de combustible inyectada por ambos eventos de inyección y el coeficiente de descarga por nivel de presión empleada para ambos inyectores.

*Conclusiones del inyector diésel solenoide*

El retraso hidráulico de apertura y de cierre en el primer evento de inyección son afectados por la presión de inyección, ya que al aumentar este parámetro, el retraso hidráulico disminuye en las estrategias de inyección piloto, dividida y post-inyección.

El retraso hidráulico de apertura en el segundo evento de inyección es afectado por el DT y no por la masa ni presión de inyección en las tres estrategias de inyección múltiple empleadas, por lo tanto, el retraso hidráulico se incrementa conforme aumenta el valor del DT en el intervalo de 0.55 ms hasta 0.9 ms y después de este valor el efecto sobre el retraso hidráulico disminuye. Por otro lado, el retraso hidráulico de cierre en el segundo evento de inyección no se ve afectado por el DT, pero sí por la presión de inyección, en consecuencia el retraso hidráulico de cierre disminuye al incrementarse la presión de inyección.

La masa de combustible inyectada en el segundo evento de inyección es afectada por el DT y en consecuencia se incrementa para valores de DT menores a 0.6 ms en las estrategias de inyección piloto, dividida y post-inyección, superando el valor correspondiente a la inyección simple de referencia en la estrategia de inyección piloto en un 8.3 %, 4.1 % y 3.3 % en los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Por otro lado, la masa de combustible inyectada al aplicar la estrategia de inyección dividida, supera su valor correspondiente a una inyección simple de referencia en un 12.4 %, 9.2 % y 8.9 % en los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa respectivamente. Por último, en la estrategia de post-inyección, la masa de combustible inyectada supera su valor correspondiente a una inyección simple de referencia en un 14.8 %, 10.1 % y 8.2 % en los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Ésta última estrategia de inyección fue la que presentó los mayores porcentajes de masa de combustible inyectada respecto a su referencia, debido a la masa de combustible inyectada durante el primer evento de inyección que resulta de los diferentes TE empleados.



*Implicaciones del DT en las estrategias de inyección múltiple*

El DT establece el grado de interacción los eventos de inyección de las estrategias de inyección múltiple, de tal forma que para valores muy pequeños de DT esta interacción es muy alta y disminuye conforme aumenta el DT. Por lo tanto, en un inyector diésel solenoide afecta el retraso hidráulico de apertura, pero no el de cierre.

*Conclusiones del inyector diésel piezoeléctrico*

El doble comportamiento de las evoluciones de la masa de combustible inyectada en función del tiempo de energización en inyecciones simples, se debe a que para valores menores a 2 ms, 1.7 ms y 1.5 ms, para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente, la aguja del inyector no se ha levantado completamente.

En las estrategias de inyección múltiple piloto, dividida y post-inyección, el *retraso hidráulico de apertura en el primer evento de inyección* no es afectado por la presión de inyección. Por otro lado, el *retraso hidráulico de cierre en el primer evento de inyección* disminuye conforme se incrementa la presión de inyección.

El *retraso hidráulico de apertura en el segundo evento de inyección* no es afectado por el DT en las estrategias de inyección múltiple y  $p_{rail}$  estudiados. Por otra lado, el retraso hidráulico para la presión de inyección de 80 MPa en la estrategia de post-inyección, se incrementa conforme aumenta el DT en el intervalo de 1.15 ms hasta 1.5 ms, debido a un incremento en el efecto del primer evento de inyección sobre el segundo en las ondas de presión generadas.

Por otro lado, el *retraso hidráulico de cierre del segundo evento de inyección* es afectado por la presión de inyección, de tal forma que disminuye conforme aumenta la presión de inyección. Éste parámetro, también se ve afectado por el DT, de tal forma que en la estrategia de inyección piloto, disminuye conforme aumenta el DT en el intervalo de 1.15 ms hasta 1.5 ms. En la estrategia de inyección dividida, para la  $p_{rail}$  de 80 MPa, el retraso hidráulico se incrementa conforme aumenta el DT en el intervalo de 1.15 ms hasta 1.5 ms, sin embargo, el intervalo de crecimiento del

retraso hidráulico se reduce hasta el valor de DT de 1.4 ms y 1.3 ms, para los niveles de  $p_{rail}$  de 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Mientras tanto, en la estrategia de post-inyección, el retraso hidráulico de cierre decrece para los niveles de presión de 80 MPa y 100 MPa en diferentes intervalos de DT, para después estabilizarse, en cambio para la presión de inyección de 120 MPa, el retraso hidráulico de cierre se incrementa conforme aumenta el DT en el intervalo de 1.15 ms hasta 1.5 ms, y luego se estabiliza. En un análisis conjunto del retraso hidráulico de apertura y cierre en el segundo evento de inyección, se observa que cuando se tiene un retraso hidráulico de apertura pequeño, se obtiene un retraso hidráulico de cierre alto, debido a la cantidad de movimiento que adquiere la aguja del inyector durante la apertura.

*La masa de combustible inyectada en el segundo evento de inyección en la estrategia de inyección piloto, es afectada tanto por el DT como por la presión de inyección, de tal forma que la masa de combustible inyectada se incrementa para valores de DT menores a 1.5 ms superando el valor correspondiente a la inyección simple de referencia en un 10.5 %, 9.6 % y 9 % en los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Por otro lado, la masa de combustible inyectada en la estrategia de inyección dividida, también aumenta para valores de DT menores a 1.7 ms, superando el valor correspondiente a la inyección simple de referencia en un 12 %, 11 % y 10 % en los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. En cuanto a la estrategia de post-inyección, incrementa su masa de combustible inyectada para valores de DT menores a 1.3 ms, superando el valor correspondiente a la inyección simple de referencia en un 38.4 %, 10 % y 16.5 % en los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente. Cabe destacar que ésta última estrategia fue la que presentó los mayores porcentajes de masa de combustible inyectada, debido a la duración del primer evento de inyección, es decir, mientras mas larga sea la duración del primer evento de inyección se reduce la separación entre los dos eventos de inyección, incrementando la interacción entre éstos y en consecuencia más combustible se inyectará en el segundo evento de inyección.*

*Implicaciones del DT en las estrategias de inyección múltiple*

Como ya se había mencionado, el DT establece el grado de interacción los eventos de inyección de las estrategias de inyección múltiple, de tal forma que para valores muy pequeños de DT, esta interacción se incrementa, y disminuye conforme aumenta el DT. Por lo tanto, en un inyector diésel piezoeléctrico, el retraso hidráulico de cierre durante el segundo evento de inyección, afecta en mayor grado a la masa de combustible inyectada, ya que su duración es del doble que la del retraso hidráulico de apertura.

*Conclusiones del coeficiente de descarga*

El coeficiente de descarga para ambos inyectores se incrementa conforme el nivel de presión de inyección aumenta, donde los valores obtenidos para el inyector diésel solenoide son de 0.846, 0.877 y 0.898 para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente y para el inyector diésel piezoeléctrico son de 0.913, 0.933 y 0.955 para los niveles de  $p_{rail}$  de 80 MPa, 100 MPa y 120 MPa, respectivamente.

*Análisis cualitativo sobre el comportamiento hidráulico de un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico*

De forma general, se puede concluir que el retraso hidráulico de apertura durante el primer evento de inyección disminuye en un inyector diésel solenoide cuando se aumenta la presión de inyección, mientras que para el inyector diésel piezoeléctrico no se ve afectado. Por otro lado, el retraso hidráulico de cierre durante el primer evento de inyección disminuye cuando se aumenta la presión de inyección tanto en el inyector diésel solenoide como en el inyector piezoeléctrico. Además, el retraso hidráulico de apertura durante el segundo evento de inyección disminuye conforme disminuye el DT en ambos inyectores.

## 6.1 TRABAJOS FUTUROS

Para complementar este estudio y así tener una mejor comprensión del proceso de inyección en los inyectores diésel solenoide y piezoeléctrico se sugieren los siguientes trabajos:

- Estudio de los parámetros macroscópicos de los inyectores diésel solenoide y piezoeléctrico bajo diferentes estrategias de inyección múltiple.
- Estudio sobre el comportamiento del proceso de inyección empleando un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico bajo diferentes estrategias de inyección múltiple a presiones menores de 80 MPa y mayores a 120 MPa.
- Estudio sobre el comportamiento del proceso de inyección empleando un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico bajo diferentes estrategias de inyección múltiple con tiempos de energización menores a 0.9 ms y mayores a 2 ms.
- Simulación del proceso de inyección empleando un inyector diésel solenoide y piezoeléctrico bajo diferentes estrategias de inyección múltiple.

## APÉNDICE A

# PREPARACIÓN Y ANÁLISIS DE LOS ARCHIVOS

---

En este apéndice se muestran los pasos a seguir para obtener los parámetros de análisis de este estudio. Por lo tanto, se muestra a detalle la forma en que se prepararon los archivos obtenidos por el software IAV del analizador de inyecciones para su análisis. Por otro lado, también se presenta la metodología llevada a cabo para obtener y analizar de los archivos antes mencionados, parámetros como tasa de flujo másico, masa de combustible inyectada, retraso hidráulico, inicio y fin de la inyección y del pulso eléctrico, entre otros.

## A.1 PREPARACIÓN DE LOS ARCHIVOS PARA SU ANÁLISIS

1. Se crean 3 pestañas y se les asignan los siguientes nombres: masas, TXT y bascula.

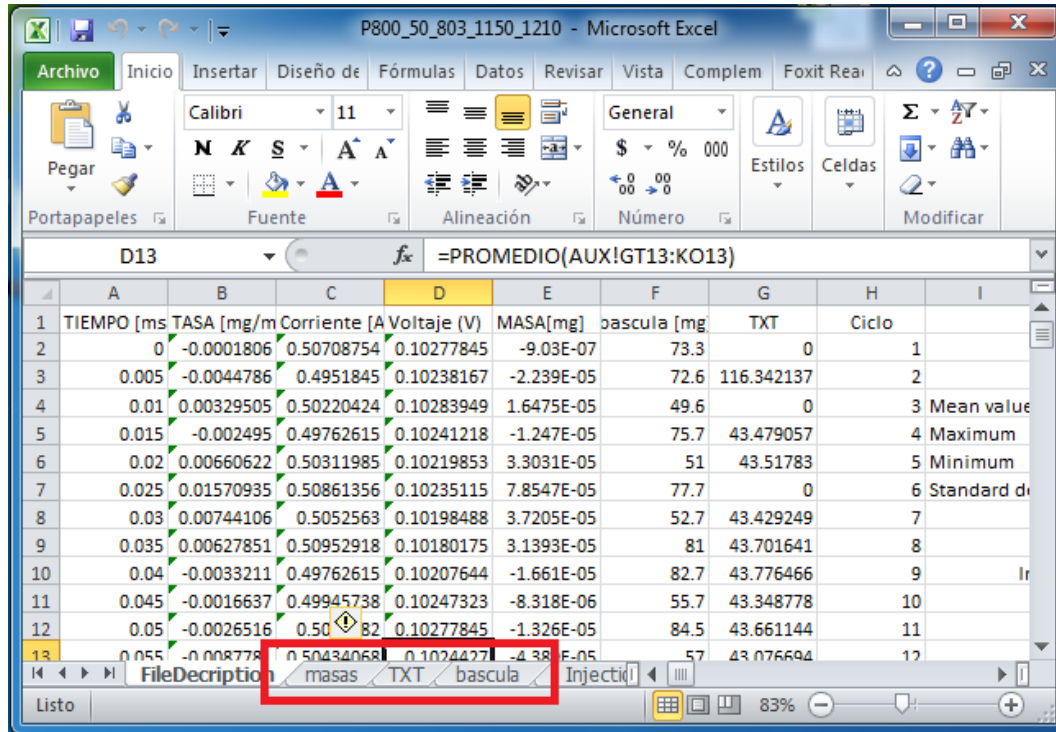


Figura A.1: Creación de pestañas adicionales.

- Del archivo “.txt” (con el mismo nombre) se copia todo el contenido y se pega en la pestaña “TXT” del archivo excel a procesar.

