



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO
AUTOMOTRIZ**

**“ANÁLISIS DE PRESIONES DE INYECTORES CRI VARIANDO LA FRECUENCIA Y
TIEMPO DE INYECCIÓN”**



AUTOR: BUITRÓN MORENO DANIEL ELÍAS

DIRECTOR: ING. MELO OBANDO JORGE LUIS MSc.

Ibarra-Ecuador

2024

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA**

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	DE	1727109769	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	BUITRON MORENO DANIEL ELIAS	
DIRECCIÓN:	BARRIO OÑATE RAMOS, PEDRO VICENTE MALDONADO – ECUADOR		
EMAIL:	debuitronm@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO:	2392-529	TELF. MOVIL	0983630876

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	ANÁLISIS DE PRESIONES DE INYECTORES CRI VARIANDO LA FRECUENCIA Y TIEMPO DE INYECCIÓN.
AUTOR:	BUITRON MORENO DANIEL ELIAS
FECHA:	2024/12/04
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
DIRECTOR:	ING. MELO OBANDO JORGE LUIS MSc.

AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Yo, *Buitrón Moreno Daniel Elías*, con cédula de identidad Nro. 1727109769, en calidad de autor y titular de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la *Universidad Técnica del Norte*, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 04 días del mes de diciembre de 2024

EL AUTOR:



.....
Buitrón Moreno Daniel Elías

CONSTANCIAS

El autor manifiesta que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que es el titular de los derechos patrimoniales, por lo que asume la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 04 días, del mes de diciembre de 2024

EL AUTOR:



.....
Buitrón Moreno Daniel Elías

CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 04 de diciembre de 2024

Ing. Jorge Melo MSc.

DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

(f)
Ing. Jorge Melo MSc.
C.C.: 1718346529

APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular "*Análisis de presiones de inyectores CRI variando la frecuencia y tiempo de inyección*" elaborado por *Buitrón Moreno Daniel Elías*, previo a la obtención del título del ingeniero automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

(f): .....
Ing. Jorge Melo MSc.
C.C.: 1718346529

(f): .....
Ing. Carlos Mafla MSc.
C.C.: 0401447826

DEDICATORIA

Con el corazón lleno de gratitud y amor, dedico este logro a mi padre, Pedro Buitrón, un hombre cuya sabiduría, esfuerzo y apoyo incondicional han sido los pilares que me han sostenido en cada etapa de este recorrido. Sus enseñanzas no solo me guiaron en este proyecto, sino que también me inspiraron a superar cada desafío con determinación y valentía.

A mi madre, Esperanza Moreno, quien, con su inmenso amor, paciencia y ejemplo de fortaleza, ha sido mi refugio en los momentos difíciles y mi mayor inspiración para seguir adelante. Su confianza en mí y su fe inquebrantable en mis capacidades han sido fundamentales para alcanzar este sueño.

A mis hermanas, Karina y Grey, por ser más que hermanas, compañeras de vida. Su apoyo constante, sus palabras de aliento y su confianza en mí me han recordado siempre el valor de la familia y la importancia de nunca rendirse.

A mis hermanos, Anderson y Ángel Gabriel, quienes ocupan un lugar especial en mi corazón. Anderson, gracias por estar a mi lado, por compartir tus conocimientos y por tu incondicional respaldo. En especial, a mi hermanito Ángel Gabriel, cuya ternura, alegría y amor puro son un faro de luz en mi vida. Él es mi mayor inspiración, un recordatorio constante de por qué vale la pena luchar por los sueños y un símbolo de esperanza en mi camino.

A mi familia, mi mayor fortaleza y el eje sobre el cual gira todo lo que soy. Cada logro que obtengo es también suyo, porque han sido ustedes quienes con su amor, unidad y valores me han dado las herramientas para llegar hasta aquí. Este proyecto, más que un trabajo culminado, es una dedicación al esfuerzo, al amor y a los lazos que me unen con ustedes.

AGRADECIMIENTO

Agradezco, en primer lugar, a Dios, cuya guía y fortaleza han sido fundamentales en cada etapa de este camino, iluminando mi vida y permitiéndome alcanzar este importante logro.

A la Universidad Técnica del Norte, institución que me brindó los conocimientos, herramientas y el entorno necesario para mi formación académica y personal, contribuyendo de manera decisiva a mi desarrollo profesional.

Mi más sincero agradecimiento al Ing. Carlos Mafla MSc, por su guía, dedicación y sabiduría durante mi formación. Su compromiso y apoyo constante han sido un pilar fundamental en este proceso, motivándome a alcanzar la excelencia. De igual manera, al Ing. Jorge Melo MSc, agradezco profundamente su apoyo y enseñanzas, que fueron clave para el desarrollo de este proyecto.

A mis padres y a mi familia, por su amor incondicional, sacrificio y constante apoyo. Ustedes han sido mi mayor fortaleza, mi inspiración diaria y la razón principal de este logro. Cada paso que he dado ha sido con el orgullo de llevar siempre su respaldo y cariño como mi mayor motor.

Finalmente, expreso mi especial gratitud a Lisbeth Suárez, cuya generosidad y apoyo inquebrantable marcaron una gran diferencia en este proceso. Su mano extendida y su confianza en mí son algo que siempre recordaré con aprecio y gratitud.

A todos los que de alguna manera contribuyeron a este logro, mi más sincero agradecimiento.

RESUMEN EJECUTIVO

Los inyectores electrónicos desempeñan un papel crucial en la eficiencia y rendimiento del motor. Este proyecto se enfoca en estudiar las presiones y caudales de los inyectores del vehículo Mazda BT-50 2.5 CRDi, mediante la variación de la frecuencia y el tiempo de inyección. El objetivo es analizar las presiones de los inyectores CRI variando la frecuencia y tiempo de inyección, para diagnosticar el estado de los inyectores mediante Machine Learning. Se realizó una campaña experimental utilizando equipos especializados: banco de inyección, simulador de pulsos de inyección, fuente de voltaje variable y manómetros. Se establecieron tres tiempos de inyección (1 ms, 1.5 ms y 2 ms) y se evaluaron en un rango de frecuencias de 1 Hz a 15 Hz para cada tiempo, donde se analiza la variación en el caudal de inyección, retorno y presión del riel común. Además, se diseñó un modelo de diagnóstico predictivo del inyector por algoritmo de clasificación. Mediante un análisis de regresión se determinó que el tiempo de inyección para los tres parámetros tiene mayor influencia en comparación de la frecuencia. Además, al incrementar la frecuencia y tiempo de inyección, los caudales de inyección y retorno tienden a incrementar, por otro lado, la presión del riel tiene un efecto inverso. Por medio de Machine Learning se obtuvo un modelo de diagnóstico predictivo con una eficacia del 97.8% basado en la clasificación del estado del inyector, el cual fue entrenado mediante una base de datos que tiene 6 variables y cada variable tiene 135 muestras.

Palabras clave: Inyector CRI, frecuencia, tiempo de inyección, caudal de inyección, caudal de retorno, presión del riel común, Machine Learning.

ABSTRACT

Electronic injectors play a crucial role in engine efficiency and performance. This project focuses on studying the pressures and flow rates of the injectors in the Mazda BT-50 2.5 CRDi vehicle by varying the injection frequency and duration. The objective is to analyze the pressures of CRI injectors by altering frequency and injection time to diagnose the state of the injectors using Machine Learning. An experimental campaign was conducted with specialized equipment: an injection test bench, an injection pulse simulator, a variable voltage source, and pressure gauges. Three injection durations (1 ms, 1.5 ms, and 2 ms) were established and evaluated within a frequency range of 1 Hz to 15 Hz for each duration, analyzing variations in injection flow rate, return flow rate, and common rail pressure. Additionally, a predictive diagnostic model for the injectors was designed using a classification algorithm. Regression analysis determined that injection duration has a greater influence on the three parameters compared to frequency. Moreover, as frequency and injection duration increase, injection and return flow rates tend to rise, while common rail pressure exhibits an inverse effect. Using Machine Learning, a predictive diagnostic model with 97.8% accuracy was developed, based on the classification of the injector's state. This model was trained on a dataset containing six variables, each with 135 samples.

Keywords: CRI injector, frequency, injection time, injection flow rate, return flow rate, common rail pressure, Machine Learning.

LISTA DE SIGLAS

S1: Sistema Internacional de Unidades

ECU. Unidad de Control Electrónico

RPM. Revoluciones por Minuto

CRDI. Inyección Directa por Conducto Común

CRI. Inyector de Conducto Común

DRV. Válvula Limitadora de Presión

ÍNDICE DE CONTENIDOS

RESUMEN EJECUTIVO.....	viii
ABSTRACT.....	ix
INTRODUCCIÓN.....	1
Problema de Investigación.....	1
Justificación.....	2
Objetivos.....	3
Objetivo General.....	3
Objetivos Específicos.....	3
Alcance.....	4
CAPÍTULO 1.....	6
1 Marco Teórico.....	6
1.1 Sistema de Inyección Diésel CRDi.....	6
1.2 Funcionamiento del Sistema CRDi.....	6
1.2.1 Circuito de Baja Presión.....	7
1.2.2 Circuito de Alta Presión.....	7
1.3 Inyector.....	8
1.4 Inyector Mecánico Diésel.....	8
1.5 Inyector Electrónico.....	8
1.5.1 Operación del Inyector.....	9
1.5.2 Partes del Inyector.....	10
1.5.3 Funcionamiento Mecánico del Inyector.....	11
1.5.3.1 Fase de Reposo (Inyector Cerrado).....	11
1.5.3.2 Fase de Inyección (Inicio de Apertura del Inyector).....	11
1.5.3.3 Inyector Totalmente Abierto.....	12
1.5.3.4 Fase Final del Inyector (Cierre del Inyector).....	13
1.5.4 Funcionamiento Electrónico del Inyector.....	13
1.5.4.1 Corriente de Apertura.....	13
1.5.4.2 Corriente de Mantenimiento.....	13
1.5.4.3 Curva del Voltaje de Activación.....	14
1.5.5 Tiempo de Inyección.....	15

1.5.6	Frecuencia de Operación.....	16
1.6	Despiece del Inyector CRI.....	16
1.7	Averías en los Inyectores CRI.....	17
1.8	Aprendizaje Automático	18
1.8.1	Clasificación del Aprendizaje Automático	19
1.8.2	Algoritmos de Aprendizaje Automático	19
1.9	Medidas Estadísticas	20
1.9.1	Curtosis	20
1.9.2	Regresión	21
CAPÍTULO II.....		24
2	MATERIALES Y MÉTODOS.....	24
2.1	Materiales.....	25
2.1.1	Motor Mazda BT-50 2.0 CRDi del año 2012	25
2.1.2	Inyectores CRI	25
2.1.3	Generador de Pulsos de Inyectores CRI200	26
2.1.4	Manómetro de Baja Presión	27
2.1.5	Manómetro de Alta Presión	28
2.1.6	Cañerías de Inyección	28
2.1.7	Válvula Limitadora de Presión DRV.....	29
2.1.8	Fuente de Voltaje Variable (WANPTEK KBS3010DF)	30
2.1.9	Riel de Alta Presión	31
2.1.10	Bomba de Inyección.....	31
2.1.11	Software Excel	32
2.1.12	Software MATLAB®	32
2.2	Método.....	33
2.3	Metodología Experimental para la Configuración y Pruebas	35
2.3.1	Instalación de Equipos Mecánicos y Eléctricos	36
2.3.1.1	Conexión de Componentes Mecánicos.....	36
2.3.1.2	Instalación de Equipos Eléctricos	37
2.3.2	Configuración de los Equipos	37
2.3.2.1	Configuración General para Todas las Pruebas	38
2.3.2.2	Configuración Individual para Cada Prueba.....	38