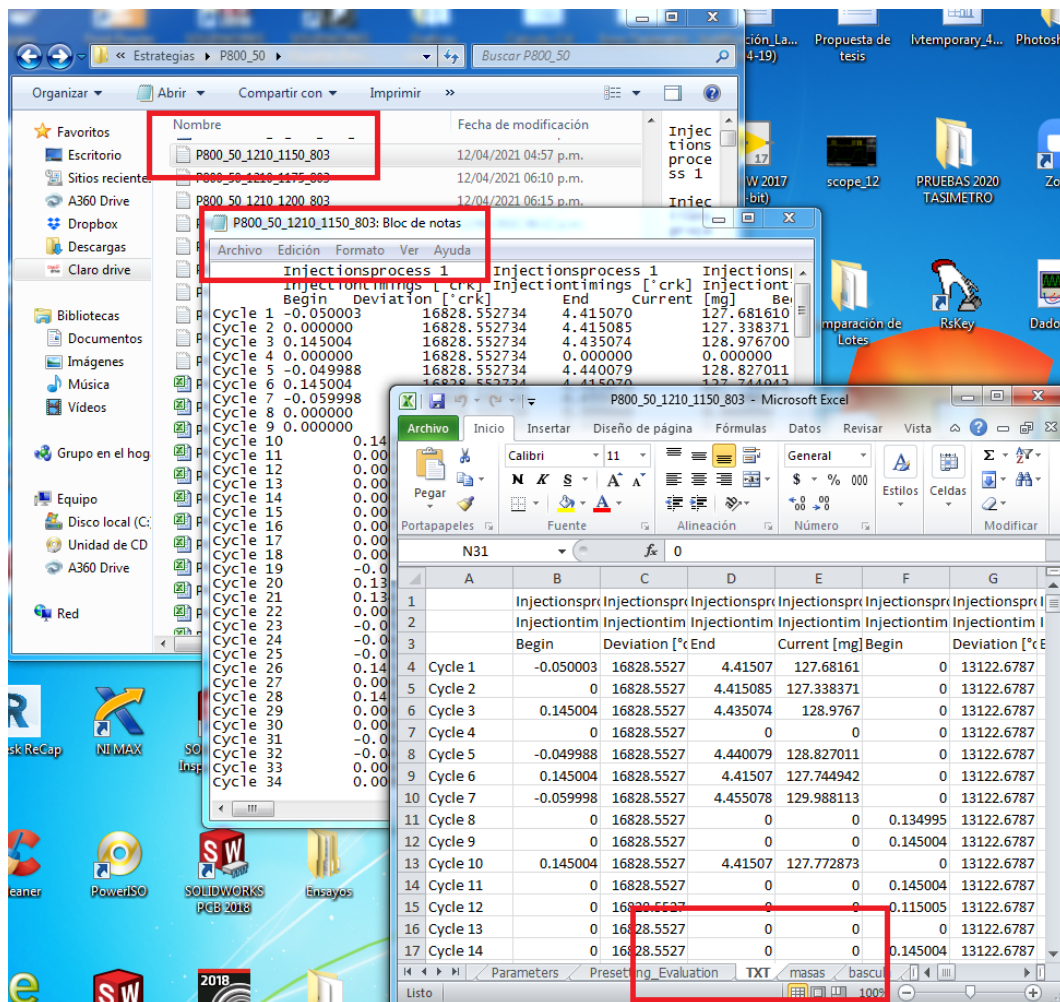


Figura A.2: Copiado de información de archivo .txt.

Nota: siempre debe coincidir el nombre del archivo .txt con el nombre del archivo excel a procesar para evitar mezclar información entre experimentos.

3. Del archivo “excel de la bascula” (con el mismo nombre) se copia todo el contenido y se pega en la pestaña “bascula” del archivo excel a procesar.

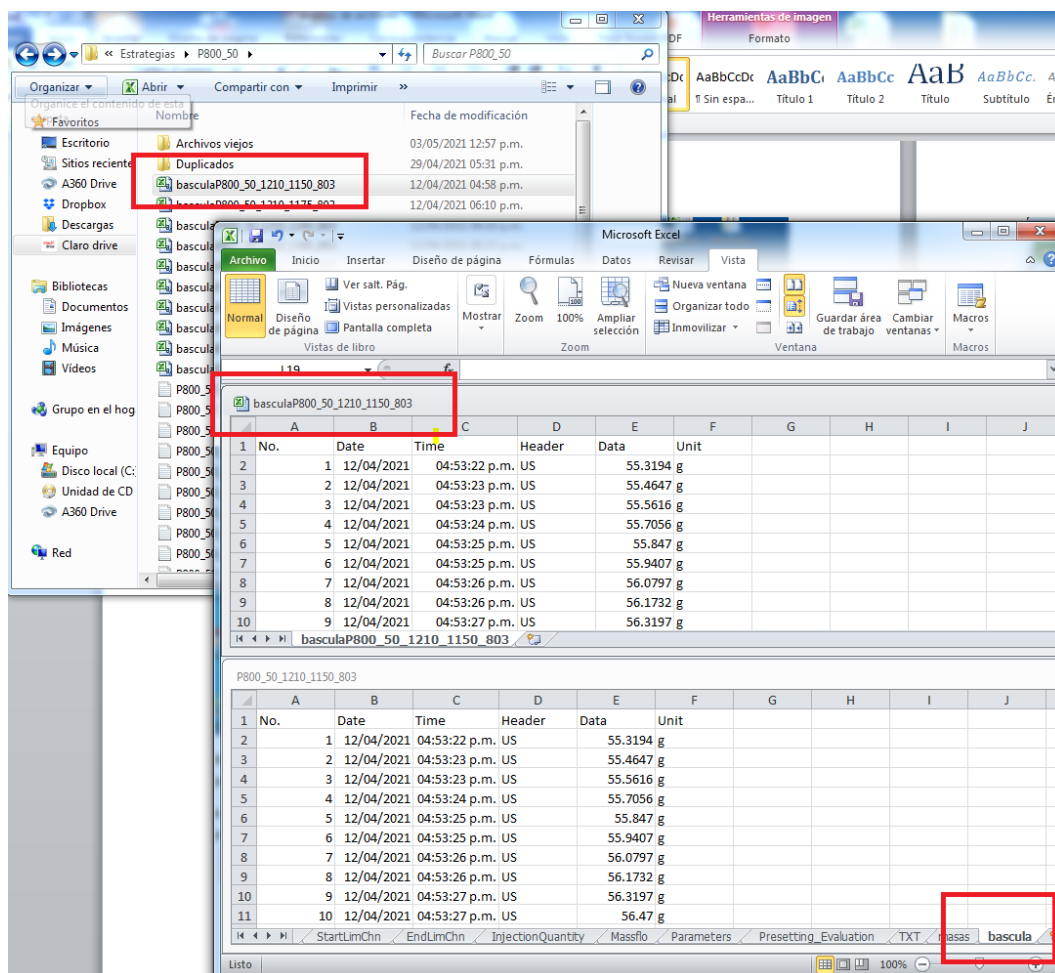


Figura A.3: Copiado de información de archivo excel bascula.

Nota: siempre debe coincidir el nombre del archivo excel de la bascula con el nombre del archivo excel a procesar para evitar mezclar información entre experimentos.



4. Se abre un archivo de “referencia” que se puede tomar de cualquiera de los que ya han sido procesados en estudios previos.

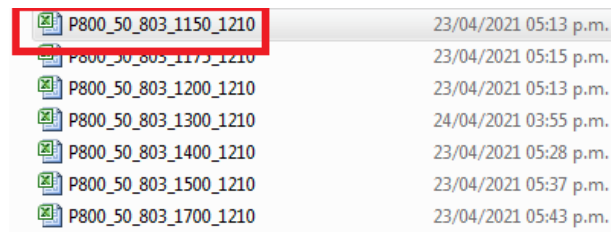


Figura A.4: Apertura del archivo de referencia

5. De la pestaña de “masas” del archivo excel de “referencia” se copia todo el contenido y se pega en la pestaña de “masas” del archivo excel a procesar.

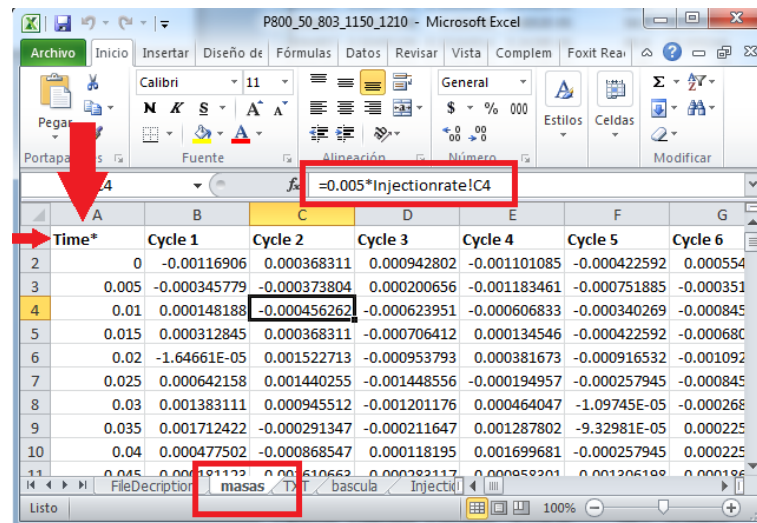


Figura A.5: Copiado de las masas.

Nota: el contenido de esta pestaña corresponde al contenido de la pestaña de “Injectionrate”, multiplicando por la unidad de tiempo (0.005) celda por celda a excepción de la columna “Time” y la fila con los nombres de los ciclos.

6. De la pestaña de “FileDecription” del archivo excel de “referencia” se copia todo el contenido y se pega en la pestaña de “FileDecription” del archivo excel a procesar.

a) En el menú “Datos” se selecciona “Editar vínculos”.

b) Del menú que se despliega se selecciona “Cambiar origen”.

c) Del menú de selección de archivos se elige el mismo archivo que se esta procesando y se hace clic en “Aceptar”.

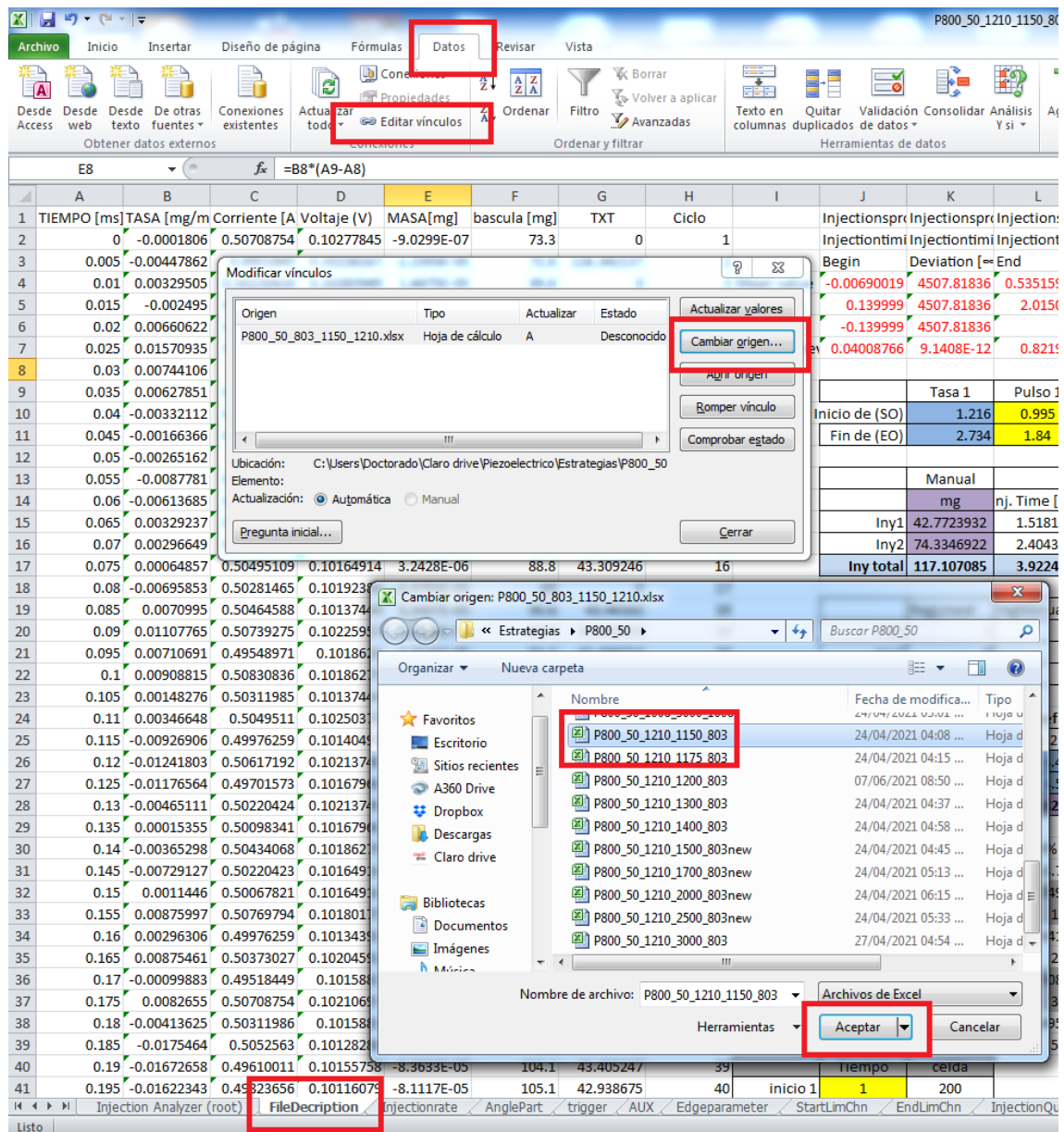


Figura A.6: Copiando de pestaña de análisis y actualización de vínculos.

Con todo lo anterior se actualizan las ligas de referencia entre pestañas para dejar el archivo listo para su análisis.

## A.2 ANÁLISIS DE LOS ARCHIVOS

Preparación de los datos de la pestaña “FileDecription” del archivo procesado. Hay que tener presente que los únicos valores que se ingresan manualmente son la fila “Pulso 1”, “Pulso 2”, “Bascula”, “Tasimetro IAV” y “Tiempo”, el resto de los parámetros se obtienen de forma automática y se describen enseguida.