2.3.3	Metodología para el Registro de Variables.....	39
2.3.3.1	Registro del Voltaje en la DRV.....	40
2.3.3.2	Registro de la Corriente en la DRV.....	40
2.3.3.3	Registro de la Presión del Riel.....	40
2.3.3.4	Medición del Caudal de Inyección y del Caudal de Retorno.....	40
2.3.3.5	Preparación para la Prueba Siguiete.....	41
2.4	Recopilación de Datos.....	41
2.4.1	Pruebas del Inyector 0445110 250 Nuevo.....	41
2.4.2	Pruebas en el Inyector 0445110 250 Usado.....	42
2.4.3	Pruebas del Inyector 0445110 250 Averiado.....	43
2.5	Aplicación de Métodos Estadísticos en el Estudio.....	44
2.5.1	Preparación de la base de Datos en Excel.....	45
2.5.2	Aplicación de Curtosis.....	46
2.5.3	Configuración del Modelo de Regresión.....	47
2.5.3.1	Generación de la Ecuación del Modelo de Regresión.....	48
2.6	Implementación de Algoritmos de Clasificación en Aprendizaje Automático.....	49
2.6.1	Importación de datos en MATLAB®.....	50
2.6.2	Uso de Modelos de Clasificación en Aprendizaje Automático.....	51
2.6.3	Procedimiento de Validación y Análisis del Modelo.....	53
2.6.4	Selección de Redes Neuronales para Modelo Predictivo.....	54
2.6.5	Generación de la Ecuación de Predicción del Modelo Entrenado.....	54
CAPÍTULO III.....		56
3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
3.1	Análisis Estadístico del Estado de Operación del Inyector.....	56
3.1.1	Caudal de Inyección.....	57
3.1.1.1	Análisis Estadístico Curtosis.....	58
3.1.1.2	Análisis Estadístico Regresión Lineal Múltiple.....	58
3.1.2	Caudal de Retorno.....	61
3.1.2.1	Análisis Estadístico Curtosis.....	62
3.1.2.2	Análisis Estadístico Regresión Lineal Múltiple.....	62
3.1.3	Presión del Riel Común.....	66
3.1.3.1	Análisis Estadístico Curtosis.....	66
3.1.3.2	Análisis Estadístico Regresión Lineal Múltiple.....	67

3.2	Análisis del Comportamiento de los Inyectores.....	70
3.2.1	Caudal de Inyección.....	70
3.2.1.1	Inyector Nuevo	70
3.2.1.2	Inyector Usado.....	72
3.2.1.3	Inyector Averiado.....	73
3.2.2	Caudal de Retorno.....	74
3.2.2.1	Inyector Nuevo	75
3.2.2.2	Inyector Usado.....	77
3.2.2.3	Inyector Averiado.....	79
3.2.3	Presión del Riel Común	80
3.2.3.1	Inyector Nuevo	81
3.2.3.2	Inyector Usado.....	82
3.2.3.3	Inyector Averiado.....	84
3.2.4	Comparativa del Inyector Nuevo, Usado y Averiado.....	85
3.3	Diagnóstico Predictivo del Inyector por Algoritmo de Clasificación	91
3.3.1	Entrenamiento del Modelo.....	91
3.3.2	Resultados del Entrenamiento.....	92
3.3.3	Función Predictora en el Modelo Clasificador de Inyectores N, U y A	96
3.3.4	Ejecución del Modelo de Diagnostico Predictivo.....	97
CAPÍTULO IV.....		99
4	Conclusiones y Recomendaciones	99
4.1	Conclusiones	99
4.2	Recomendaciones.....	101

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Partes del Inyector CRI.....	10
Tabla 2. Ecuaciones estadísticas de regresión lineal múltiple	22
Tabla 3. Especificaciones técnicas del motor MAZDA BT-50 CRDi.....	25
Tabla 4. Especificaciones del generador CRI200.....	27
Tabla 5. Especificaciones del manómetro de baja presión	27
Tabla 6. Especificaciones del manómetro de alta presión	28
Tabla 7. Especificaciones de la válvula reguladora de presión.....	29
Tabla 8. Especificaciones de la fuente de energía variable WANPTEK KBS3010DF.....	30
Tabla 9. Especificaciones técnicas de la bomba CP1	32
Tabla 10. Variables de estudio para el análisis estadístico	34
Tabla 11. Variables de estudio para el modelo entrenado por algoritmo de clasificación	34
Tabla 12. Pruebas del inyector nuevo variando la frecuencia y tiempo de inyección	42
Tabla 13. Pruebas del inyector usado variando la frecuencia y tiempo de inyección.....	43
Tabla 14. Pruebas del inyector averiado variando la frecuencia y tiempo de inyección	44
Tabla 15. Resultados de curtosis para el caudal de inyección	58
Tabla 16. Estadísticas de regresión para el caudal de inyección	58
Tabla 17. Análisis de varianza para el caudal de inyección.....	59
Tabla 18. Coeficientes de regresión para el caudal de inyección	60
Tabla 19. Resultados de curtosis para el caudal de retorno	62
Tabla 20. Estadísticas de regresión para el caudal de retorno	63
Tabla 21. Análisis de varianza para el caudal de retorno.....	64
Tabla 22. Coeficientes de regresión para el caudal de retorno	64
Tabla 23. Resultados de curtosis para la presión del riel común	66
Tabla 24. Estadísticas de regresión para la presión del riel	67
Tabla 25. Análisis de varianza para la presión del riel	68
Tabla 26. Coeficientes de regresión para la presión del riel	68

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Problemas en inyectores CRDi.....	2
Figura 2. Sistema de Inyección Diésel CRDi	6
Figura 3. Principio de funcionamiento	10
Figura 4. Fase de activación de corriente y voltaje.....	14
Figura 5. Detalle de la curva del voltaje de activación	15
Figura 6. Tiempo de inyección	15
Figura 7. Despiece del inyector CRI.....	17
Figura 8. Proceso de la metodología del estudio	24
Figura 9. Inyector 0445110 250.....	26
Figura 10. Generador de Pulsos de Inyectores CRI200.....	26
Figura 11. Manómetro de baja presión	27
Figura 12. Manómetro de alta presión	28
Figura 13. Cañería de inyección	29
Figura 14. Válvula limitadora de presión DRV.....	29
Figura 15. Fuente de Voltaje Variable WANPTEK KBS3010DF	30
Figura 16. Riel de alta presión	31
Figura 17. Bomba de inyección CP1	31
Figura 18. Flujograma de la metodología aplicada.....	35
Figura 19. Flujograma para instalación de equipos mecánicos y eléctricos	36
Figura 20. Flujograma para configuración de los equipos.....	37
Figura 21. Flujograma para el registro de variables	39
Figura 22. Flujograma para la aplicación de métodos estadísticos.....	45
Figura 23. Estructura de la base de datos para la regresión	46
Figura 24. Función de curtosis en Excel	47
Figura 25. Funciones para análisis de datos	47
Figura 26. Interfaz de la configuración de la regresión	48
Figura 27. Flujograma para la aplicación del modelo predictivo por Aprendizaje Automático .	50
Figura 28. Selección de archivo en MATLAB®.....	51
Figura 29. Configuración e importación de datos en MATLAB®.....	51
Figura 30. Método de aprendizaje en MATLAB®.....	52

Figura 31. Preparación de datos para el modelo de inyectores.....	52
Figura 32. Validación del modelo con particiones de datos.....	53
Figura 33. Clasificadores de redes neuronales (Neural Network Classifiers)	54
Figura 34. Opción de clasificaciones	54
Figura 35. Ecuación generada por el modelo entrenado.....	55
Figura 36. Tabla por defecto de resultados de clasificación	55
Figura 37. QQ de residuales del modelo de caudal de inyección	61
Figura 38. QQ de residuales del modelo de caudal de retorno	65
Figura 39. QQ de residuales del modelo de presión del riel común	69
Figura 40. Caudal de inyección del inyector nuevo según frecuencia y tiempo de inyección	71
Figura 41. Caudal de inyección del inyector usado según frecuencia y tiempo de inyección.....	73
Figura 42. Caudal de inyección del inyector averiado según frecuencia y tiempo de inyección	74
Figura 43. Caudal de retorno del inyector nuevo según frecuencia y tiempo de inyección	76
Figura 44. Caudal de retorno del inyector usado según frecuencia y tiempo de inyección.....	78
Figura 45. Caudal de retorno del inyector averiado según frecuencia y tiempo de inyección	80
Figura 46. Presión del riel del inyector nuevo según frecuencia y tiempo de inyección.....	82
Figura 47. Presión del riel del inyector usado según frecuencia y tiempo de inyección	83
Figura 48. Presión del riel del inyector averiado según frecuencia y tiempo de inyección.....	85
Figura 49. Frecuencia vs. caudal de inyección/retorno y presión del riel común a 1 ms de tiempo de inyección	88
Figura 50. Frecuencia vs. caudal de inyección/retorno y presión del riel común a 1.5 ms de tiempo de inyección	89
Figura 51. Frecuencia vs. caudal de inyección/retorno y presión del riel común a 2 ms de tiempo de inyección	90
Figura 52. Desempeño y configuración del Modelo Bilayered Neural Network	92
Figura 53. Grafica de dispersión del modelo entrenado	93
Figura 54. Matrix de confusión del modelo entrenado.....	94
Figura 55. Curva ROC del modelo entrenado	95
Figura 56. Coordenadas paralelas del modelo entrenado	96
Figura 57. Ecuación generada del modelo entrenado.....	97
Figura 58. Desempeño del modelo de clasificación para inyectores 0445110 250	98

ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación (1). Curtosis	20
Ecuación (2). Regresión lineal múltiple.....	21
Ecuación (3). Regresión según frecuencia y tiempo de inyección del inyector	49
Ecuación (4). Regresión para caudal de inyección del inyector nuevo	61
Ecuación (5). Regresión para caudal de inyección del inyector usado	61
Ecuación (6). Regresión para caudal de inyección del inyector averiado.....	61
Ecuación (7). Regresión para caudal de retorno del inyector nuevo	65
Ecuación (8). Regresión para caudal de retorno del inyector usado	66
Ecuación (9). Regresión para caudal de retorno del inyector averiado.....	66
Ecuación (10). Regresión para presión del riel común del inyector nuevo	69
Ecuación (11). Regresión para presión del riel común del inyector usado	69
Ecuación (12). Regresión para presión del riel común del inyector averiado	69

ÍNDICE DE ANEXOS

	Pág.
Anexo 1. Formatos de registro de datos	108
Anexo 1.1. Formato de registro de datos de pruebas de inyectores	108
Anexo 1.2. Formato de registro de tabla para los análisis estadísticos.....	108
Anexo 1.3. Formato para registro y preparación de datos de entrenamiento en MATLAB®....	108
Anexo 2. Base de datos para el entrenamiento del modelo en Aprendizaje Automático.....	109
Anexo 3. Tabla de los residuales para los tres inyectores.	111
Anexo 4. Código del sistema basado en inyectores.....	112

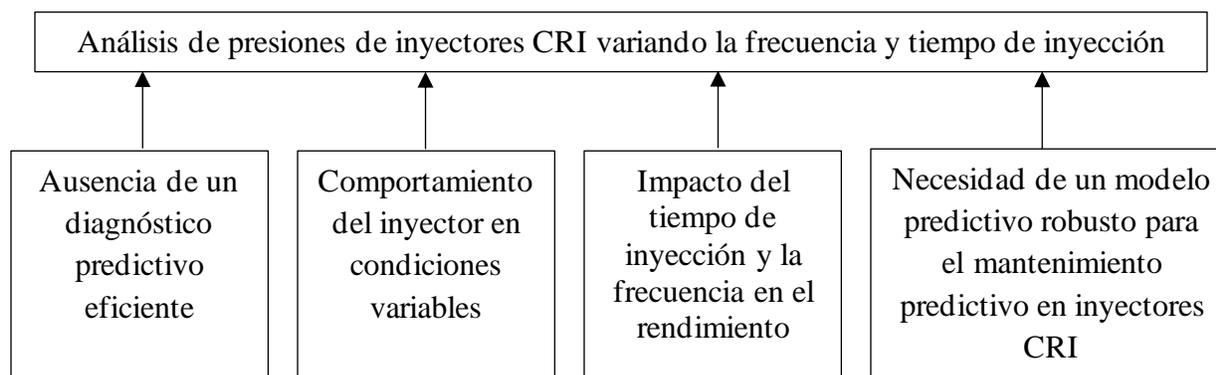
INTRODUCCIÓN

Problema de Investigación

Los inyectores son uno de los elementos principales para que se pueda realizar la combustión, por ello se debe tener un mantenimiento predictivo a estos componentes. Los motores CRDi tienden a sufrir averías mayormente en el sistema de alimentación, tales como: exceso de humos negros, elevado consumo de combustible, disminución de potencia, entre otros. Esto es debido por el desgaste y daños en la superficie de la aguja de los inyectores, debido por la acumulación de depósitos orgánicos e inorgánicos y de cavitación [1]. En Ecuador, existen varios factores que afectan el rendimiento de los inyectores y en consecuencia provoca fallas en el mismo [2]. Uno de los principales factores que afecta a estos componentes es la baja calidad del combustible, el cual tiende a tener presencia de agua y adicionalmente por falta de un plan de mantenimiento predictivo a estos elementos [3].

Los inyectores trabajan con altas presiones y con tolerancias de trabajo muy reducidas, por ello tienden a ser los elementos que presentan mayor daño y desgaste prematuro, ocasionando una cadena de deficiencias en el motor, las cuales son: un mayor consumo de combustible, mayor cantidad de gases de escape y pérdidas de potencia. De tal forma que esto puede generar paradas no programadas del motor, produciendo que los vehículos en plena operación se detengan y no puedan operar hasta ser reparados [4]. En nuestro medio para hacer un diagnóstico en los inyectores se necesita extraerlos y desarmarlos, es decir, el motor estará parado por un determinado tiempo y con ello se producirá pérdidas económicas por el tiempo que el motor este fuera de su funcionamiento. En la Figura 1 se muestra el planteamiento del problema.

Figura 1. Problemas en inyectores CRDi



Justificación

En el Ecuador existe una gran cantidad de vehículos que utilizan inyectores CRI, esto es debido a las exigencias relacionadas sobre el medio ambiente, estos inyectores presentan mejoras significativas en el rendimiento y eficiencia del motor. Por ende, son elementos importantes en el sistema de inyección directa de los motores a diésel.

Actualmente los vehículos Mazda BT-50 que son comercializados en el Ecuador están equipados con un sistema de inyección electrónica, los cuales incorporan inyectores CRI en su sistema de inyección. Ya que, como se mencionó antes este sistema es eficiente y cumple con las normativas ambientales emitidas por el gobierno nacional.

El inyector al ser un elemento que trabaja bajo altas presiones y bajas tolerancias de trabajo, tienden a padecer daños en su estructura, afectando el funcionamiento y rendimiento del motor. A esto, se le debe sumar factores como la mala calidad de los hidrocarburos, una mala práctica de conducción por parte de los usuarios de los vehículos, un erróneo mantenimiento preventivo y correctivo. Por tal motivo, es crucial llevar un mantenimiento predictivo con el fin de mantener en óptimo estado a estos componentes para lograr su correcto funcionamiento en todo momento.

El presente proyecto pretende hacer un análisis enfocado en la parte electrónica de los inyectores mediante diversos equipos de diagnóstico, para luego ser procesados por medio del

método de elementos finitos con el fin de obtener datos específicos del estado actual de un inyector e identificar sus averías más comunes que puede presentar. Al final este estudio proporcionara información para enseñar o capacitar a los técnicos y, futuras generaciones sobre un correcto mantenimiento predictivo y sobre las averías más comunes de los inyectores CRI.

Este proyecto se enfoca en mejorar la matriz productiva, ya que, en nuestro país hay varios factores que afectan la tasa de empleo relacionado con el diagnóstico de los inyectores, esto es debido a una mala práctica al momento que se realiza un mantenimiento en el inyector debido a una desinformación al respecto de este componente, entre otros factores. El Plan Creando Oportunidades 2021-2025 hace referencia a las prioridades del país, las cuales están organizadas en 5 ejes, 16 objetivos, 55 políticas y 130 metas, de manera que rigiéndose a estas directrices este proyecto se enfoca en el primer y el doceavo objetivo. El primer objetivo se encuentra dentro del eje económico y generación de empleo, el cual menciona “Incrementar y fomentar, de manera inclusiva, las oportunidades de empleo y las condiciones laborales”. El doceavo objetivo se encuentra en el eje de transición ecológica, este menciona que se debe “Fomentar modelos de desarrollo sostenibles aplicando medidas de adaptación y mitigación al cambio climático” [5].

Objetivos

Objetivo General

Analizar las presiones de inyectores CRI variando la frecuencia y tiempo de inyección, para identificar las averías más comunes y su mantenimiento predictivo en los inyectores de la Mazda BT-50.

Objetivos Específicos

- Investigación bibliográfica del funcionamiento mecánico y electrónico de los inyectores CRI.

- Medición de datos de voltaje, amperaje, presiones de retorno variando frecuencia y tiempo de inyección.
- Procesamiento de datos obtenidos por medio de métodos finitos para identificar averías de los inyectores.

Alcance

Este proyecto está enfocado en el análisis del inyector CRI variando parámetros como el tiempo de inyección junto con la frecuencia, el cual contribuirá en identificar las averías más comunes que tienden a sufrir los inyectores CRI de un motor diésel Mazda BT-50. Este análisis se enfoca en comparar tres inyectores de la misma marca, los cuales cada uno se encontrará en un estado diferente de funcionamiento, es decir: el primer inyector estará en perfectas condiciones de trabajo, el segundo a medio uso y el tercero en mal estado.

Para esto se debe realizar una investigación en diferentes fuentes referente al estado del arte de los inyectores CRI, esto ayuda a tener el conocimiento sobre su funcionamiento mecánico, pero principalmente en el electrónico como el voltaje y amperaje. De tal forma que, por medio del estado del arte se identifica el funcionamiento y las averías que tienden a sufrir estos inyectores.

Con el uso de equipos de diagnóstico especializados para CRI (inyectores common rail) se obtiene datos importantes de los inyectores, tales como: voltaje, amperaje y presiones de retorno. Dicho esto, se realiza cien pruebas eléctricas de forma independiente en cada uno de los tres inyectores variando la frecuencia y tiempo de inyección. Con esto se obtiene los datos necesarios para luego poder ser procesados.

El procesamiento de datos obtenidos de las pruebas eléctricas de cada uno de los inyectores se lo lleva a cabo por medio del método de elementos finitos, donde se ingresa los cien datos antes obtenidos. Esto permite procesar los datos e identificar cuáles son las averías que puede presentar

un inyector CRI. Con esto se podrá realizar un análisis para saber el estado de funcionamiento en que se encuentren los inyectores sin la necesidad de ser retirados del motor y desarmados.

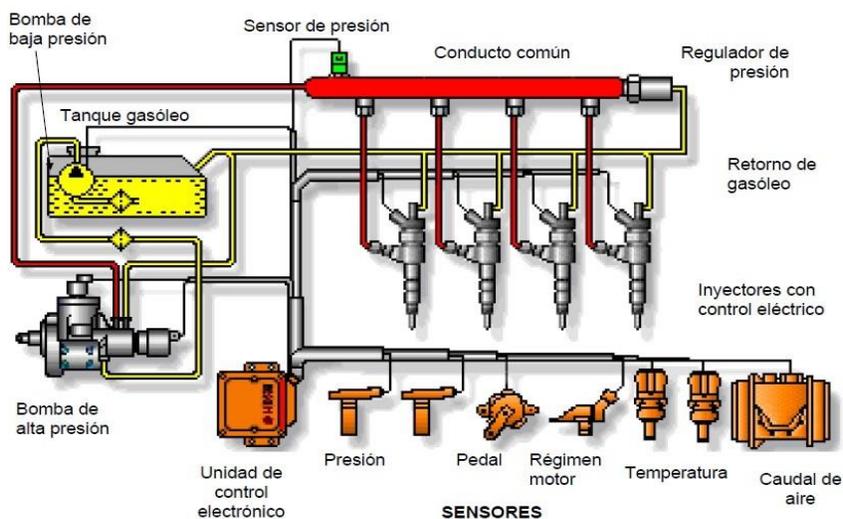
CAPÍTULO 1

1 Marco Teórico

1.1 Sistema de Inyección Diésel CRDi

En el sistema CRDi el combustible pasa por medio de una zona donde su presión tiende a ser de baja presión y una zona donde su presión tiende a ser de alta presión que fluctúa entre los 1750 bares hasta llegar a la cámara de combustión. En la Figura 2 se muestran los componentes de ambas zonas, para la zona o circuito de alta presión se tiene los siguientes elementos: bomba de inyección, conducto común, inyectores electrónicos y cañerías de inyección de alta presión. Por otro lado, en el circuito de baja presión se encuentra elementos como: bomba de transferencia, reservorio de combustible, filtro de combustible, cañerías en la zona de baja presión y el retorno de combustible [6].

Figura 2. Sistema de Inyección Diésel CRDi



Nota: Adaptado de Sistema CRDi [7].

1.2 Funcionamiento del Sistema CRDi

El sistema de inyección directa por riel común (CRDi) es controlado electrónicamente por medio de la ECU manteniendo el combustible en el riel común a una alta presión determinada [8].

Su funcionamiento está constituido por medio de varios componentes que se encuentran distribuidos en zonas específicas del sistema CRDi como se observa en la Figura 2, empezando en el reservorio del combustible y en su interior se encuentra situado la bomba de transferencia de combustible [9]. Esta bomba aspira el combustible del reservorio y lo suministra a la bomba de inyección, la cual se encuentra unida al cigüeñal mediante un mecanismo definido que cuenta con una relación establecido por el fabricante de cada motor [10].

En los motores diésel con sistema CRDi se encuentra un riel común encargado de almacenar el combustible a una elevada presión y posteriormente el combustible es enviado hacia los inyectores. Al trabajar con altas presiones en los inyectores se recurre a unos pequeños orificios distribuidos radialmente en la tobera, esto permite una atomización adecuada del combustible generando una combustión más eficiente en comparación de un inyector que trabaja a menores presiones. Además, la ECU controla la apertura de los inyectores provocando un mejor funcionamiento y a su vez reduciendo considerablemente los niveles de emisiones de gases de escape [11].

1.2.1 Circuito de Baja Presión

Trabaja bajo una presión de 6 bares aproximadamente y su principal función es llevar el combustible que se encuentra almacenado en el tanque o depósito del combustible hasta la bomba de inyección, cruzando por medio de los filtros de combustible y el filtro separador de agua y finalmente alcanza el punto de entrada a la bomba de inyección [12].

1.2.2 Circuito de Alta Presión

Dependiendo de las condiciones de trabajo y funcionamiento la bomba de alta presión envía el combustible a una presión aproximada de 1 600 bares, la cual es supervisada por la válvula

reguladora de presión (DRV) hasta llegar al riel común. El riel común es controlado por medio del sensor de presión en el riel y posteriormente se distribuye el combustible a los inyectores [13].

1.3 Inyector

El objetivo principal del inyector es realizar una correcta pulverización del combustible, con el fin de obtener una correcta distribución del combustible en la cámara de combustión. Para ello, es importante que el combustible adquiera una velocidad específica y que la relación entre la longitud-diámetro del orificio del inyector tenga un valor establecido [14].

1.4 Inyector Mecánico Diésel

El inyector mecánico diésel es un conjunto diseñado que tiene como finalidad lograr una atomización del combustible. La activación de los inyectores es por medio de la presión del combustible, esta presión es determinada por la bomba de inyección. Gracias al diseño de su estructura interna los inyectores pueden generar altas presiones y por ende lograr una atomización óptima del combustible [15].