	I	J	K	L	M	N	O	P
1			Tasa 1	Pulso 1	Tasa 2	Pulso 2	Bascula	Tasimetro IAV
2		Inicio de (SO)	1.21	0.995	3.26	3.04	201	201
3		Fin de (EO)	2.73	1.84	5.66	4.295	300	300
4								
5			Manual				Retraso hidraulico A	Retraso hidraulico C
6			mg	Inj. Time [ms]	Pulso Time [ms]		0.221	0.894
7		Iny1	42.7723932	1.5181	0.8450		0.224	1.374
8		Iny2	74.33469216	2.4043	1.255			
9		<b>Iny total</b>	<b>117.1070854</b>	<b>3.9224</b>	<b>2.1000</b>			
0								
1								<b>Promedio analizado</b>
2							<b>Bascula [mg]=</b>	<b>113.308</b>
3							<b>Tasimetro IAV [mg]=</b>	<b>113.564</b>
9		<b>Tiempo</b>	<b>celda</b>					
0	inicio 1	1	200					
1	medio 1	2	400					
2	fin 1	3	600					
3	medio 2	4.5	900					
4	fin 2	6	1200					

Figura A.7: Datos que se modifican manualmente

1. De la pestaña de “Injectionrate” se copia la columna “Time” y se pega en la primer columna de la pestaña “FileDecription” como se muestra en la Figura A.8.
2. En la columna ”B” se obtiene el promedio de la tasa de inyección de los últimos 100 eventos de inyección registrados en la pestaña “Injectionrate” como se muestra en la Figura A.9. Por otro lado, la fórmula empleada fue:

$$=PROMEDIO(Injectionrate!GT2:KO2)$$

Nota: se copia la fórmula a lo largo de toda la columna para obtener la evolución completa de la tasa de inyección.

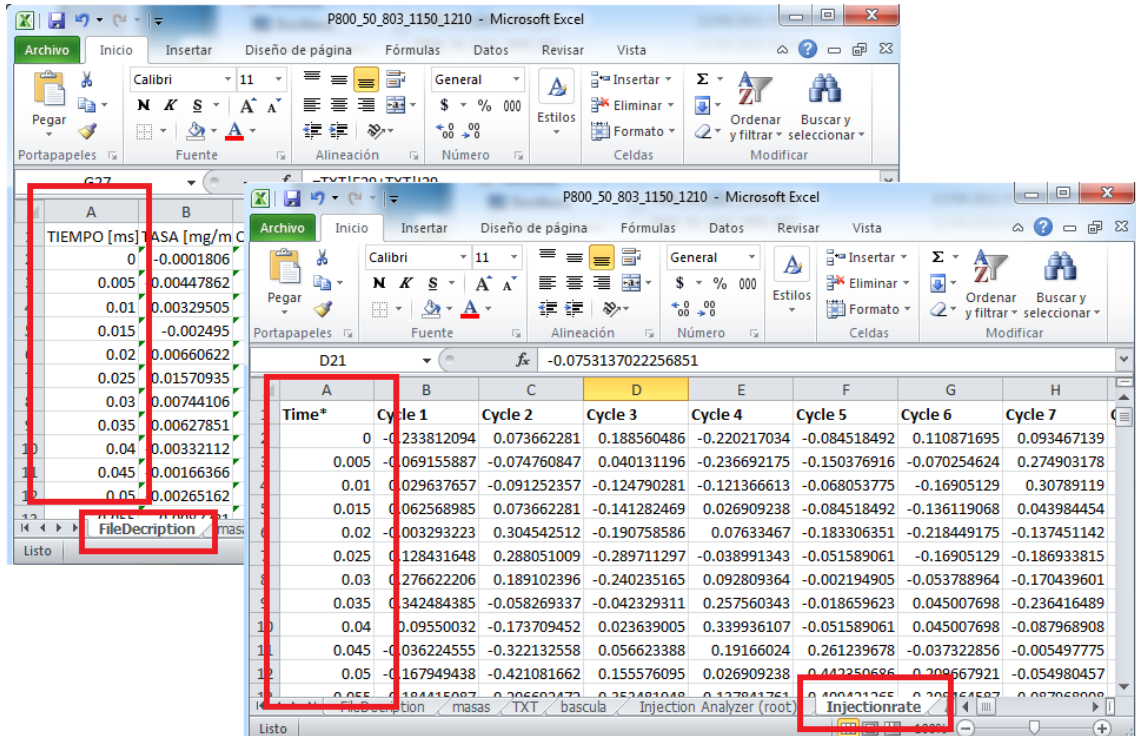


Figura A.8: Asignación de la columna Tiempo.

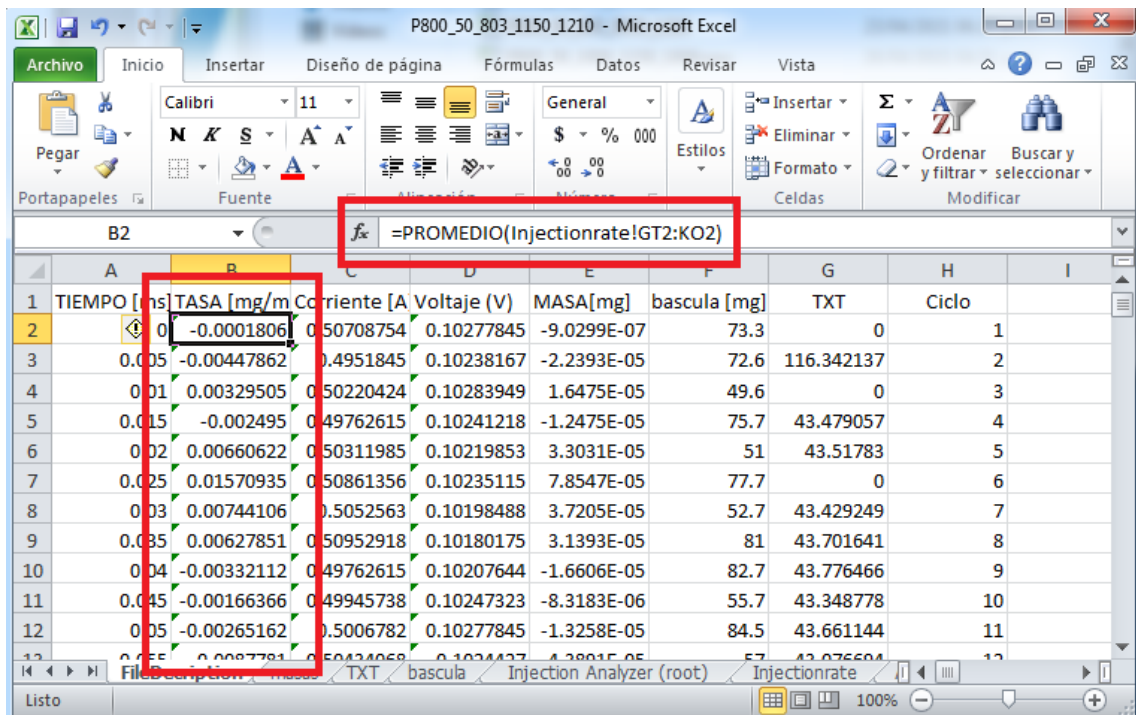


Figura A.9: Asignación de la columna Tiempo.

3. En la columna C se obtiene el promedio del pulso eléctrico (útil en un inyector diésel solenoide) de los últimos 100 eventos de inyección registrados en la pestaña “trigger” empleando la fórmula:

=PROMEDIO(trigger!GT2:KO2)

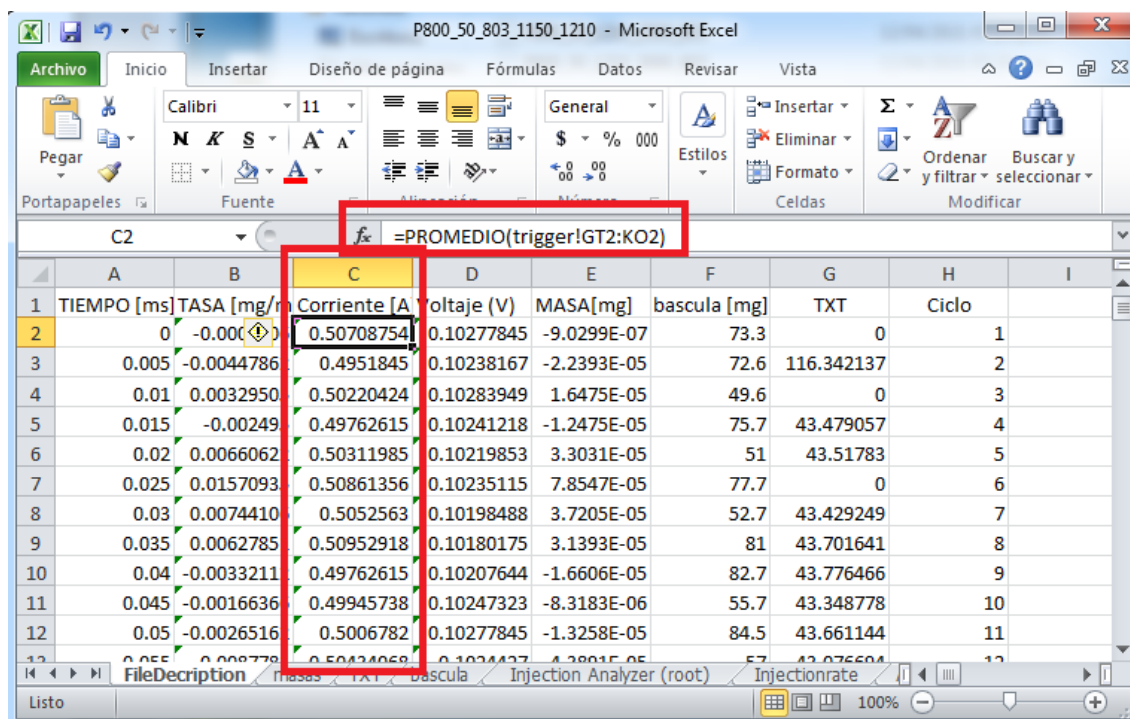


Figura A.10: Columna corriente.

Nota: se copia la fórmula a lo largo de toda la columna para obtener la evolución completa pulso eléctrico y siempre se maneja el mismo rango de celdas en los promedios de tasa y pulso.

4. En la columna D se obtiene el promedio del voltaje (para un inyector diésel piezoeléctrico) de los últimos 100 eventos de inyección registrados en la pestaña “AUX”, como se observa en la Figura A.11. Aquí se empleó la fórmula:

=PROMEDIO(AUX!GT2:KO2)

Nota: se copia la fórmula a lo largo de toda la columna para obtener la evolución completa del voltaje empleado y siempre se maneja el mismo rango de celdas en los promedios de tasa y voltaje.

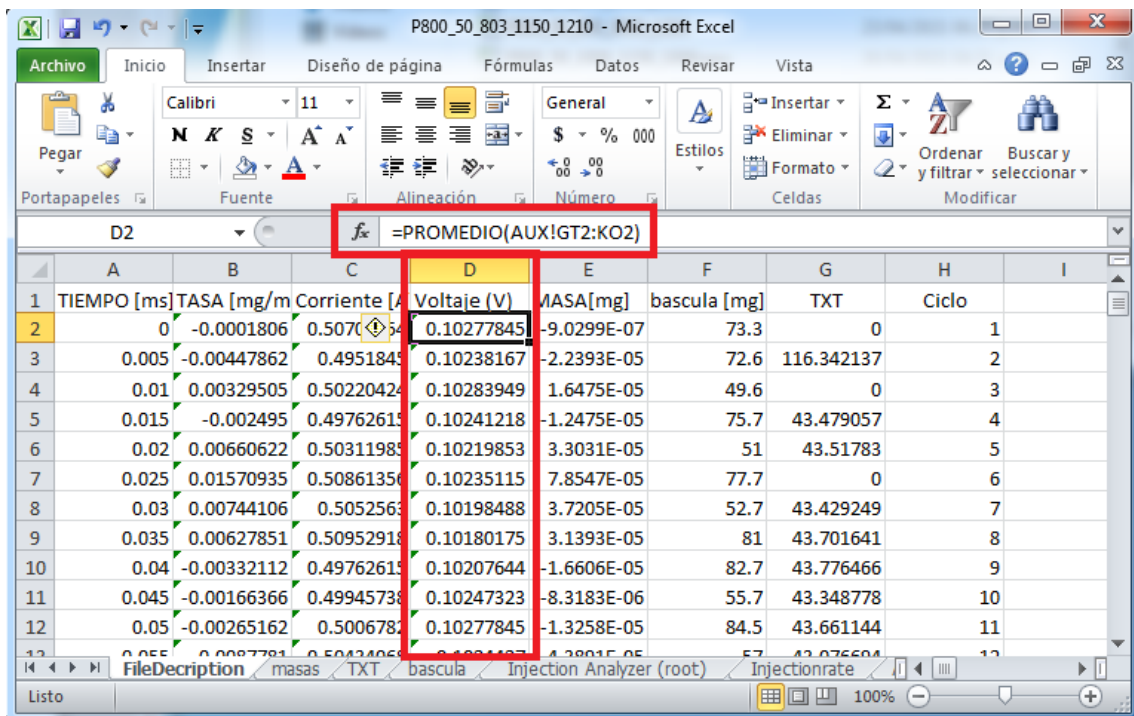


Figura A.11: Columna Voltaje.

- En la columna E se obtiene la masa de combustible inyectada multiplicando la tasa de flujo másico promedio por la diferencia de tiempos (0.005) como se observa en la Figura A.12. Los valores se obtienen con la fórmula:

$$=B2*(A3-A2)$$

Nota: se copia la fórmula a lo largo de toda la columna.