Estos inyectores fueron diseñados para motores donde el tiempo de inyección del combustible es determinado a través de la bomba inyectora de combustible y la correcta detección del sistema de distribución del motor. Esta composición permite al motor que funcione acorde a las RPM que este generando en tiempo real. En los motores es común encontrar cañerías del sistema de alimentación, las cuales se encargan de conectar la bomba de alta presión con cada uno de los inyectores. De esta forma a través de las cañerías se suministra la presión necesaria a cada uno de los inyectores para que se abra en el momento adecuado [16].

1.5 Inyector Electrónico

Componente electrohidráulico conformado por la tobera, aguja y la válvula de solenoide. Cuando la unidad de control electrónica activa la válvula solenoide tiende a abrir la tobera del

inyector, regulando el flujo requerido de combustible inyectado en la zona de la cámara de explosión del motor. Una vez ocurrida la inyección, el combustible sobrante es enviado por medio de la línea de retorno hacia el tanque de combustible [17].

Por otro lado, las presiones de inyección alcanzan unos 1 600 bares aproximadamente, y las fuerzas necesarias a superar en el inyector son muy elevadas para levantar la aguja. Por lo tanto, con un actuador electromagnético no es posible controlar de manera directa el inyector. Por esta razón, con una válvula se controla indirectamente el inyector y cuando esta válvula es activada se regula en la cámara de control la descarga o presurización, esta cámara se encuentra situada antes de la aguja. En resumen, se necesita un control combinado de forma hidráulico y electrónico. De forma hidráulica se lo hace basado en la diferencia de presiones y de forma electrónico se lo hace dirigido por medio de la ECU con el fin de lograr un correcto funcionamiento del inyector [11].

1.5.1 Operación del Inyector

Los inyectores electrónicos y mecánicos trabajan bajo un principio de operación similar, siendo el de presión-tiempo. Su diferencia principal es que, los inyectores electrónicos el accionamiento para la apertura del combustible está controlado por la ECU. En estos inyectores por medio de un sensor de presión se logra obtener la cantidad o presión exacta del combustible existente en el riel y por medio de una comparación entre esta señal con un valor grabado y establecido por la ECU, se determina si existe discrepancia entre estos valores. Entonces si existe diferencia entre las dos señales un orificio de descarga situado en el regulador del inyector se abre o cierra permitiendo un mayor control del caudal de excedente de combustible y devolverlo al tanque de combustible a una baja presión por las cañerías de retorno del sistema de alimentación [18].

1.5.2 Partes del Inyector

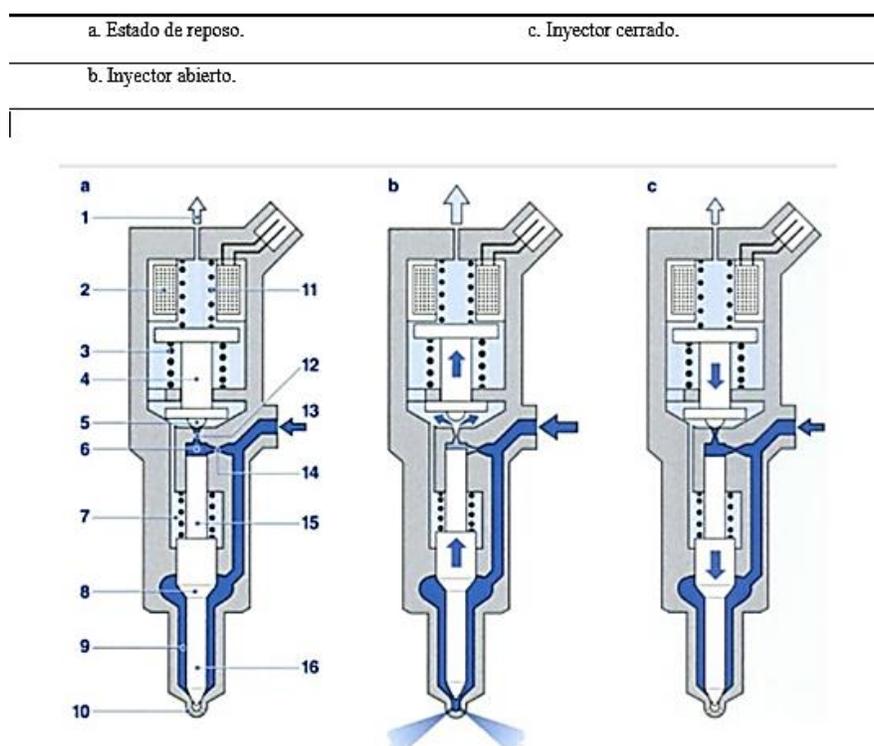
Un inyector CRI está constituido generalmente con dieciséis partes o componentes como se muestra en la Tabla 1 y en la Figura 3.

Tabla 1. Partes del Inyector CRI

Descripción de sus partes	
1. Retorno de combustible.	9. Volumen de la cámara.
2. Bobina electromagnética.	10. Orificio de inyección.
3. Muelle de sobrecarga.	11. Muelle de válvula electromagnética.
4. Inducido magnético.	12. Estrangulador de salida.
5. Bola de válvula.	13. Empalme de alta presión.
6. Cámara de control.	14. Estrangulador de alimentación.
7. Muelle del inyector.	15. Embolo de la válvula (embolo de mando).
8. Resalte de presión de la aguja del inyector.	16. Aguja del inyector.

Nota. Adaptado de Sistemas de inyección diésel por acumulador, CR [19].

Figura 3. Principio de funcionamiento



Nota. Adaptado de Sistemas de inyección diésel por acumulador “Principio de funcionamiento”, CR [19].

1.5.3 Funcionamiento Mecánico del Inyector

El funcionamiento mecánico del inyector CRI se da en diferentes fases de inyección, de las cuales cada una de estas fases tendrá diferentes fuerzas existentes en los elementos del inyector.

1.5.3.1 Fase de Reposo (Inyector Cerrado)

El combustible proveniente del riel satura al inyector incluyendo la cámara de control y la cámara de la tobera. En esta fase la válvula solenoide permanece inactiva por la unidad de control, lo que conlleva a que el muelle de la electroválvula presione la válvula contra el asiento y la bola en el extremo inferior bloquea el estrangulador de salida. Debido a la elevada presión que contiene el riel, el embolo de control se encuentra bajo la acción del muelle de la tobera, logrando mantener cerrada la aguja. Para asegurar la estanqueidad de la tobera, la sección del embolo de control está diseñada con una relación de superficie de aproximadamente 1.5 en comparación con la superficie de la aguja. Dicho de otro modo, la fuerza hidráulica sobre el embolo de control supera alrededor del 50% la fuerza de apertura de la tobera de inyección y sin tomar en cuenta la acción del muelle. El muelle mantiene la tobera cerrada hasta que se obtenga una presión diferencial de 40 bares aproximadamente entre la cámara de la tobera y la cámara de control. Debido a esto se evita un posible retroceso de los gases de combustión por medio del inyector, lo cual podría afectar a su funcionalidad y ocasionar una inestabilidad hidráulica [20].

1.5.3.2 Fase de Inyección (Inicio de Apertura del Inyector)

Por medio de una corriente de activación se logra activar la válvula electromagnética, debido a esta corriente y la potencia de un electroimán activado se obtiene una rápida apertura de la válvula electromagnética. Esta fuerza supera al resorte de la válvula, ocasionando que el conducto de salida sea abierto por el inducido. Por este motivo se genera una corriente de retención más baja debido a que la corriente de estimulación se reduce en muy poco tiempo. Una vez que el

obturador de salida se encuentra despejado, el combustible puede fluir desde la cámara de control de la electroválvula en dirección a la cámara de inyección que se encuentra antes del obturador de salida, el exceso de combustible se envía hacia el reservorio de combustible por medio del sistema de retorno. El estrangulador de entrada obstruye una compensación total de la presión, generando una disminución de la presión en la cámara de control de la válvula [21].

1.5.3.3 Inyector Totalmente Abierto

Cuando un inyector CRI se abre por completo, la aguja se eleva, permitiendo que el combustible fluya libremente hacia la cámara de combustión, controlado por un sistema electromagnético que ajusta la duración de la apertura de la válvula. La presión del riel común es esencial, ya que impulsa el combustible a través de las toberas, donde la geometría de las boquillas asegura una atomización efectiva para una combustión óptima. La dinámica del flujo depende de la interacción entre la presión del riel, el diseño del inyector y la resistencia hidráulica del sistema [22].

La apertura de la aguja del inyector es directamente proporcional a la diferencia de presión ejercida sobre ella por el combustible. Una vez iniciada la inyección, el flujo de combustible crea una fuerza de retroceso que mantiene la aguja abierta durante un tiempo determinado. La duración de la inyección, controlada por una señal eléctrica, determina la cantidad de combustible suministrada a la cámara de combustión [23].

El amortiguamiento hidráulico, creado por el volumen de combustible en el sistema, estabiliza la inyección al reducir fluctuaciones no deseadas, asegurando un funcionamiento estable del inyector. Estudios experimentales destacan que, junto con el control preciso del sistema electromagnético, se puede mantener un flujo constante en condiciones variables [24]. Además, la configuración interna del inyector es clave para lograr una inyección precisa [25].

1.5.3.4 Fase Final del Inyector (Cierre del Inyector)

Por último, la electroválvula procederá a desactivarse. Por consiguiente, la fuerza del resorte de la válvula presiona al inducido, lo que provoca el cierre del estrangulador de salida y causa el retorno del combustible. A medida que la válvula se cierra y en consiguiente la presión se libera, se logra obtener un punto de espera, en el cual la presión deja de ser liberada. En la fase de cierre de la inyección la presión ejercida por el resorte sobre la válvula del estrangulador en la etapa final forma nuevamente el ciclo del riel [13].

1.5.4 Funcionamiento Electrónico del Inyector

En el funcionamiento electrónico del inyector CRI se genera una fase de activación de corriente y voltaje. Dando así la llamada corriente de apertura y la de mantenimiento, estas dos señales impartidas por la ECU determinan cuando será la apertura del inyector.

1.5.4.1 Corriente de Apertura

En la válvula de control, el circuito del inyector genera una corriente inicial, con una tensión de aproximadamente 90 V y durante la apertura inicial la intensidad alcanza valores cercanos a los 16-18 A, para minimizar el retraso de excitación y vencer la resistencia del resorte antagonista [26] [27]. Esta corriente, de 0,3 milisegundos, se obtiene a través del uso de condensadores cuya carga y descarga son reguladas por la unidad de control [28].

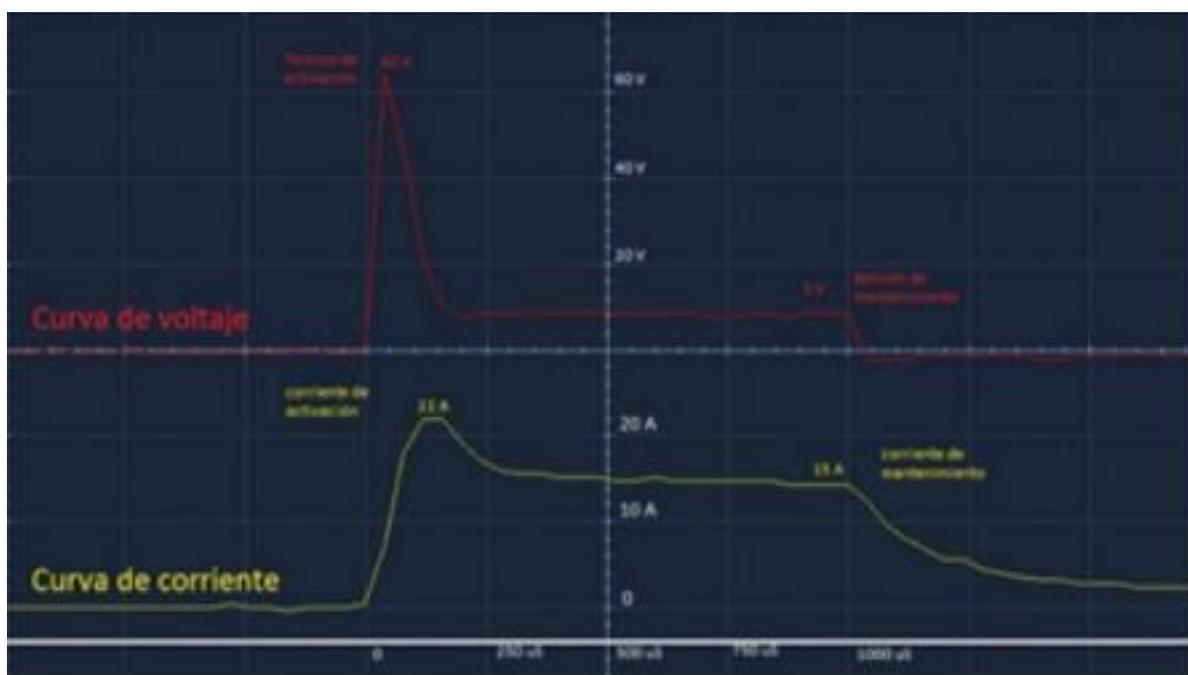
1.5.4.2 Corriente de Mantenimiento

La corriente de mantenimiento, es esencial en el funcionamiento de los inyectores diésel controlados electrónicamente. Esta corriente se utiliza tras el pico inicial de activación (corriente "peak") para mantener abierta la aguja del inyector. Su ajuste es crucial para optimizar la duración de la inyección y reducir la variabilidad en la cantidad de combustible inyectado por ciclo.

Además, la corriente de mantenimiento afecta directamente el consumo energético del solenoide y la disipación térmica, aspectos fundamentales para prolongar la vida útil del inyector [29].

La duración de esta corriente varía según el tiempo de activación definido por la unidad de control. Se compone de impulsos cuya duración fija y variable ajusta el tiempo de inyección, determinando si es preinyección, inyección principal o post-inyección. Una vez superada la resistencia del control, la aguja de la válvula se mantiene abierta con una corriente menor. Es decir, el solenoide se encontrará alimentado con un voltaje de 50 V y una intensidad de menor a 12 A como se muestra en la Figura 4 [28].

Figura 4. Fase de activación de corriente y voltaje

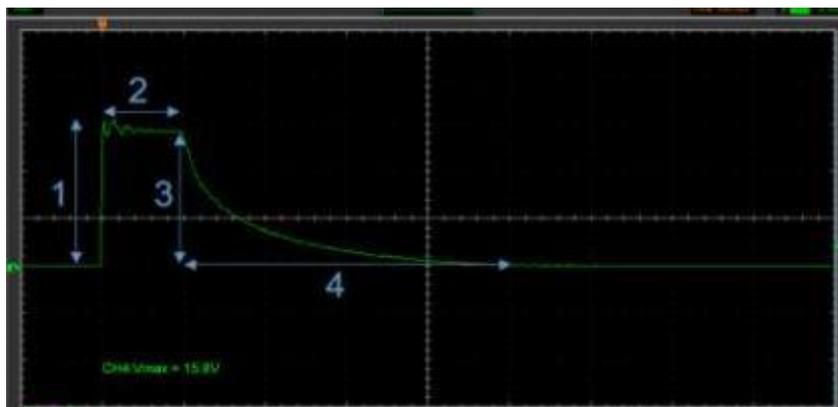


Nota: Adaptado de Fase de activación de corriente y voltaje [30].

1.5.4.3 Curva del Voltaje de Activación

El voltaje de activación del inyector varía dependiendo del instante en que se realiza la prueba de funcionamiento. La Figura 5 muestra que a medida al aumentar su voltaje de activación disminuirá la intensidad progresivamente. De igual forma sucede con el voltaje de retención [1].

Figura 5. Detalle de la curva del voltaje de activación

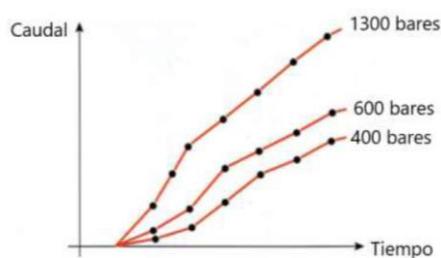


Nota. Adaptado de Detalle de la curva del Voltaje de Activación [1].

1.5.5 Tiempo de Inyección

El tiempo de inyección se lo determina por el lapso de tiempo desde que la aguja del inyector abre hasta que cierra. En el transcurso del cierre y apertura del inyector, se experimentan retrasos en el tiempo de inyección. En el periodo de inyección de combustible y activación del solenoide, se generan retrasos que incrementan el tiempo de duración de estos doseventos, además del lapso que pasa desde que la ECU determina cuando abrir y cerrar la válvula de control y el instante en que la aguja del inyector se desplaza efectivamente. Estas distorsiones dependen del caudal de inyección, la presión del sistema, el tiempo de excitación del solenoide y las inercias ocasionadas en los componentes debido a las altas presiones involucradas. Por lo tanto, se infiere que, para un flujo constante, a medida que se aumente la velocidad del motor y como resultado al aumento de presiones, los periodos de apertura de inyección se reducen (ver Figura 6) [28].

Figura 6. Tiempo de inyección



Nota. Adaptado de Tiempo de inyección [28].

1.5.6 Frecuencia de Operación

La frecuencia con la que los inyectores en los sistemas CR operan es clave para el rendimiento del motor, ya que determina cuántas veces por segundo el inyector se abre y se cierra, afectando tanto la cantidad como la calidad del combustible que se inyecta. Diversos estudios han demostrado que la frecuencia de operación de los inyectores de alta presión varía según la tecnología utilizada y las condiciones de funcionamiento, mejorando la atomización del combustible y reduciendo las emisiones contaminantes [31]. Además, ajustar correctamente esta frecuencia es esencial para evitar problemas hidráulicos, como fluctuaciones en el flujo de combustible, que podrían afectar negativamente el rendimiento del motor a largo plazo [32] [33].

1.6 Despiece del Inyector CRI

El procedimiento del desmontaje como se ilustra en la Figura 7, se inicia desenroscando la válvula solenoide del portainyector. La válvula está equipada con una electroválvula que recibe señales de la unidad de control, un terminal eléctrico y un agujero superior que permite el retorno del combustible sobrante. En el interior de la válvula solenoide se encuentra albergado el muelle de la electroválvula. El inducido de la electroválvula se encuentra en la zona superior del portainyector. El inducido es presionado por el muelle antes mencionado y obstruye el estrangulador de salida por medio de la bola de la válvula. El estrangulador de salida es el estrechamiento superior de la válvula y también cuenta con otro estrangulador de entrada. Posteriormente se extrae el émbolo de control, este se encuentra separado en dos piezas. Por último, se desenrosca la tuerca que mantiene unido al portainyector y la tobera. En la tobera se encuentra alojado la aguja, muelle de la tobera y los pernos de fijación [20].

Figura 7. Despiece del inyector CRI

Nota. Adaptado de Despiece del inyector CRI [20].

1.7 Averías en los Inyectores CRI

Los inyectores CRI contemporáneos presentan grandes presiones de inyección. Por tal motivo, el combustible proporcionado por ciclo está segmentado en 3 a 5, o incluso 7 fracciones, esta fragmentación permite un mayor control en el proceso de combustión. Debido a esto los componentes del inyector tienden a tener una mayor actividad de trabajo en pequeños intervalos de tiempo en los ciclos de apertura y cierre, este procedimiento genera una mayor exigencia al inyector y con ello la aparición de desgaste en sus elementos luego de realizar 60 millones de ciclos de motor aproximadamente [34].

Las principales causas que generan averías en los inyectores son la presencia de oxidación, generación de suciedades, impurezas, elevadas temperaturas, depósitos de carbón y concentración de barniz. Esto genera una restricción en el movimiento continuo del combustible y pérdida de presión debido a obstrucciones en la aguja, los orificios y en el asiento de la tobera. Por tal motivo,

el motor no presenta un funcionamiento óptimo y aparecen dificultades al momento de acelerar, al arrancar, también se genera pérdida de potencia, un mayor consumo de combustible, ralentí irregular, incremento de la opacidad y ruidos de golpeteo en el motor [35].

La calidad del combustible es un factor crucial en la vida útil de los inyectores, si este presenta niveles elevados de agua o azufre, puede afectar negativamente al funcionamiento del motor. Ya que, esto puede generar oxidación en las piezas y generación de ácido sulfuroso y sulfúrico. Otro factor importante que genera partículas de suciedad en el combustible es el tiempo excesivo de almacenamiento en lugares de abastecimiento o de distribución [36].

Los inyectores de motores diésel experimentan diversas averías que impactan su rendimiento y durabilidad. Las fallas en los conectores son frecuentes debido a problemas eléctricos o manipulación inadecuada. El núcleo magnético, que genera la fuerza magnética para controlar la inyección, es vulnerable a daños que afectan su funcionalidad. Problemas en el sistema de retorno del combustible, la aguja del inyector y la tobera pueden ocasionar fugas o caudales incorrectos por desgaste, acumulación de partículas o exposición a altas temperaturas. El émbolo de la válvula y las piezas asociadas sufren desgaste por fricción, comprometiendo la estanqueidad del sistema. Las válvulas internas, como la válvula de bola y la superficie de apoyo del inyector, son críticas; averías en estos componentes pueden causar fallas de sellado y pérdida de eficiencia, requiriendo reemplazos cuando los daños son significativos. Un mantenimiento adecuado y la atención a estos signos de desgaste son esenciales para asegurar un rendimiento óptimo y prolongar la vida útil de los inyectores [37].

1.8 Aprendizaje Automático

El Aprendizaje Automático es una tecnología clave en el diagnóstico automotriz, ya que permite la creación de sistemas que aprenden de datos históricos sin necesidad de programación

explícita, identificando patrones y optimizando la detección de fallos. En la industria automotriz, estos algoritmos analizan datos provenientes de sensores, mejorando la precisión en la identificación de problemas mecánicos y electrónicos mediante técnicas supervisadas y no supervisadas [38]. La implementación de modelos como redes neuronales y árboles de decisión permite realizar diagnósticos predictivos, anticipando posibles fallos antes de que ocurran, lo que contribuye a un mantenimiento más eficiente. Además, la capacidad de adaptación de estos modelos a condiciones cambiantes es esencial para garantizar diagnósticos precisos en tiempo real [39].

1.8.1 Clasificación del Aprendizaje Automático

El Aprendizaje Automático se clasifica en tres categorías principales: aprendizaje supervisado, no supervisado y por refuerzo. En el aprendizaje supervisado, el sistema utiliza un conjunto de datos etiquetados para entrenar un modelo, permitiendo predicciones precisas a partir de la identificación de patrones predefinidos [40]. En contraste, el aprendizaje no supervisado se caracteriza por la ausencia de etiquetas en los datos, lo que lleva al modelo a descubrir estructuras y relaciones subyacentes de manera autónoma, siendo especialmente útil en la agrupación o segmentación de datos complejos [41]. Por último, el aprendizaje por refuerzo involucra un enfoque en el que un agente aprende mediante la interacción con su entorno, ajustando sus acciones a partir de recompensas o penalizaciones para maximizar una ganancia acumulada, siendo ideal en contextos donde la adaptación y la toma de decisiones en tiempo real son fundamentales [42] [43].

1.8.2 Algoritmos de Aprendizaje Automático

El aprendizaje automático abarca una variedad de técnicas diseñadas para atender necesidades específicas como la clasificación, regresión, agrupamiento y el aprendizaje profundo.

Para tareas de clasificación y regresión, se utilizan algoritmos como la regresión logística y los árboles de decisión, los cuales son fundamentales para modelar las relaciones entre variables y realizar predicciones basadas en datos etiquetados [44]. Por otro lado, técnicas de agrupamiento como K-means y DBSCAN son esenciales en el análisis exploratorio, ya que identifican patrones y distribuciones en datos sin etiquetar, formando clústeres según similitudes internas [45].