- En la columna F se obtiene la masa de combustible registrada por la báscula multiplicando la diferencia entre las medidas continuas registradas en la pestaña “bascula” por 1000 como se observa en la Figura A.13. Los valores se obtienen con la fórmula:

$$=(bascula!E3-bascula!E2)*1000$$

Nota: se copia la fórmula a lo largo de toda la columna.

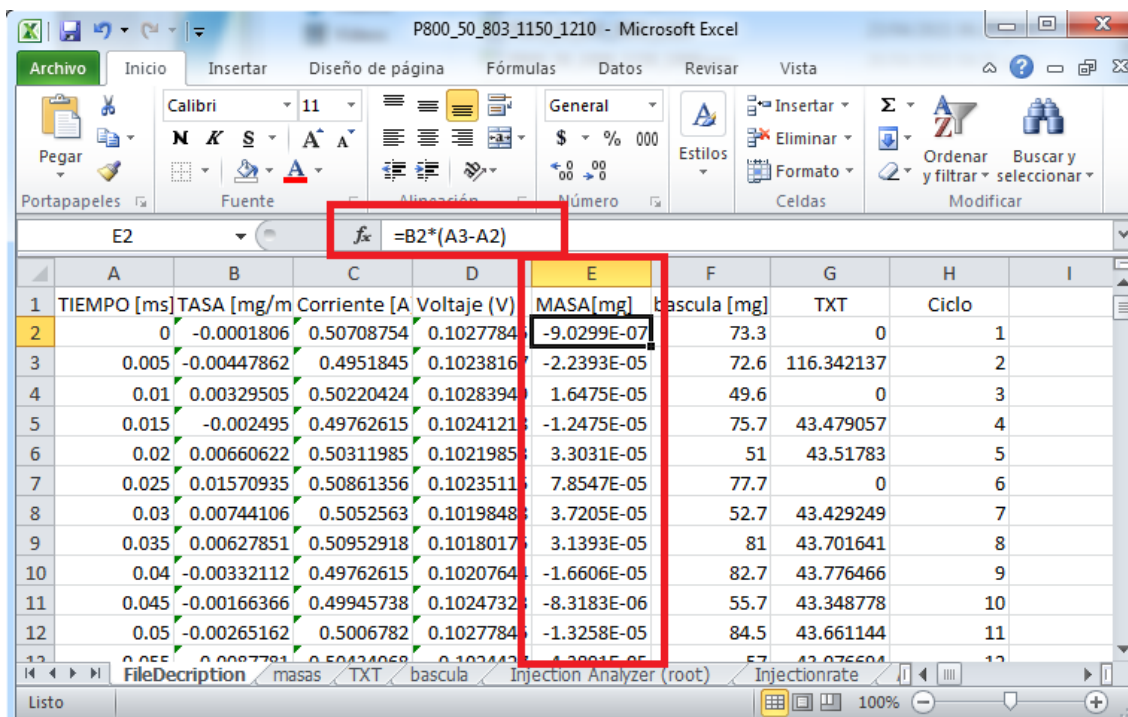


Figura A.12: Columna Masa.

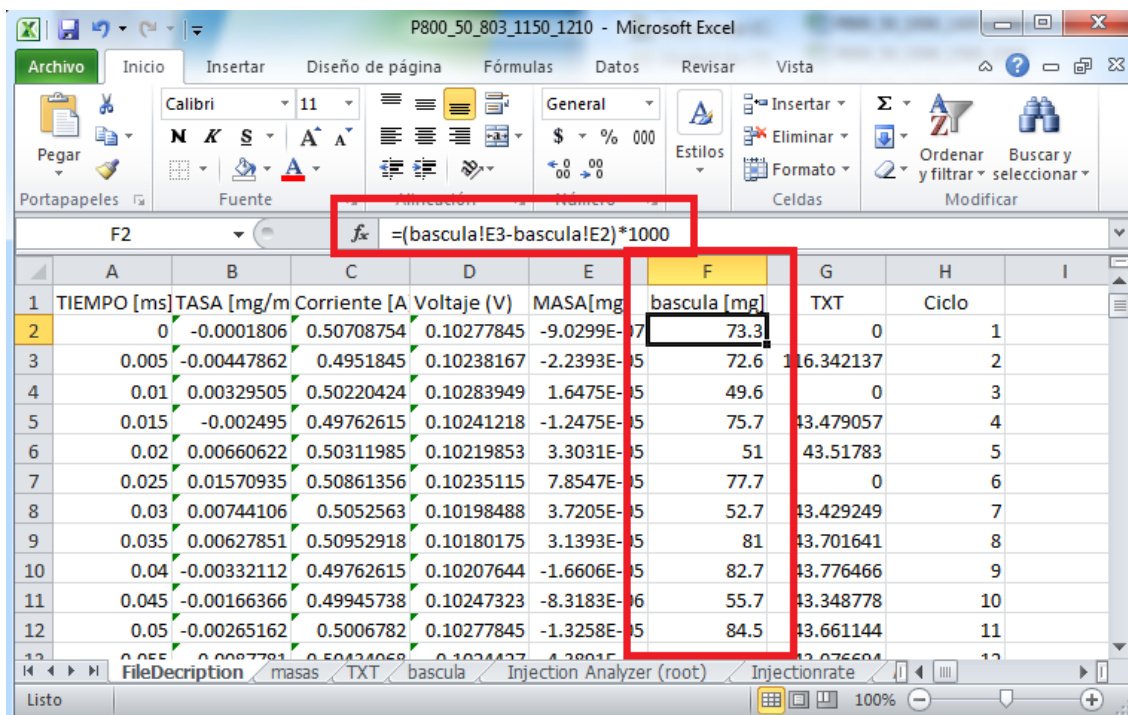


Figura A.13: Columna bascula.

7. En la columna G se obtiene la masa de combustible registrada por el software IAV sumando todos los eventos de inyección registrados en la pestaña “TXT” con la fórmula:

$$= \text{TXT!E4} + \text{TXT!I4}$$

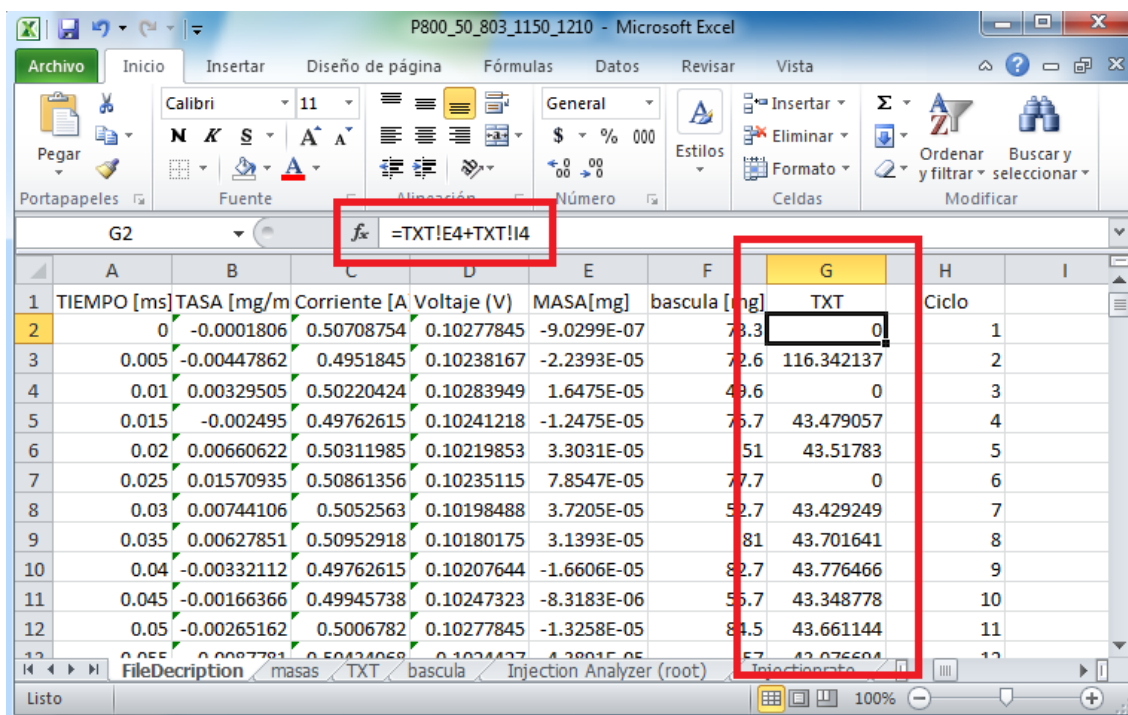


Figura A.14: Columna TXT.

Nota: se copia la formula a lo largo de toda la columna y siempre hay que verificar que se consideraron todos las inyección registradas en las columnas “Current [mg]” de la pestaña “TXT”.

8. Con el fin de tener un panorama general del proceso de inyección y sus parámetros se generan tres gráficas con los datos obtenidos:
- Gráfica de la masa obtenida por la báscula: se genera con la información de la columna F.
  - Gráfica de la tasa y pulso eléctrico: se genera con la información de la columna A, B, C y D.



- c) Gráfica de la masa obtenida por el software IAV: se genera con la información de la columna G.

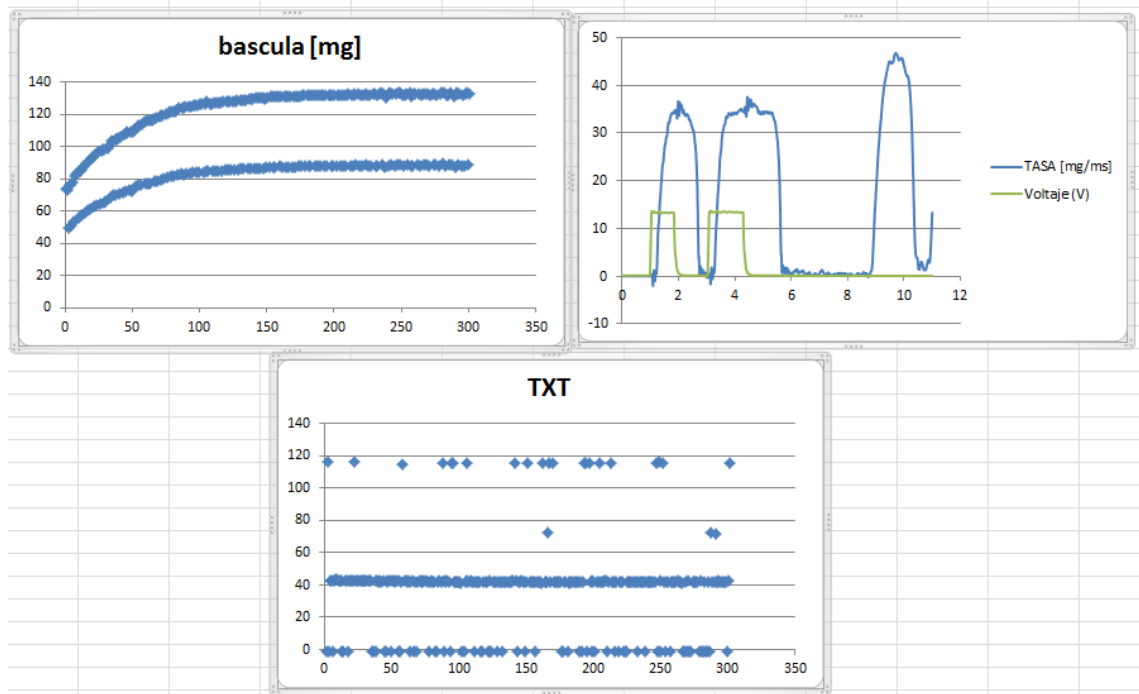


Figura A.15: Gráficas de la bascula, Tasa y del software IAV.

Nota: Al analizar la gráfica de la masa de combustible inyectada obtenida de la báscula y del software IAV podemos definir el intervalo de las 100 repeticiones más estables en las cuales se basará cada uno de los experimentos. Generalmente las repeticiones más estables son las ultimas 100 (de la repetición 201 a la 300).

9. Con base en la gráfica de tasa y pulso generada se definen las secciones de análisis de las evoluciones que automatizan el proceso de obtención de datos teniendo en cuenta los siguientes datos a ingresar manualmente:

- a) “inicio 1” corresponde a un valor de “Tiempo” antes del inicio del primer evento de inyección.
- b) “medio 1” corresponde a un valor de “Tiempo” entre el inicio y el fin del primer evento de inyección (generalmente se toma un valor a la mitad).

- c) “fin 1” corresponde a un valor de “Tiempo” entre el fin del primer evento de inyección y el inicio del segundo evento de inyección (generalmente se toma un valor a la mitad) .
- d) “medio 2” corresponde a un valor de “Tiempo” entre el inicio y el fin del segundo evento de inyección (generalmente se toma un valor a la mitad).
- e) “fin 2” corresponde a un valor de “Tiempo” después del fin del segundo evento de inyección.