Las redes neuronales y los modelos de aprendizaje profundo, tales como las redes convolucionales y recurrentes, son cruciales para el análisis de grandes volúmenes de datos no estructurados, y se emplean comúnmente en aplicaciones como el procesamiento de imágenes y la predicción de series temporales [46]. Además, los árboles de decisión y sus variantes, como los bosques aleatorios (Random Forests) y el boosting (Gradient Boosting), ofrecen soluciones robustas y fáciles de interpretar, siendo aplicables tanto en clasificación como en regresión, y son reconocidos por su capacidad para manejar datos complejos con gran precisión [47].

1.9 Medidas Estadísticas

La curtosis y la regresión, se utilizan para evaluar y analizar datos experimentales, proporcionando una comprensión profunda de sus características y relaciones [48].

1.9.1 Curtosis

La ecuación (1) evalúa la concentración de valores en las colas de una distribución. Este parámetro ayuda a identificar distribuciones con colas más gruesas (leptocúrticas), más delgadas (platicúrticas), o similares a la normal (mesocúrtica). Un valor mayor a 3 en la curtosis indica una distribución con colas pesadas [49].

$$K = \frac{\sum(x_i - \bar{x})^4}{n \times \sigma^4} \quad (1)$$

Donde K es la curtosis, n el tamaño de la población, x_i cada valor individual en la población, σ la desviación estándar y \bar{x} la media aritmética.

1.9.2 Regresión

La ecuación (2) es una técnica estadística utilizada para modelar y analizar la relación entre una variable dependiente y una o más variables independientes. Su principal objetivo es predecir valores de la variable dependiente a partir de los valores de las variables independientes, lo que la convierte en una herramienta esencial en diversas áreas como la economía, la ingeniería, y la investigación científica [50]. Existen varios tipos de regresión, entre los que destacan la regresión lineal, que establece una relación directa y proporcional entre las variables, y la regresión polinómica, que permite modelar relaciones más complejas [51].

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_k X_k + \epsilon \quad (2)$$

Donde Y representa la variable dependiente, β_0 el valor de la intersección, X_1 y X_2 como variables independientes, β_1 y β_2 son los coeficientes de X_1 y X_2 respectivamente, ϵ es el término de error.

El coeficiente de correlación múltiple mide la relación entre la variable dependiente y las independientes en un modelo de regresión múltiple [52]. El coeficiente de determinación (R^2) indica cuánto de la variabilidad total es explicada por el modelo, y el R^2 ajusta este valor considerando la cantidad de variables predictoras, penalizando aquellas que no mejoran significativamente el modelo [53]. El error típico, que es la desviación estándar de los residuos, mide la precisión de las predicciones del modelo [54]. Los grados de libertad en regresión dependen del número de observaciones y parámetros estimados, afectando la interpretación de los resultados [55].

La Tabla 2 muestra las ecuaciones utilizadas en la regresión lineal múltiple. La suma de cuadrados total (SS_{tot}), la suma de cuadrados del modelo (SS_{reg}), y la suma de cuadrados de los residuos (SS_{res}) son claves para evaluar la variabilidad explicada y no explicada por el modelo

[56]. El promedio de los cuadrados permite calcular el estadístico F , que evalúa la significancia del modelo comparándolo con un valor crítico [53]. Los coeficientes en la regresión lineal muestran el impacto de cada variable independiente, y su error típico mide la precisión de estas estimaciones [52]. El estadístico t y su correspondiente p-valor evalúan la significancia de cada coeficiente [54].

Además, los intervalos de confianza al 95% indican un rango probable para el verdadero valor del coeficiente, proporcionando una medida de la fiabilidad de las estimaciones [55]. Finalmente, los valores pronosticados para la variable dependiente se derivan de la ecuación de regresión, y los residuos muestran la diferencia entre valores observados y pronosticados, evaluando la precisión del modelo [56].

Tabla 2. Ecuaciones estadísticas de regresión lineal múltiple

Estadísticos de regresión	Fórmula
Coeficiente de Correlación Múltiple	$R = \sqrt{R^2}$
Coeficiente de determinación	$R^2 = 1 - (SS_{res}/SS_{tot})$
Coeficiente de Determinación Ajustado	$R^2_{ajustado} = 1 - \frac{(1 - R^2)(n - 1)}{(n - p - 1)}$
Error típico	$Error\ típico = \sqrt{SS_{res}/n - p - 1}$
Grados de Libertad	$Gl = n - p - 1$
Suma de Cuadrados Total	$SS_{tot} = \sum (y_i - \bar{y})^2$
Suma de Cuadrados del Modelo	$SS_{reg} = \sum (\hat{y}_i - \bar{y})^2$
Suma de Cuadrados de los Residuos	$SS_{res} = \sum (y_i - \hat{y}_i)^2$
Promedio de los Cuadrados del Modelo	$MS_{reg} = SS_{reg}/p$
Promedio de los Cuadrados de los Residuos	$MS_{res} = SS_{res}/(n - p - 1)$
Estadístico F	$F = MS_{reg}/MS_{res}$
Error Típico de los Coeficientes	$Error\ típico = \sqrt{MS_{res}/SS_x}$
Estadístico t	$t = b_i/Error\ típico$
Intervalo de confianza al 95%	$IC = b_i \pm (t_{\alpha/2} \times Error\ típico)$
Residuos	$e_i = y_i - \hat{y}_i$

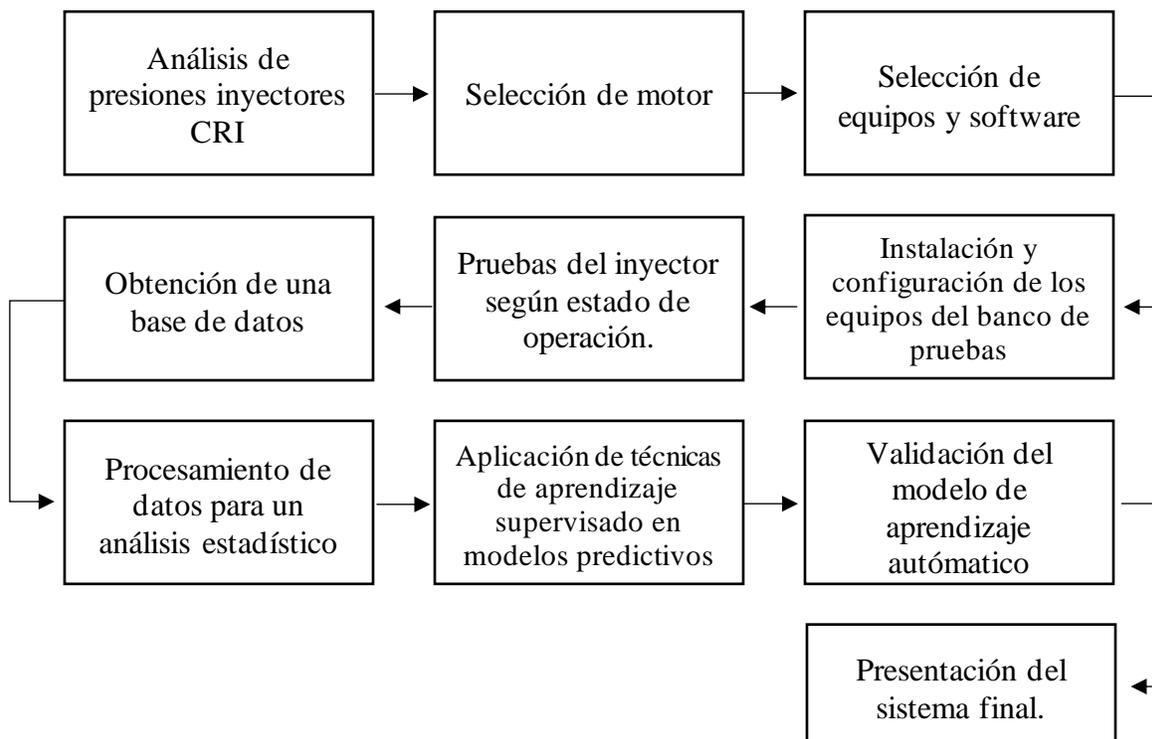
Donde, R es el coeficiente de correlación múltiple; R^2 , el coeficiente de determinación; $R^2_{ajustado}$, el coeficiente de determinación ajustado; Gl , los grados de libertad; SS_{res} , SS_{tot} y SS_{reg} , las sumas de cuadrados de los residuos, total y del modelo, respectivamente; MS_{reg} y MS_{res} , los promedios de los cuadrados del modelo y los residuos; F , el estadístico F; IC , intervalo de confianza; n , el número total de observaciones en la muestra; p , el número de variables independientes; y_i , \hat{y}_i y \bar{y} , los valores observado, pronosticado y promedio de la variable dependiente; e_i , los residuos; $t_{\alpha/2}$ el valor crítico del estadístico t para un intervalo de confianza y SS_x la suma de cuadrados de la variable independiente.

CAPÍTULO II

2 MATERIALES Y MÉTODOS

Este proyecto está enfocado en el análisis de las presiones de los inyectores CRI mediante la variación de la frecuencia y tiempo de inyección. Con el uso de equipos de diagnóstico especializados para CRI tales como: banco de inyección, simulador de pulsos de inyección, entrega y retorno de combustible, manómetro alta presión. Se obtiene datos importantes de los inyectores, como el voltaje, amperaje y presiones de retorno. Para ello se instala los inyectores en un banco de pruebas con la finalidad de controlar la duración de la prueba, giro de la bomba y se obtiene la cantidad de combustible inyectado y su retorno. Por último, se implementa un sistema de diagnóstico predictivo por medio de clasificación para los inyectores 0445110 250. Esto permite realizar un mantenimiento predictivo y detectar fallas a tiempo, asegurando un mejor funcionamiento del sistema.

Figura 8. Proceso de la metodología del estudio



2.1 Materiales

En esta sección se detallan los componentes y herramientas utilizados en la investigación, desde el motor Mazda hasta los softwares de análisis, proporcionando una base técnica integral para el estudio.

2.1.1 Motor Mazda BT-50 2.0 CRDi del año 2012

El motor seleccionado es el de la Mazda BT-50 2.5 CRDi, el cual, se encuentra en las instalaciones del taller de motores diésel de la Universidad Técnica del Norte. Siendo este un motor estacionario y didáctico de uso estudiantil, facilitando la toma de datos y su respectivo acondicionamiento del motor. En la Tabla 3 se presenta las especificaciones técnicas del motor.

Tabla 3. Especificaciones técnicas del motor MAZDA BT-50 CRDi

Parámetro	Descripción
N° de cilindros, tipo	4 cilindros en línea, DOHC
Cilindrada	2499cm ³
Relación de compresión	18:1
Sistema de combustible	BOSCH
Orden de encendido	1-3-4-2
Diámetro interior y carrera (mm)	93x92
Potencia	105 KW a 3500 rpm
Torque	330 Nm a 1800 rpm
Sistema de lubricación, tipo	Tipo engrase a presión
Sistema de refrigeración, tipo	Circulación forzada refrigerada por agua
Alimentación	Turbo compresor de geometría variable

Nota: Tomado de [57].

2.1.2 Inyectores CRI

Con el fin de realizar el trabajo de investigación, se establece los inyectores de la Mazda BT-50 2.5 CRDi como se muestra en la Figura 9 perteneciente a la Universidad Técnica del Norte.

Estos inyectores trabajan con presiones máximas de 1600 bares de forma individual y con una fuente de energía de 12 voltios.

Figura 9. Inyector 0445110 250



Nota: Tomado de [58].

Esto facilita la obtención de datos, ya que, estos equipos se encuentran dentro de las instalaciones de la institución, a continuación, se presentan las características de los inyectores.