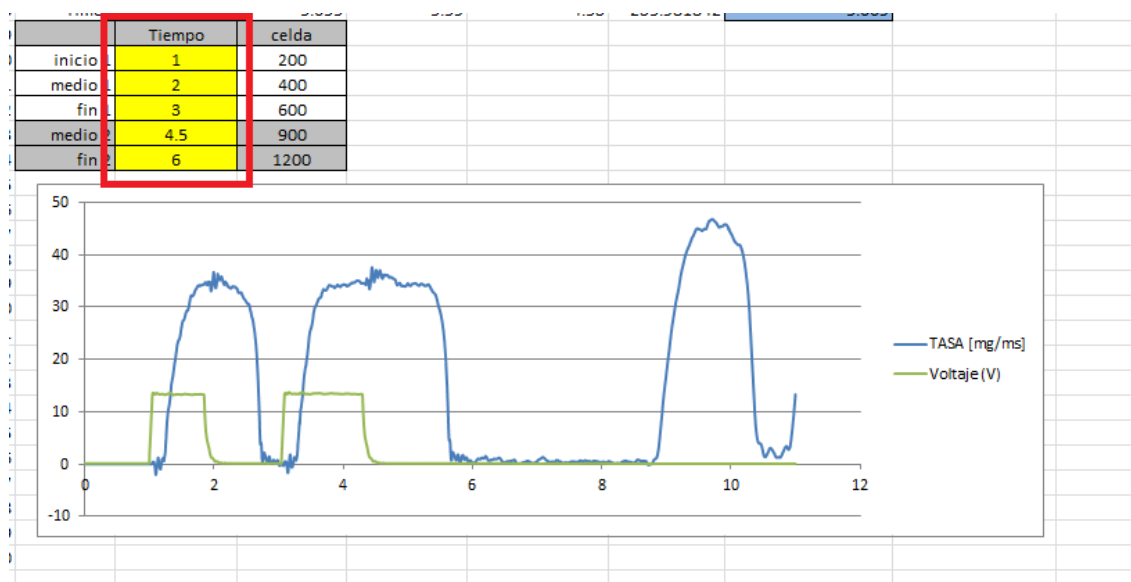


Figura A.16: Secciones de la gráfica de Tasa.

Nota: Los valores de la columna “celda” se asignan automáticamente y se generan al dividir cada valor de la columna “Tiempo” entre 0.005.

10. Con el fin de obtener los límites de análisis de las inyecciones se aplica la metodología de Javier Salvador de tal forma que los siguientes datos se generan automáticamente:

- a) Se obtiene el valor máximo de los valores de tasa de la columna “Tasa” en la columna “Max. Rate” con la siguiente formula:

$$=MAX(B2:B1200)$$

	Max. Rate	Rate 10%	Rate 50%	Rate 95%	m	interseccion
	37.558	3.756	18.779	35.680		
Rate 1		3.906821649	18.63749376	35.35190823		
Time1		1.25	1.38	1.98	113.3128624	1.216
Rate 2		3.913433621	18.23541376	35.51703362		
Time2		2.72	2.67	2	-286.4396028	2.734
Rate 3		3.716036751	18.84508671	35.43004307		
Time3		3.295	3.42	4.425	121.0323997	3.264
Rate 4		3.206132648	18.54495239	35.62524963		
Time4		5.655	5.59	4.53	-235.9818422	5.669

Figura A.17: Porcentajes de tasa de flujo másico máxima.

b) Se obtiene el valor de la tasa al 10 % en la columna “Rate 10 %” con la fórmula:

$$=J\$31*0.1$$

c) De la columna “Tasa” Se obtiene el valor de tasa más cercano al valor obtenido de la tasa al 10 % del paso anterior y definido por el intervalo de la columna “celda” entre “inicio 1” y “medio 1” con la fórmula:

$$=INDICE(INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$41)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$42)), COINCIDIR(MIN(ABS(INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$41)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$42))-K\$31)), INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$41)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$42))-K\$31))$$

d) De la columna “TIEMPO” Se obtiene el valor del tiempo correspondiente al valor obtenido de la tasa en el paso anterior y definido por el intervalo de la columna “celda” entre “inicio 1” y “medio 1” con la fórmula:

$$=INDICE(INDIRECTO(CONCATENAR("a",\$K\$41)):INDIRECTO(CONCATENAR("A",\$K\$42)), COINCIDIR(MIN(ABS(INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$41)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$42))-K\$31)), INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$41)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$42))-K\$31))$$

e) De la columna “Tasa” Se obtiene el valor de tasa más cercano al valor obtenido de la tasa al 10 % del inciso b) y definido por el intervalo de la columna “celda” entre “medio 1” y “fin 1” con la fórmula:

$$=INDICE(INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$42)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$43)), COINCIDIR(MIN(ABS(INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$42)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$43))-K\$31)), INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$42)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",\$K\$43))-K\$31,-1)+1)$$

- f) De la columna “TIEMPO” Se obtiene el valor del tiempo correspondiente al valor obtenido de la tasa en el paso anterior y definido por el intervalo de la columna “celda” entre “medio 1” y “fin 1” con la fórmula:

```
=INDICE(INDIRECTO(CONCATENAR("a",&K$42)):INDIRECTO(CONCATENAR("A",&K$43)),
COINCIDIR(MIN(ABS(INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$42)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$43))-
K$31), INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$42)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$43))-K$31,-1)+1)
```

- g) De la columna “Tasa” Se obtiene el valor de tasa más cercano al valor obtenido de la tasa al 10 % del inciso b) y definido por el intervalo de la columna “celda” entre “fin 1” y “medio 2” con la fórmula:

```
=INDICE(INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$43)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$44)),
COINCIDIR(MIN(ABS(INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$43)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$44))-
K$31), INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$43)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$44))-K$31))
```

- h) De la columna “TIEMPO” Se obtiene el valor del tiempo correspondiente al valor obtenido de la tasa en el paso anterior y definido por el intervalo de la columna “celda” entre “fin 1” y “medio 2” con la fórmula:

```
=INDICE(INDIRECTO(CONCATENAR("a",&K$43)):INDIRECTO(CONCATENAR("A",&K$44)),
COINCIDIR(MIN(ABS(INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$43)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$44))-
K$31), INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$43)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$44))-K$31))
```

- i) De la columna “Tasa” Se obtiene el valor de tasa más cercano al valor obtenido de la tasa al 10 % del inciso b) y definido por el intervalo de la columna “celda” entre “medio 2” y “fin 2” con la fórmula:

```
=INDICE(INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$44)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$45)),
COINCIDIR(MIN(ABS(INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$44)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$45))-
K$31), INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$44)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",&K$45))-K$31,-1)+1)
```

- j) De la columna “TIEMPO” Se obtiene el valor del tiempo correspondiente al valor obtenido de la tasa en el paso anterior y definido por el intervalo de la columna “celda” entre “medio 2” y “fin 2” con la fórmula:

```
=INDICE(INDIRECTO(CONCATENAR("a",$K$44)):INDIRECTO(CONCATENAR("A",$K$45)),
COINCIDIR(MIN(ABS(INDIRECTO(CONCATENAR("B",$K$44)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",$K$45))-
K$31)), INDIRECTO(CONCATENAR("B",$K$44)):INDIRECTO(CONCATENAR("B",$K$45))-K$31,-1)+1)
```

*k)* Se repiten los incisos del c) al j) ahora para el valor de la tasa al 50 % en la columna “Rate 50 %” con la fórmula:

$$=J\$31*0.5$$

*l)* Se repiten los incisos del c) al j) ahora para el valor de la tasa al 95 % en la columna “Rate 50 %” con la fórmula:

$$=J\$31*0.95$$

*m)* Se obtiene la pendiente en la columna “m” de la recta formada entre los puntos correspondientes a las tasas del 10 % y 50 % al inicio del primer evento de inyección correspondientes con la fórmula:

$$=+(L32-K32)/(L33-K33)$$

*n)* Se obtiene la intersección de la recta obtenida en el punto anterior con el eje horizontal, el cual define el inicio de la primera inyección, con la fórmula:

$$=+-L32/N33+L33$$

*ñ)* Se obtiene la pendiente en la columna “m” de la recta formada entre los puntos correspondientes a las tasas del 10 % y 50 % al final del primer evento de inyección correspondientes con la fórmula:

$$=+(L34-K34)/(L35-K35)$$

*o)* Se obtiene la intersección de la recta obtenida en el punto anterior con el eje horizontal, el cual define el fin de la primera inyección, con la fórmula:

$$=+-L34/N35+L35$$

*p)* Se repiten los incisos del m) al o), ahora para el segundo evento de inyección.

- Se ingresa manualmente de forma aproximada el tiempo en el que inicia la señal del pulso eléctrico del primer evento de inyección basándose en la gráfica de señal de Tasa y Voltaje. Enseguida se busca el valor ingresado dentro de la columna “Tiempo” y se identifica si su valor correspondiente de la columna “Voltaje” da el aumento drástico de valores que señala el inicio del pulso eléctrico, en caso contrario se ajusta el valor y se ingresa nuevamente de forma manual.

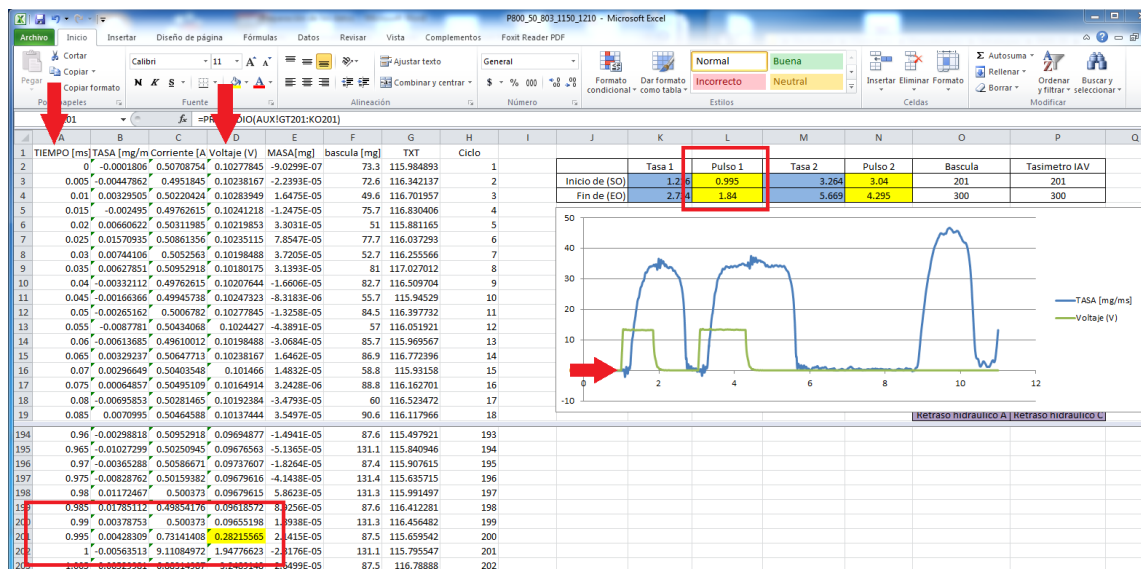


Figura A.18: Inicio del pulso eléctrico.

Nota: los valores de la columna “Tasa” se directamente de la intersección del paso anterior por lo que se llenan automáticamente.

- Se ingresa manualmente de forma aproximada el tiempo en el que finaliza la señal del pulso eléctrico del primer evento de inyección basándose en la gráfica de señal de Tasa y Voltaje. Enseguida se busca el valor ingresado dentro de la columna “Tiempo” y se identifica si su valor correspondiente de la columna “Voltaje” da la disminución drástica de valores que señala el fin del pulso eléctrico, en caso contrario se ajusta el valor y se ingresa nuevamente de forma manual.

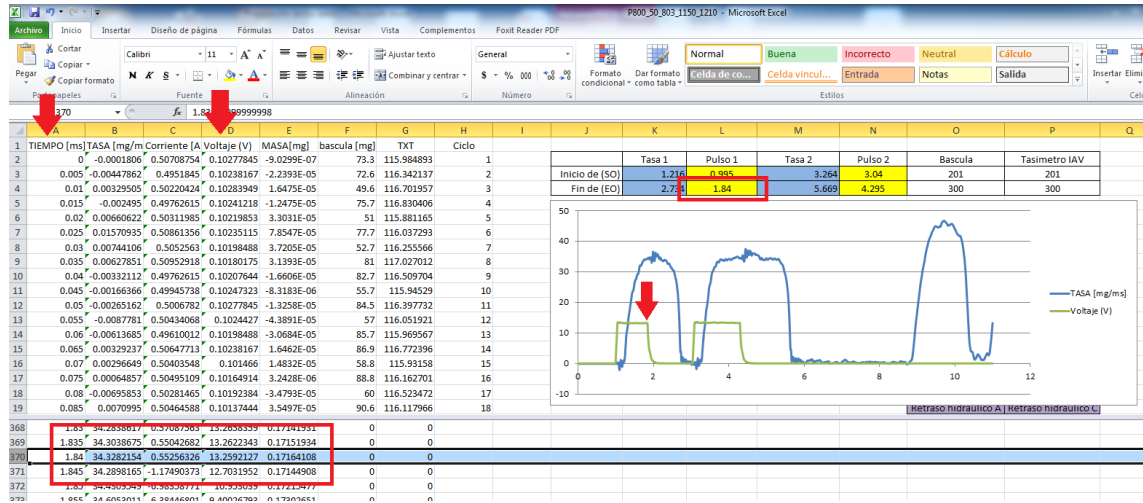


Figura A.19: Fin del pulso eléctrico.

Nota: para el inyector piezoeléctrico se usa la columna “Voltaje” y para el solenoide se usa la columna “Corriente”.

- 13. Los puntos 11 y 12 se repiten para el segundo evento de inyección.
- 14. El valor de la masa de combustible inyectada durante el primer evento de inyección se calcula automáticamente sumando los valores de la columna “MASA” que se encuentran el intervalo de inicio y fin de la columna “Tasa 1” con la fórmula:

$$=SUMAR.SI.CONJUNTO(E2:E2201,A2:A2201,">="&K3,A2:A2201,"<="&K4)$$

D	E	J	K	L	M	N	O	P
e [V]	MASA[mg]		Tasa 1	Pulso 1	Tasa 2	Pulso 2	Bascula	Tasimetro IAV
!77845	-9.03E-07		Inicio de (SO)	1.216	0.995	3.264	3.04	201
!83167	-2.239E-05		Fin de (EO)	2.734	1.84	5.669	4.295	300
!83949	1.6475E-05							
!41218	-1.247E-05							
!19853	3.3031E-05		Manual				Retraso hidraulico A	Retraso hidraulico C
!35115	7.8547E-05		mg	iny. Time [ms]	Pulso Time [ms]		0.221	0.894
!98488	3.7205E-05		iny1	42.7723932	1.5181	0.8450	0.224	1.374
!80175	3.1393E-05		iny2	74.55482228	2.4043	1.255		
!07644	-1.661E-05		iny total	117.1070854	3.9224	2.1000		
!47323	-8.318E-06							
!77845	-1.326E-05							Promedio analizado
!24427	-4.389E-05						Bascula [mg]=	113.308
!98488	-3.068E-05						Tasimetro IAV [mg]=	113.564

Figura A.20: Medición de la masa de combustible inyectada del primer evento de inyección.

15. El valor de la masa de combustible inyectada durante el segundo evento de inyección también se calcula automáticamente del mismo modo como se explicó en el punto 14, con la fórmula:

$$=SUMAR.SI.CONJUNTO(E2:E2201,A2:A2201,">="&M3,A2:A2201,"<="&M4)$$

16. El tiempo de inyección del primer evento de inyección se calcula como la diferencia entre el tiempo de inicio de fin de la columna de “Tasa 1” con la fórmula:

$$=K4-K3$$

17. El tiempo de inyección del segundo evento de inyección de la columna “Inj. Time” se calcula como la diferencia entre el tiempo de inicio de fin de la columna de “Tasa 2” con la fórmula:  $=M4-M3$

18. El retraso hidráulico de apertura del primer evento de inyección de la columna “Retraso hidráulico A” se obtiene como la diferencia entre el tiempo de inicio de la “Tasa 1” y el “Pulso 1” con la fórmula:  $=K3-L3$

D	E	J	K	L	M	N	O	P
e (V)	MASA[mg]							
!77845	-9.03E-07		Tasa 1	Pulso 1	Tasa 2	Pulso 2	Bascula	Tasimetro IAV
!38167	-2.239E-05	Inicio de (SO)	1.216	0.995	3.264	3.04	201	201
!83949	1.6475E-05	Fin de (EO)	2.734	1.84	5.669	4.295	300	300
!41218	-1.247E-05							
!19853	3.3031E-05	Manual					Retraso hidraulico A	Retraso hidraulico C
!35115	7.8547E-05	mg	Inj. Time [ms]	Pulso Time [ms]			0.221	0.894
!98488	3.7205E-05	Iny1	42.7723932	1.5181	0.8450		0.224	1.374
!80175	3.1393E-05	Iny2	74.33469216	2.4043	1.255			
!07644	-1.661E-05	Iny total	117.1070854	3.9224	2.1000			
!47323	-8.318E-06							
!77845	-1.326E-05							Promedio analizado
!24427	-4.389E-05						Bascula [mg]=	113.308
!98488	-3.068E-05						Tasimetro IAV [mg]=	113.564

Figura A.21: Medida del retraso hidráulico de apertura y cierre.

19. El retraso hidráulico de cierre del primer evento de inyección de la columna “Retraso hidráulico C” se obtiene como la diferencia entre el tiempo de fin de la “Tasa 1” y el “Pulso 1” con la fórmula:  $=K4-L4$

20. El retraso hidráulico de apertura y cierre del segundo evento de inyección se obtiene del mismo modo como se hizo en los puntos 15 y 16.



21. La masa de combustible inyectada por la báscula y por el tasímetro se registra en las filas “Bascula” y “Tasímetro IAV” respectivamente y se basa en sumar los valores de las columnas “bascula” y “TXT” que se encuentran entre los ciclos considerados (ingresados manualmente) para el análisis de las columnas “Bascula” y “Tasímetro IAV” respectivamente. Las fórmulas empleadas son las siguientes:

	F	G	H	O	P	Q
1	bascula [mg]	TXT	Ciclo			
2	73.3	115.984893		Bascula	Tasímetro IAV	
3	72.6	116.342137		201	201	
4	49.6	116.701957		300	300	
5	75.7	116.830406				
6	51	115.881165	5	Retraso hidraulico A	Retraso hidraulico C	
7	77.7	116.037293	6	0.221	0.894	
8	52.7	116.255566	7	0.224	1.374	
9	81	117.027012	8			
10	82.7	116.509704	9			
11	55.7	115.94529	10			
12	84.5	116.397732	1		<b>Promedio analizado</b>	
13	57	116.051921	1	<b>Bascula [mg]=</b>	<b>113.308</b>	
14	85.7	115.969567	1	<b>Tasímetro IAV [mg]=</b>	<b>113.564</b>	
15	86.9	116.772396	1			
16	58.8	115.93158	15			
17	88.8	116.162701	16			
18	60	116.523472	17			
19	90.6	116.117966	18			

Figura A.22: Masa registrada por la bascula y por el analizador de inyecciones.

Bascula: =SUMAR.SI.CONJUNTO(F2:F2201,H2:H2201,">="&O3,  
H2:H2201,"<="&O4)/(O4-O3+1)

Tasímetro: =SUMAR.SI.CONJUNTO(G2:G2201,H2:H2201,">="&P3,  
H2:H2201,"<="&P4)/(P4-P3+1)

22. Para calcular la dispersión de los datos se calcula el Nivel de confianza al 95% de las 100 repeticiones analizadas. Por lo tanto, se obtiene la masa de combustible inyectada en el primer evento de inyección de la primera repetición considerando el intervalo de tiempo de inicio y fin de la columna “Tasa 1” empleando la fórmula:

$$=SUMAR.SI.CONJUNTO(masas!GT2:GT2201,masas!$A$2:$A$2201, >= "&K$3,masas!$A$2:$A$2201, <=" &K$4)$$

Para el segundo evento de inyección se usa la fórmula:

$$=SUMAR.SI.CONJUNTO(masas!GT2:GT2201,masas!$A$2:$A$2201, >= "&M$3,masas!$A$2:$A$2201, <=" &M$4)$$

J	K	L	M	N	S	T	U	V	W	X	DO	DP	DQ
	Tasa 1	Pulso 1	Tasa 2	Pulso 2			Desv. Stnd.	42.948376	2	3	98	99	100
	Inicio de (SO)	1.216	0.995	3.264	3.04		0.1854382	42.8042478	42.995632	42.7171935	42.8633772	43.3090288	
	Fin de (EO)	2.734	1.84	5.669	4.295		0.3194526	74.875188	74.7640988	73.8284267	74.4761635	74.4581152	
							0.3891813	117.068523	117.679436	117.759731	116.54562	117.339541	117.767144
	Manual					t de student	Promedio	IC_LIM_INF	IC_LIM_SUP				
	mg	Inj. Time [ms]	Pulso Time [ms]			Err. Stnd. 1	0.03679466	42.7723932	42.7355985	42.8091879			
	Iny1	42.7723932	1.5181	0.8450		Err. Stnd. 2	0.0633858	74.3346922	74.2713064	74.398078			
	Iny2	74.33469216	2.4043	1.255		Err. Stnd. 3	0.07722135	117.107085	117.029864	117.184307			
	Iny total	117.1070854	3.9224	2.1000									

Figura A.23: Intervalo de confianza por experimento.

Este proceso se repite para todas las repeticiones realizadas. Enseguida se obtiene la desviación estándar y el promedio de la masa de combustible inyectada de las 100 repeticiones. Por último, se obtiene la “t de student” que nos da el intervalo de confianza del experimento realizado con la fórmula:

$$=1.9842*(U2/RAIZ(100))$$

23. Para obtener la tasa de flujo másico promedio para un pulso de inyección largo en una inyección simple se suman todos los valores de la columna “TASA” que se encuentran entre el intervalo de tiempo obtenido para una tasa del 95% con la fórmula:

$$=PROMEDIO.SI.CONJUNTO(B2:B2201,A2:A2201, >= "&K26,A2:A2201, <=" &K27)$$

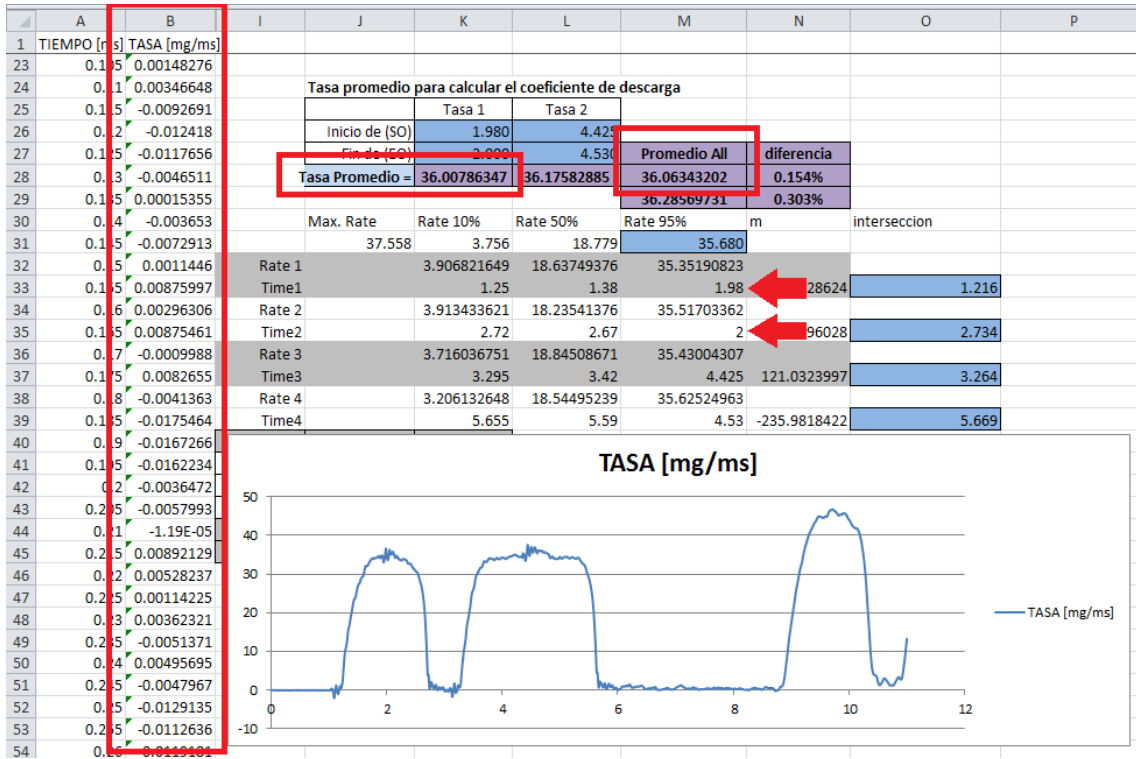


Figura A.24: Tasa de flujo másico promedio.

Nota: En el valor de la tasa promedio de la columna “Promedio All” se toman en cuenta solo los valores mayores o iguales al 95% de la tasa máxima.

## APÉNDICE B

# CALIBRACIÓN

---

En este apéndice se muestra a detalle el procedimiento a seguir para calibrar de forma correcta el tasímetro, teniendo en cuenta todos los pasos y elementos involucrados.

## B.1 CALIBRACIÓN DEL TASÍMETRO

Antes de iniciar una serie de experimentos con el tasímetro se debe calibrar y/o confirmar que esta calibrado para obtener resultados confiables.