2.1.3 Generador de Pulsos de Inyectores CRI200

El generador CRI200 como se muestra en la Figura 10 es un equipo portátil que destaca por simular los pulsos de trabajo generados por la ECU del motor. Este equipo permite enviar estos pulsos hacia el inyector, con el cual, se obtiene una señal que cuenta con parámetros que pueden ser ejecutados según sean necesarios por parte de un técnico o sobre una respectiva investigación.

Figura 10. Generador de Pulsos de Inyectores CRI200



Nota: Tomado de [59].

Este equipo presenta características importantes, las cuales son de gran utilidad al momento de realizar los diferentes análisis y ensayos. En la Tabla 4 se presentan las especificaciones técnicas del generador CRI200.

Tabla 4. Especificaciones del generador CRI200

Parámetro	Descripción
Modelo	Probador común del inyector del carril
Rango de prueba	Atomización, piloto, emisión y condición de carga completa.
Inyectores de prueba	BOSCH, DENSO, DELPHI, PIEZE
Ancho de impulso	100 ~ 3000us
Frecuencia de inyección	1 ~ 30Hz
Tiempo de goteo de inyectores	0-2000 veces
Voltaje de trabajo	AC 220V / AC 110V
Temperatura de trabajo	-30 °C a 70 °C

Nota: Tomado de [59].

2.1.4 Manómetro de Baja Presión

Para medir las bajas presiones se utilizó un equipo diseñado para medir bajas presiones en el sistema de inyección, el cual, se muestra en la Figura 11 el manómetro de baja presión de la marca NUOVA FIMA que tiene una capacidad de hasta 20 bares.

Figura 11. Manómetro de baja presión

Se optó por el manómetro de baja presión para medir la presión de transferencia. En la Tabla 5 se muestra las especificaciones técnicas del manómetro de baja presión.

Tabla 5. Especificaciones del manómetro de baja presión

Parámetro	Descripción
Marca	NUOVA FIMA
Ubicación	Bomba de alta presión
Presión máxima	20 bares
Presión de medición	5 – 6 bares
Medición	Presión de transferencia

2.1.5 Manómetro de Alta Presión

Para este estudio se utilizó un equipo diseñado para medir altas presiones en el sistema de inyección, el cual, se muestra en la Figura 12.

Figura 12. Manómetro de alta presión



Se optó por el manómetro de alta presión de la marca NUOVA FIMA que tiene una capacidad de hasta 2000 bares. En la Tabla 6 se muestra las especificaciones técnicas del manómetro de alta presión.

Tabla 6. Especificaciones del manómetro de alta presión

Parámetro	Descripción
Marca	NUOVA FIMA
Ubicación	Cuerpo del riel común
Presión máxima	2000 bares
Presión de medición	400 – 800 bares
Medición	Alta presión del riel

Nota: Tomado de [14].

2.1.6 Cañerías de Inyección

En la Figura 13 se muestra las cañerías de inyección, en las cuales se transporta o fluye el combustible desde la bomba de inyección hasta riel común, posteriormente estas cañerías salen del riel común hacia los inyectores con elevadas presiones de combustible, a su vez, debe soportar temperaturas elevadas y vibraciones. Están diseñadas y fabricadas de acero de alta dureza para

soportar las elevadas presiones del sistema de inyección. Además, cuenta con un diseño original que facilita su instalación y para evitar fugas tiene una tuerca especial para un perfecto ajuste [60].

Figura 13. Cañería de inyección



2.1.7 Válvula Limitadora de Presión DRV

En la Figura 14 se observa al componente primordial para controlar las presiones en el riel común del banco de inyección, las cuales simulan el comportamiento de un motor en condiciones reales. Este componente, de origen alemán y fabricado por Bosch, se encuentra en un extremo del riel. Posee una estructura de aluminio y su inducido regula el flujo de combustible.

Figura 14. Válvula limitadora de presión DRV



La válvula limita la presión del riel se abre o cierra dependiendo de la fuerza ejercida sobre el muelle. Las especificaciones técnicas de la válvula DRV se muestra en la Tabla 7

Tabla 7. Especificaciones de la válvula reguladora de presión

Parámetro	Descripción
Presión de Trabajo	2500 bar
Número de pieza	057130764AB
OEM	0281006075
Material	Aluminio
Tipo de inyección	Riel común
Peso	320 gr
Número de pines	2

Nota: Adaptado de [61].

2.1.8 Fuente de Voltaje Variable (WANPTEK KBS3010DF)

Para el control del voltaje que se aplica en las diferentes pruebas de los inyectores se lo realiza por medio de un dispositivo que genera una fuente de voltaje variable. En la Figura 15 se muestra el dispositivo que permite controlar y simular la señal enviada por la ECU.

Figura 15. Fuente de Voltaje Variable WANPTEK KBS3010DF



En la Tabla 8 Se muestra las especificaciones principales del dispositivo electrónico, con el cual, se prueba en los inyectores CRI de la Mazda BT-50 de forma individual.

Tabla 8. Especificaciones de la fuente de energía variable WANPTEK KBS3010DF

Parámetro	Descripción
Voltaje de salida	0 - 30 V DC
Corriente de salida	0 – 10 A
Eficiencia general	≥ 89 %
Resolución de pantalla	Voltaje: 0.1 V – Corriente: 0.01 A
Regulación de voltaje	CV 0.01 % + 3mV – CC <0.2 % + 6mA
Estabilización de carga	CV 0.1 % + 1mV – CC 0.1 % + 3mA
Dimensiones	8.8 × 3.2 × 6.5 pulg
Peso unitario	3.2 libras

Nota: Adaptado de [61].

2.1.9 Riel de Alta Presión

Este componente en el banco de inyección se encuentra situado después de la bomba de inyección y antes de los inyectores. El combustible enviado por la bomba de inyección llega por medio de las cañerías, este se acumula en el riel a una presión determinada y constante independientemente de los RPM. Posteriormente el combustible según sea requerido por el inyector es enviado por medio de las cañerías. En la Figura 16 se visualiza el riel de combustible, cuenta con un diseño cilíndrico para reducir turbulencias y obtener una distribución uniforme de presión. Obteniendo una mayor resistencia estructural por las presiones generadas.

Figura 16. Riel de alta presión



2.1.10 Bomba de Inyección

La bomba de inyección de alta presión utilizada envía el combustible que llega del reservorio hacia el riel común. En la Figura 17 se muestra la bomba utilizada en el banco de inyección del presente proyecto, la bomba trabaja de forma constante a 6 bares sobre la presión del combustible en las diferentes pruebas de frecuencia y tiempo de inyección.

Figura 17. Bomba de inyección CP1



Las especificaciones técnicas de la bomba CP1 que genera una elevada presión imprescindible para suministrar al riel se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Especificaciones técnicas de la bomba CP1

Parámetro	Descripción
Número de cilindros	3
Presión del sistema (bar)	1400
Presión controlada por	Unidad de medida
Válvula de cierre del elemento (combustible)	No
Acoplamiento de accionamiento	Gear
Aplicación	PCV, LCV

Nota: Tomado de [61].

2.1.11 Software Excel

El software utilizado para la creación y organización de bases de datos del inyector CRI en tres estados operativos ofrece herramientas específicas para el análisis numérico mediante métodos estadísticos. Estas funcionalidades facilitan un análisis técnico y respaldan la interpretación fundamentada de los resultados. Su interfaz intuitiva, especialmente en la función "Análisis de datos", optimiza la manipulación y procesamiento de información. Los cálculos realizados son esenciales para evaluar la influencia de las variables independientes sobre las dependientes y para caracterizar el comportamiento del inyector en cada estado operativo. Además, este software permite estructurar una base de datos indispensable para el desarrollo de modelos de aprendizaje supervisado.

2.1.12 Software MATLAB®

El software permite realizar cálculos numéricos y estadísticos, además de generar representaciones gráficas de los datos obtenidos durante la campaña experimental del inyector. Estas capacidades facilitan un análisis exhaustivo del comportamiento real del sistema,

proporcionando una comprensión más profunda de las variables estudiadas. Además, incluye aplicaciones integradas que permiten implementar el aprendizaje automatizado, lo que facilita el desarrollo de modelos entrenados para la clasificación y predicción basados en los datos experimentales. Estas funcionalidades son esenciales para optimizar el análisis y apoyar el desarrollo de modelos predictivos precisos. Cabe mencionar que la versión empleada en este estudio es MATLAB® R2023b.

2.2 Método

Para el procedimiento experimental, se utiliza el controlador de la bomba de combustible PYBK-900, el cual permite monitorear diversos parámetros globales de cada prueba realizada en los inyectores. En este contexto, la bomba de alta presión opera a una velocidad de 700 RPM, proporcionando un flujo constante de combustible adecuado para el sistema. Para la toma de datos, se establece un tiempo de muestreo de 300 strongs, lo cual garantiza una recolección precisa de datos durante el ciclo de cada prueba.

Además, con el generador de pulsos de inyectores CRI200, se configuran las dos variables independientes principales del estudio: el tiempo de inyección y la frecuencia. El tiempo de inyección se ajusta en tres niveles de 1, 1,5 y 2 milisegundos (ms), permitiendo evaluar cómo influye la duración del pulso de inyección en los caudales y en la presión. La frecuencia, por otro lado, se varía en un rango que va desde 1 Hz hasta 15 Hz, dividido en intervalos de 1 Hz, lo cual ayuda a simular diferentes condiciones de operación de los inyectores ya analizar su respuesta bajo distintas velocidades de pulso.

En cuanto a las variables dependientes, el estudio considera cinco parámetros fundamentales: el voltaje (V) aplicado al sistema, la corriente (A) suministrada, la presión del riel (bares), y los caudales de inyección y retorno de combustible (ml). Estas variables se miden y

registran para cada combinación de tiempo de inyección y frecuencia, proporcionando una base de datos robusta para el análisis. En la Tabla 10 se presentan las variables independientes y dependientes seleccionadas para los análisis estadísticos.

Tabla 10. Variables de estudio para el análisis estadístico

Tipo variable	Variable	Unidad	Niveles
Independiente	Tiempo inyección	ms	1, 1.5, 2
	Frecuencia	Hz	1 hasta 15
Dependiente	Caudal inyección de combustible	ml	---
	Caudal retorno de combustible	ml	---
	Presión riel	bar	---

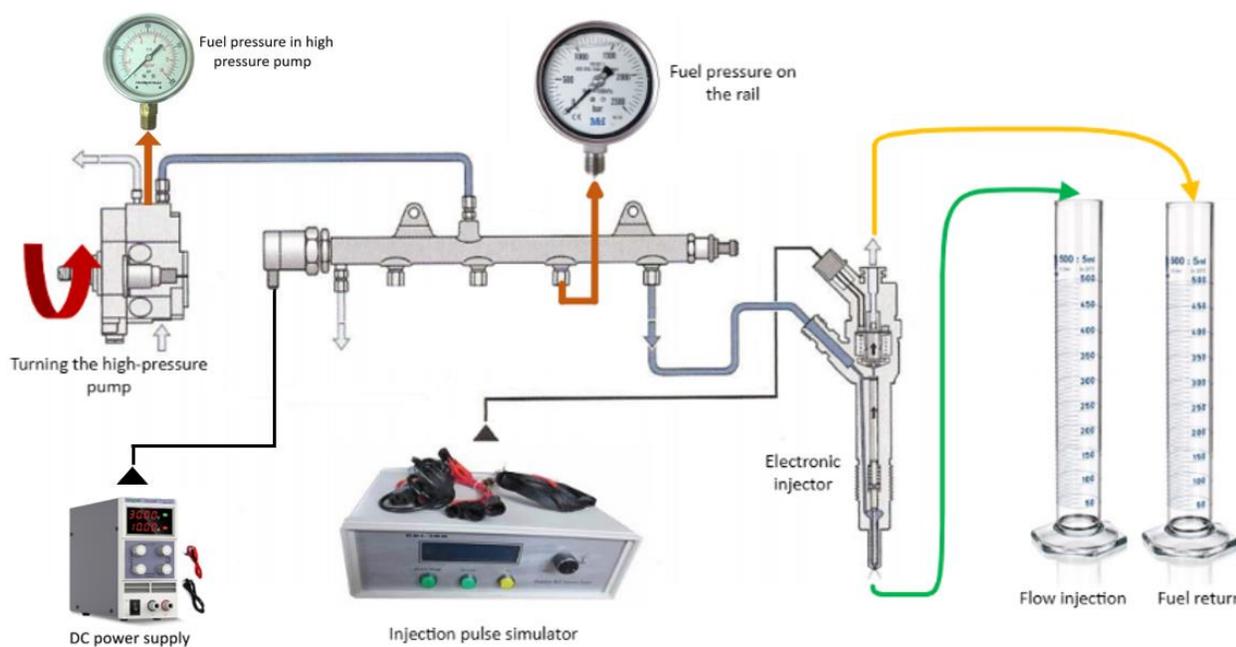
En la Tabla 11 se especifican las variables empleadas en el entrenamiento del modelo de aprendizaje automático. Este modelo busca predecir el comportamiento del inyector bajo diferentes condiciones operativas, empleando los datos de voltaje, corriente, presión del riel y caudales para clasificar el estado funcional de los inyectores. Estos datos servirán para entender cómo varían los caudales y la presión bajo diferentes configuraciones de tiempo y frecuencia, así como para mejorar la precisión del modelo predictivo en la clasificación del estado de los inyectores.