1. Se monitorea la Barra de estado, la cual se muestra en la Figura B.1.

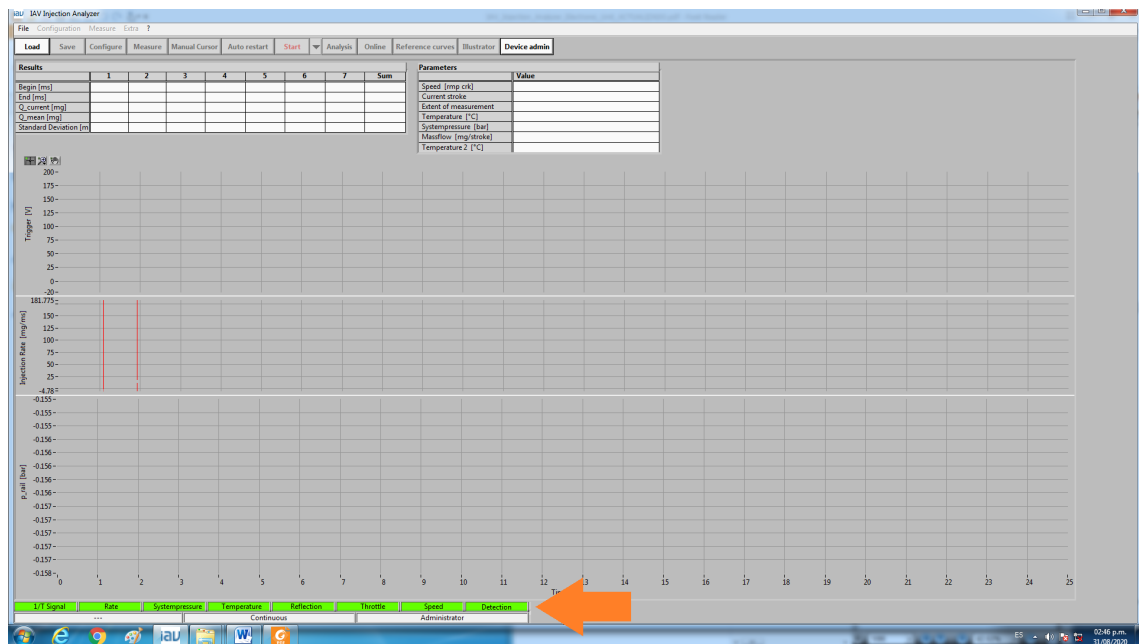


Figura B.1: Tabla de información del software IAV.

La barra de información mostrada en la Figura B.1 establece cada parámetro en color verde, lo cual indica que trabaja correctamente. Sin embargo, en el supuesto caso que estos estén en color amarillo (precaución) o rojo (peligro) se deberá llevar a cabo una calibración del equipo.

2. Para *calibrar el tasímetro* primero se debe abrir el *throttle* de entre 2 y 3 vueltas, cuya ubicación se muestra en la Figura B.2.

Nota: El throttle se abre en el sentido contrario a las manecillas del reloj y se cierra en sentido a favor de las manecillas del reloj.

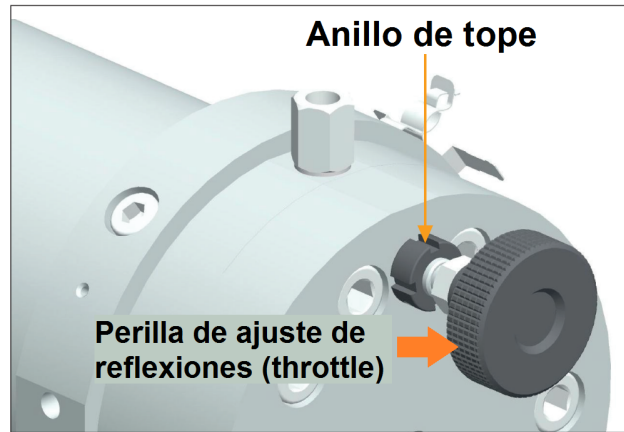


Figura B.2: Ubicación del throttle en el tasímetro.

3. El software del analizador de inyecciones IAV, se pone en modo osciloscópico para observar las reflexiones, como se muestra en la Figura B.3.

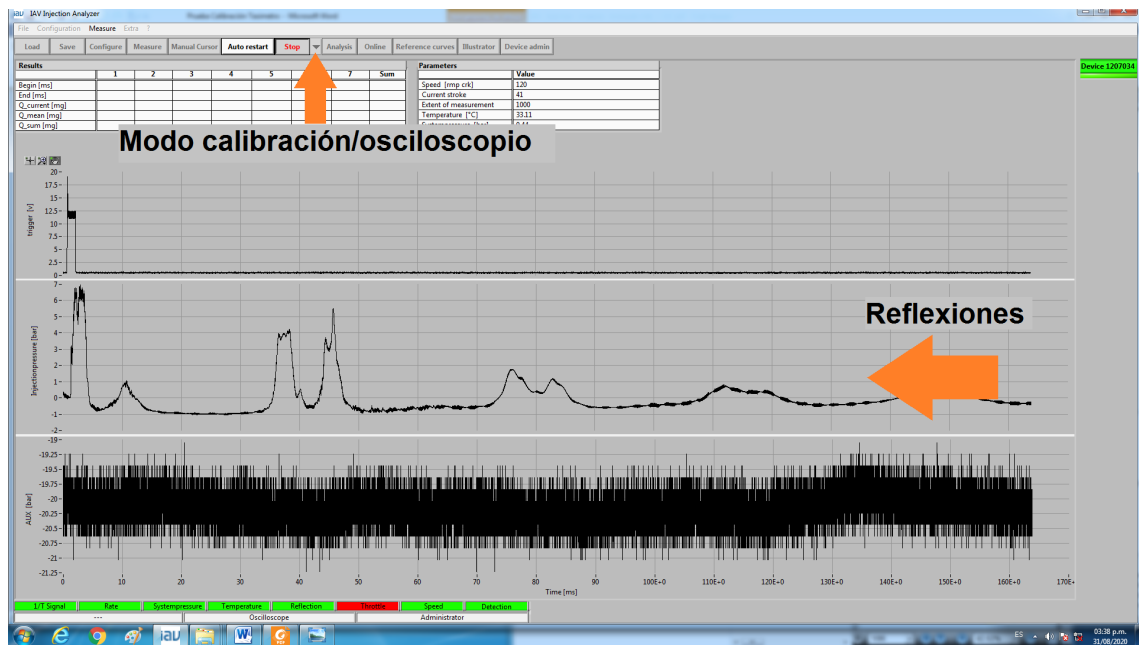


Figura B.3: Visualización de la reflexiones en modo osciloscópico.

Nota: Para cambiar entre modo calibración y osciloscopio hay que hacer clic en el botón *Stop* y enseguida seleccionar el modo deseado.

4. El throttle se debe ajustar de manera suave hasta obtener 4 picos en el software del analizador de inyecciones IAV, tal como se muestra en la Figura B.4.

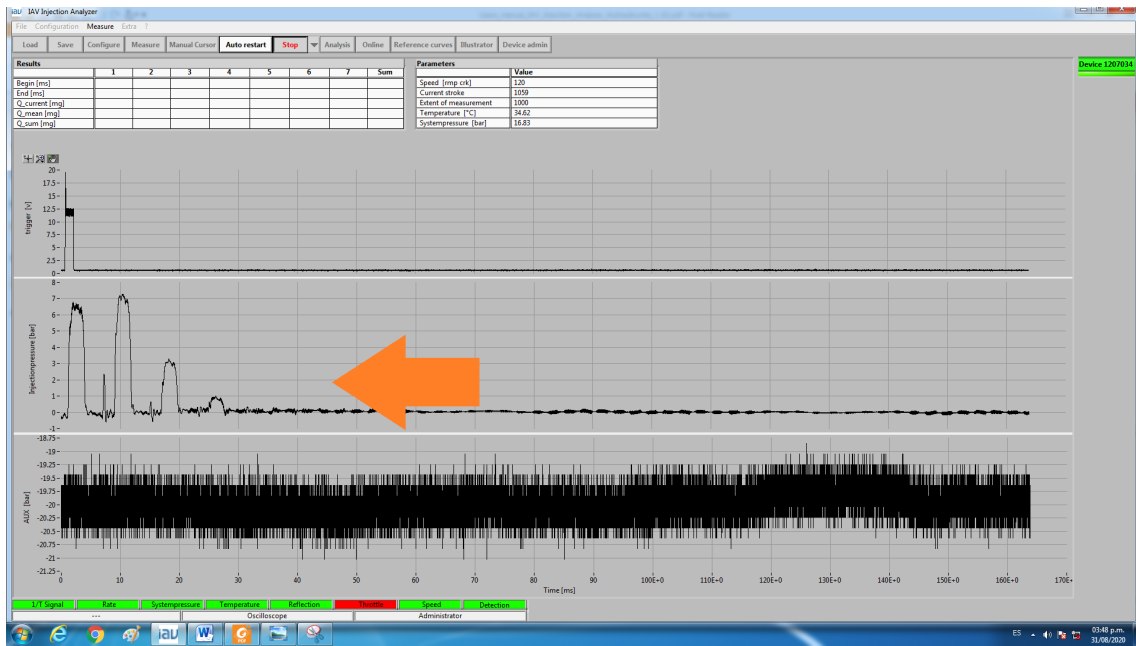


Figura B.4: Inyección y sus reflexiones calibradas en modo osciloscopio.

5. Una vez que todos los parámetros de la barra de información están el color verde se puede establecer que el tasímetro esta calibrado, tal como se muestra en la Figura B.5.

Nota: Para confirmar si la barra de los parámetros esta completamente en color verde hay que cambiar entre modo calibración y osciloscopio una vez que hayan pasado al menos 3 minutos desde que se obtuvieron las reflexiones.

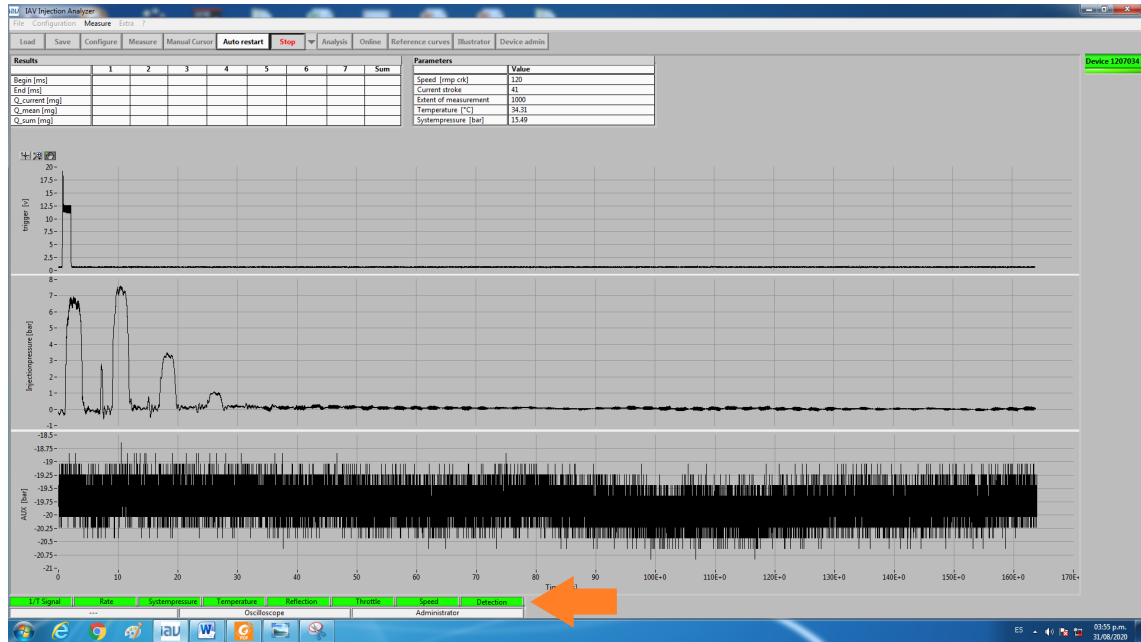


Figura B.5: Señal del tasímetro una vez calibrado.



# BIBLIOGRAFÍA

---

- [1] SENER, «Balance Nacional de Energía 2019», *Informe técnico*, SENER, México, 2021, URL <https://www.gob.mx/sener/documentos/balance-nacional-de-energia-2019>.
- [2] EIA, «Use of diesel», URL <https://www.eia.gov/energyexplained/diesel-fuel/use-of-diesel.php>.
- [3] EIA, «Diesel fuel and the environment», URL <https://www.eia.gov/energyexplained/diesel-fuel/diesel-and-the-environment.php>.
- [4] SEGOB, «NOM-044-SEMARNAT-2017», URL [https://dof.gob.mx/nota\\_detalle.php?codigo=5604713&fecha=11/11/2020](https://dof.gob.mx/nota_detalle.php?codigo=5604713&fecha=11/11/2020).
- [5] PINEDA, L., K. BLUMBERG, M. SCHADE, J. KOUPAL, I. PÉREZ, J. FU, K. HUANG y L. JIN, «Beneficios en calidad del aire y salud por la mejora de normas de emisiones para vehículos y combustibles en México», *icct*, 1(May), 2021, URL <https://theicct.org/publications/mejorar-normas-de-emisiones-mexico-may2021>.
- [6] FLORES, O., M. FABELA, C. BLAKE, D. VÁZQUEZ y R. HERNÁNDEZ, «Regulación de emisiones contaminantes de los motores de combustión interna», URL <https://imt.mx/resumen-boletines.html?IdArticulo=396&IdBoletin=149>.
- [7] WU, B., Q. ZHAN, X. YU, G. LV, X. NIE y S. LIU, «Effects of Miller cycle and variable geometry turbocharger on combustion and emissions in steady

- and transient cold process», *Applied Thermal Engineering*, **118**, págs. 621–629, 2017, URL <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359431116331490>.
- [8] ZHANG, F., Z. WANG, J. TIAN, L. LI, K. YU y K. HE, «Effect of EGR and Fuel Injection Strategies on the Heavy-Duty Diesel Engine Emission Performance under Transient Operation», *Energies*, **13**(3), 2020, URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/3/566>.
- [9] STOUMPOS, S. y G. THEOTOKATOS, «Multiobjective optimisation of a marine dual fuel engine equipped with exhaust gas recirculation and air bypass systems», *Energies*, **13**(19), 2020.
- [10] XIE, L., G. JIANG y F. QIAN, «Experimental Research on Aftertreatment SCR Sizing Strategy for a Nonroad Mid-Range Diesel Engine», *Energies*, **13**(17), 2020, URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/17/4462>.
- [11] DE CASTRO VICENTE, M., *El motor diésel en el automóvil*, tomo 1, Ediciones CEAC, 1987.
- [12] WANG, Z., M. L. WYSZYNSKI, H. XU, N. R. ABDULLAH y J. PIASZYK, «Fuel injection and combustion study by the combination of mass flow rate and heat release rate with single and multiple injection strategies», *Fuel Processing Technology*, **132**, págs. 118–132, 2015, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuproc.2014.11.024>.
- [13] D'AMBROSIO, S. y A. FERRARI, «Diesel engines equipped with piezoelectric and solenoid injectors: hydraulic performance of the injectors and comparison of the emissions, noise and fuel consumption», *Applied Energy*, **211**(July 2017), págs. 1324–1342, 2018, URL <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.11.065>.

- [14] PAYRI, R., J. GIMENO, P. MARTÍ-ALDARAVÍ y A. VIERA, «Measurements of the mass allocation for multiple injection strategies using the rate of injection and momentum flux signals», *International Journal of Engine Research*, 2020.
- [15] PAYRI, R., P. MARTÍ-ALDAVARÍ, T. MONTIEL y A. VIERA, «Influence of aging of a diesel injector on multiple injection strategies», *Applied Thermal Engineering*, **181**, pág. 115 891, 08 2020.
- [16] ARMAS, O., C. MATA y S. MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, «Effect of diesel injection parameters on instantaneous fuel delivery using a solenoid-operated injector with different fuels», *Revista Facultad de Ingenieria*, **1**(64), págs. 9–21, 2012.
- [17] FERRARI, A., A. MITTICA, F. PAOLICELLI y P. PIZZO, «Hydraulic Characterization of Solenoid-actuated Injectors for Diesel Engine Common Rail Systems», *Energy Procedia*, **101**(September), págs. 878–885, 2016.
- [18] BOSCH, W., «The fuel rate indicator: A new measuring instrument for display of the characteristics of individual injection», *SAE Technical Papers*, 1966.
- [19] PAYRI, F. y J. M. DESANTES, *Motores de combustión interna alternativos*, tomo 1, Editorial Reverté, 2011.
- [20] SKOWRON, M., I. PIELECHA y K. WISŁOCKI, «Transient states analysis of CI engine injectors with the use of optical methods», *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, **148**(1), 2016.
- [21] HU, N., J. YANG y P. ZHOU, «Sensitivity analysis of the dynamic response of an electronic fuel injector regarding fuel properties and operating conditions», *Applied Thermal Engineering*, **129**, págs. 709–724, 2018, URL <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.10.071>.
- [22] CAVICCHI, A. y L. POSTRIOTI, «Simultaneous needle lift and injection rate measurement for GDI fuel injectors by laser Doppler vibrometry and Zeuch method», *Fuel*, **285**(June 2020), 2021.

- [23] LÓPEZ, J. J., O. A. DE LA GARZA, J. DE LA MORENA y S. MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, «Effects of cavitation in common-rail diesel nozzles on the mixing process», *International Journal of Engine Research*, **18**(10), págs. 1017–1034, 2017.
- [24] JAVIER LÓPEZ, J., F. J. SALVADOR, O. A. DE LA GARZA y J. ARRÈGLE, «A comprehensive study on the effect of cavitation on injection velocity in diesel nozzles», *Energy Conversion and Management*, **64**, págs. 415–423, 2012.
- [25] GARCIA GRACÍA, B., R. PAYRI MARÍN y G. BRACHO LEÓN, *Caracterización hidráulica de un inyector diésel solenoide para motores dual fuel*, Tesis de Maestría, Universidad Politécnica de Valencia, 2014-2015.
- [26] PAYRI, R., F. J. SALVADOR, J. GIMENO y T. MONTIEL, «Aging of a Multi-Hole Diesel Injector and Its Effect on the Rate of Injection», *SAE Technical Papers*, **2020-April**(April), 2020.
- [27] TARKASTAJA y H. KALEVI, *Simulation Study of a Dual Fuel Injector*, Tesis de Maestría, Tampere University of Technology, 2017.
- [28] RUBIO-GÓMEZ, G., S. MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, L. F. RUA-MOJICA, P. GÓMEZ-GORDO y O. A. DE LA GARZA, «Automatic macroscopic characterization of diesel sprays by means of a new image processing algorithm», *Measurement Science and Technology*, **29**(5), 2018.
- [29] MARTOS, F. J., J. A. SORIANO, C. MATA, O. ARMAS y F. SOTO, «Impact of alternative and fossil diesel fuels on internal flow of injection nozzle», *International Journal of Engine Research*, 2021.
- [30] WU, G., X. ZHOU y T. LI, «Temporal evolution of split-injected fuel spray at elevated chamber pressures», *Energies*, **12**(22), 2019.
- [31] HUANG, W., H. GONG, R. H. PRATAMA, S. MOON, K. TAKAGI y Z. CHEN, «Potential for Shock-Wave Generation at Diesel Engine Conditions and Its Influence on Spray Characteristics», *Energies*, **13**(23), pág. 6465, 2020.

- [32] DESANTES, J. M., J. M. GARCÍA-OLIVER, A. GARCÍA y T. XUAN, «Optical study on characteristics of non-reacting and reacting diesel spray with different strategies of split injection», *International Journal of Engine Research*, **20**(6), págs. 606–623, 2019.
- [33] CORRAL-GÓMEZ, L., G. RUBIO-GÓMEZ, S. MARTÍNEZ-MARTÍNEZ y F. A. SÁNCHEZ-CRUZ, «Effect of diesel-biodiesel-ethanol blends on the spray macroscopic parameters in a common-rail diesel injection system», *Fuel*, **241**(December 2018), págs. 876–883, 2019.
- [34] DESANTES, J. M., V. BERMÚDEZ, J. V. PASTOR y E. FUENTES, «Investigation of the influence of post-injection on diesel exhaust aerosol particle size distributions», *Aerosol Science and Technology*, **40**(1), págs. 80–96, 2006.
- [35] DHANJI, M. y H. ZHAO, «Investigations of split injection properties on the spray characteristics using a solenoid high-pressure injector», *International Journal of Engine Research*, 2021.
- [36] MACIAN, V., V. BERMÚDEZ, R. PAYRI y J. GIMENO, «New Technique for Determination of Internal Geometry of a Diesel Nozzle With the Use of Silicone Methodology», *Experimental Techniques*, **1**(April), págs. 39–43, 2003.
- [37] ALJOHANI, B. S., M. BEN HOUIDI, R. BABAYEV, K. ALJOHANI y B. JOHANSSON, «In Situ Injection Rate Measurement to Study Single and Split Injections in a Heavy-Duty Diesel Engine», *SAE Technical Papers*, **2019-Septe**(September), 2019.
- [38] MONSALVE-SERRANO, J., G. BELGIORNO, G. DI BLASIO y M. GUZMÁN-MENDOZA, «1D simulation and experimental analysis on the effects of the injection parameters in methane–diesel dual-fuel combustion», *Energies*, **13**(14), págs. 1–13, 2020.

- [39] CHACKO, N., S. RAJKUMAR y J. THANGARAJA, «Experimental and modeling analysis of multiple-injection strategies with B20 operation in a CRDI engine», *Fuel*, **293**(February), 2021.
- [40] ABDULLAH, N. y R. NIK, *EFFECTS OF SPLIT INJECTION AND EXHAUST GAS RECIRCULATION STRATEGIES ON COMBUSTION AND EMISSIONS CHARACTERISTICS IN A MODERN V6 DIESEL ENGINE*, Tesis de Maestría, School of Mechanical Engineering The University of Birmingham, 2011.
- [41] FERRARI, A. y T. ZHANG, «Influence of the injector setup on digital and continuous injection rate-shaping performance in diesel engine passenger cars», *Energy Conversion and Management*, **205**(January), pág. 112 259, 2020, URL <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112259>.
- [42] JAYASHRI, N. N., «Mitigation of Emissions through Injection Strategies for CI Engine», *IntechOpen*, **1**, pág. 10, 1 2021, URL <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.96483>.
- [43] LIANG, X., Z. LIU, K. WANG, X. WANG, Z. ZHU, C. XU y B. LIU, «Impact of Pilot Injection on Combustion and Emission Characteristics of a Low-Speed Two-Stroke Marine Diesel Engine», *Energies*, **14**(2), pág. 417, 2021.
- [44] PUNOV, P., T. GECHEV, S. MIHALKOV, P. PODEVIN y D. BARTA, «Experimental study of multiple pilot injection strategy in an automotive direct injection diesel engine», *MATEC Web of Conferences*, **234**(x), págs. 0–4, 2018.
- [45] D'AMBROSIO, S., A. FERRARI, A. MANCARELLA y A. MITTICA, «Effects of Rate-Shaped and Multiple Injection Strategies on Pollutant Emissions, Combustion Noise and Fuel Consumption in a Low Compression Ratio Diesel Engine», *International Journal of Automotive Technology*, **21**, págs. 197–214, 02 2020.

- [46] PAYRI, R., J. M. GARCÍA-OLIVER, V. MENDOZA y A. VIERA, «Analysis of the influence of diesel spray injection on the ignition and soot formation in multiple injection strategy», *Energies*, **13**(13), 2020.
- [47] PLAMONDON, E. y P. SEERS, «Parametric study of pilot–main injection strategies on the performance of a light-duty diesel engine fueled with diesel or a WCO biodiesel–diesel blend», *Fuel*, **236**(July 2018), págs. 1273–1281, 2019.
- [48] PELIĆ, V., T. MRAKOVČIĆ, R. RADONJA y M. VALČIĆ, «Analysis of the impact of split injection on fuel consumption and nox emissions of marine medium-speed diesel engine», *Journal of Marine Science and Engineering*, **8**(10), págs. 1–23, 2020.
- [49] HOW, H. G., H. H. MASJUKI, M. A. KALAM y Y. H. TEOH, «Influence of injection timing and split injection strategies on performance, emissions, and combustion characteristics of diesel engine fueled with biodiesel blended fuels», *Fuel*, **213**(November 2017), págs. 106–114, 2018.
- [50] TIWARI, A. K., *Characterizing Impact of Fuel Quality with Multiple Injection Strategies on CRDI CI Engine Emissions & Performance*, Tesis de Maestría, Indian Institute of Technology Hyderabad, 2016.
- [51] TAŞKIRAN, Ö. O. y M. ERGENEMAN, «Experimental study on diesel spray characteristics and autoignition process», *Journal of Combustion*, **2011**(January 2011), 2011.
- [52] YU, W., W. YANG, K. TAY, B. MOHAN, F. ZHAO y Y. ZHANG, «Macroscopic spray characteristics of kerosene and diesel based on two different piezoelectric and solenoid injectors», *Experimental Thermal and Fluid Science*, **76**, págs. 12–23, 2016, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.expthermflusci.2016.03.008>.
- [53] MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, S., O. A. DE LA GARZA, M. GARCÍA-YERA, R. MARTÍNEZ-CARRILLO y F. A. SÁNCHEZ-CRUZ, «Hydraulic Interactions

- between Injection Events Using Multiple Injection Strategies and a Solenoid Diesel Injector», *Energies*, **14**(11), 2021, URL <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/11/3087>.
- [54] GUEVARA, F., *Estudio de los efectos de las propiedades físicas de las mezclas binarias diésel-biodiésel sobre la características del chorro de combustible líquido*, Tesis de Maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León, 2019.
- [55] GMBH, I., *IAV Injection Analyzer – Hydraulic Units*, IAV, 10 2013.
- [56] SALVADOR, F. J., J. GIMENO y M. CARRERES, «Fuel temperature influence on the performance of a last generation common-rail diesel ballistic injector . Part I : Experimental mass flow rate measurements and discussion», *ENERGY CONVERSION AND MANAGEMENT*, 2016, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.enconman.2016.02.042>.
- [57] PAYRI, R., J. DE LA MORENA, V. PAGANO, A. HUSSAIN, G. SAMMUT y L. SMITH, «One-dimensional modeling of the interaction between close-coupled injection events for a ballistic solenoid injector», *International Journal of Engine Research*, **20**(4), págs. 452–469, 2019.
- [58] ARMAS, O., S. MARTÍNEZ-MARTÍNEZ, C. MATA y C. PACHECO, «Alternative method for bulk modulus estimation of Diesel fuels», *FUEL*, **167**, págs. 199–207, 2016, URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.fuel.2015.11.067>.
- [59] SALVADOR, F. J., A. H. PLAZAS, J. GIMENO y M. CARRERES, «Complete modelling of a piezo actuator last-generation injector for diesel injection systems», *International Journal of Engine Research*, **15**(1), págs. 3–19, 2014.
- [60] PAYRI, R., J. GIMENO, R. NOVELLA y G. BRACHO, «On the rate of injection modeling applied to direct injection compression ignition engines», *International Journal of Engine Research*, **17**(10), págs. 1015–1030, 2016.



- 
- [61] HAO, W., Z. DONGCHANG y L. WANG, «Decoupling analysis on pressure fluctuation and needle valve response for high pressure common rail injector», *MATEC Web of Conferences*, **108**, págs. 1–5, 2017.