Tabla 11. Variables de estudio para el modelo entrenado por algoritmo de clasificación

Variable predictora	Unidad	Niveles
Frecuencia	Hz	1 hasta 15
Voltaje	V	---
Amperaje	A	---
Presión del riel común	bar	---
Caudal de inyección	ml	---
Caudal de retorno	ml	---

Con los valores obtenidos de cada una de las pruebas y en los respectivos inyectores, se obtendrá una base de datos, con la cual, se podrá analizar las variaciones generadas por las variables independientes de los inyectores. Además, es importante señalar que tanto las pruebas de caudales como las de presión del riel se realizan de manera simultánea. Es decir, se configura el sistema para que ambas pruebas se ejecuten al mismo tiempo. Los resultados obtenidos de cada prueba se registran y se almacenan en una base de datos para su análisis. En la Figura 18 se presenta el flujograma del modelo aplicado.

Figura 18. Flujograma de la metodología aplicada



2.3 Metodología Experimental para la Configuración y Pruebas

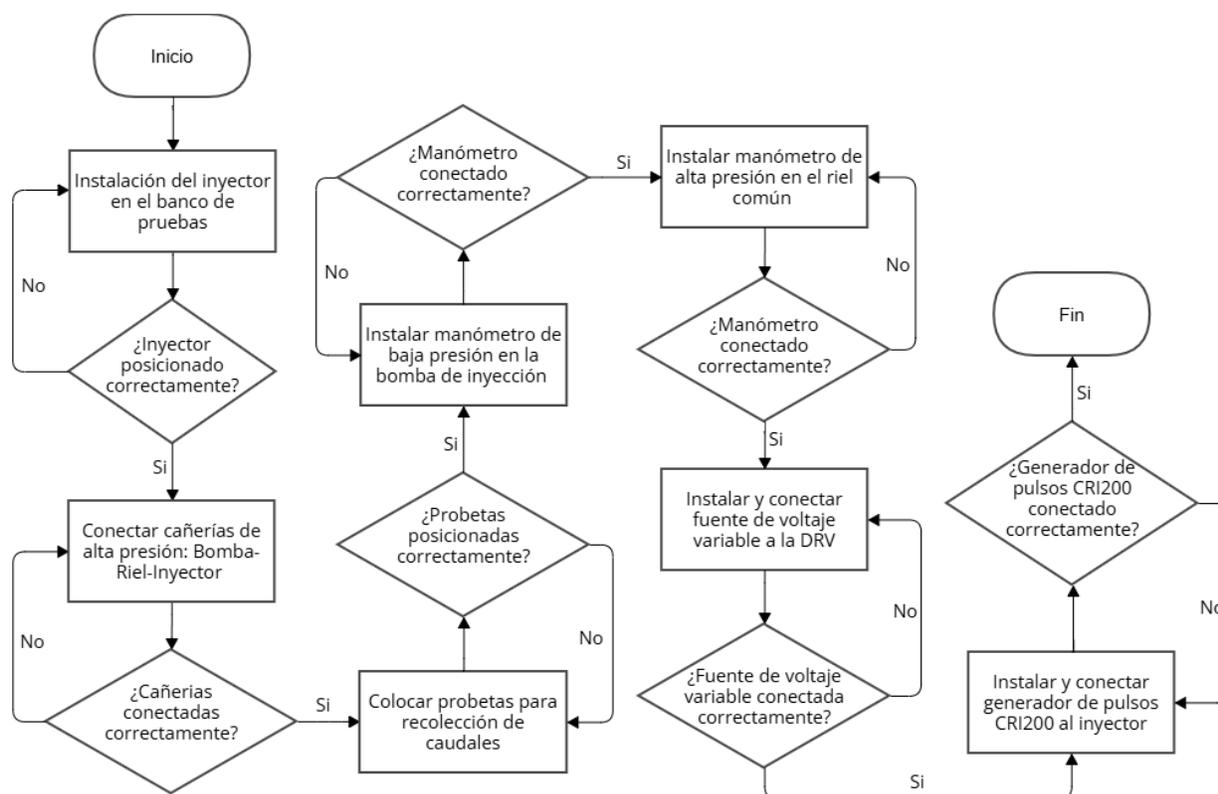
La metodología experimental se basa en una configuración general para todas las pruebas, complementada por configuraciones específicas para cada caso. Antes de proceder a la instalación y configuración de los equipos, se detallan ambos aspectos. El proceso experimental se estructura en tres partes secuenciales: instalación de equipos, configuración de parámetros operativos y registro de variables. Esta estructura sistematiza el proceso, lo cual garantiza la correcta conexión,

ajuste y funcionamiento de los equipos y asegura que cada etapa se ejecute de acuerdo con los objetivos de la investigación.

2.3.1 Instalación de Equipos Mecánicos y Eléctricos

El flujograma de instalación de equipos (Figura 19) establece los pasos necesarios para montar y verificar los componentes mecánicos y eléctricos del sistema de inyección. Este proceso inicial es esencial, ya que asegura que todos los elementos estén correctamente instalados y listos para su posterior operación. La adecuada instalación contribuye a la seguridad y estabilidad del sistema, para evitar así desconexiones o fugas que puedan comprometer la integridad de las pruebas.

Figura 19. Flujograma para instalación de equipos mecánicos y eléctricos



2.3.1.1 Conexión de Componentes Mecánicos

Se instala el inyector en el banco de pruebas y se conectan las cañerías de alta presión desde la bomba hasta el riel y del riel hasta el inyector. Además, se colocan las probetas de recolección

en los puntos de salida del caudal de inyección y retorno y se instalan los manómetros de alta y baja presión en sus respectivas ubicaciones para medir la presión del riel durante las pruebas.

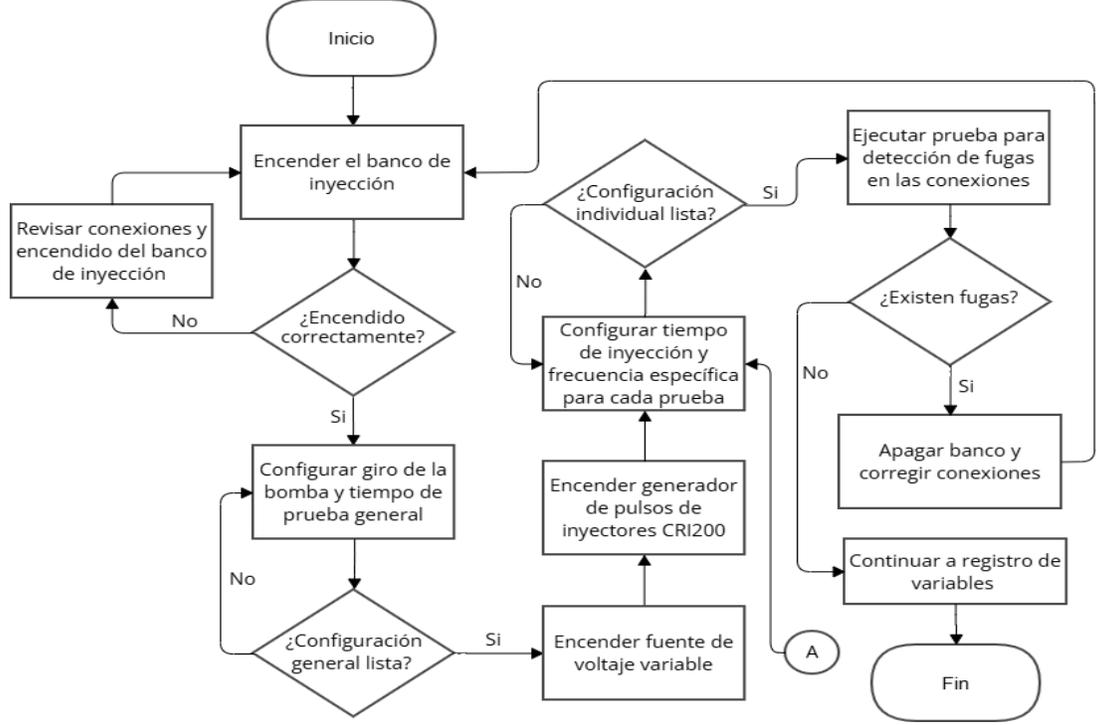
2.3.1.2 Instalación de Equipos Eléctricos

Se conecta la Fuente de Voltaje Variable (WANPTEK KBS3010DF) a la DRV, que controla el riel común, y el Generador de Pulsos de Inyectores CRI200 al inyector. Se asegura que todos los dispositivos auxiliares, como el Banco de Pruebas Garner Products, la Fuente de Voltaje Variable y el Generador de Pulsos CRI200, estén conectados y listos para operar.

2.3.2 Configuración de los Equipos

La Figura 20 abarca la configuración de equipos y los ajustes operativos clave, como el giro de la bomba, tiempo de muestreo, frecuencia y tiempo de inyección, necesarios para establecer condiciones controladas en cada prueba. Esta etapa es crucial porque define los parámetros bajo los cuales se evaluarán las variables del sistema, con el objetivo de obtener resultados consistentes y comparables entre diferentes condiciones de operación.

Figura 20. Flujograma para configuración de los equipos



2.3.2.1 Configuración General para Todas las Pruebas

Se describen los procedimientos estandarizados para la configuración del banco de pruebas y el sistema de inyección, asegurando la consistencia y precisión de todas las pruebas realizadas.

Ajuste del Banco de Pruebas. En el banco de pruebas, se establece el giro de la bomba y el tiempo de duración de cada prueba, configuraciones que se mantendrán constantes para todo el conjunto de pruebas. Estos valores aseguran una base uniforme para el análisis de las variables dependientes en función de las condiciones operativas controladas.

Preparación del Sistema de Inyección. Se verifica que todas las conexiones mecánicas y eléctricas estén correctamente instaladas y que los dispositivos de medición estén colocados en las posiciones adecuadas. Una vez completada esta configuración, se encienden todos los equipos y se revisan sus lecturas iniciales para garantizar su correcto funcionamiento antes de iniciar las pruebas.

2.3.2.2 Configuración Individual para Cada Prueba

Se detallan las configuraciones específicas para cada prueba, permitiendo una evaluación precisa del desempeño del inyector bajo distintas condiciones de tiempo y frecuencia.

Configuración del Generador de Pulsos de Inyectores. Para cada prueba individual, se selecciona un nivel de tiempo de inyección en el Generador de Pulsos CRI200, eligiendo entre 1, 1.5 y 2 ms. Se establece también una frecuencia de operación, en un rango de 1 Hz a 15 Hz. Estas combinaciones de tiempo de inyección y frecuencia permiten evaluar el desempeño del inyector bajo diversas condiciones.

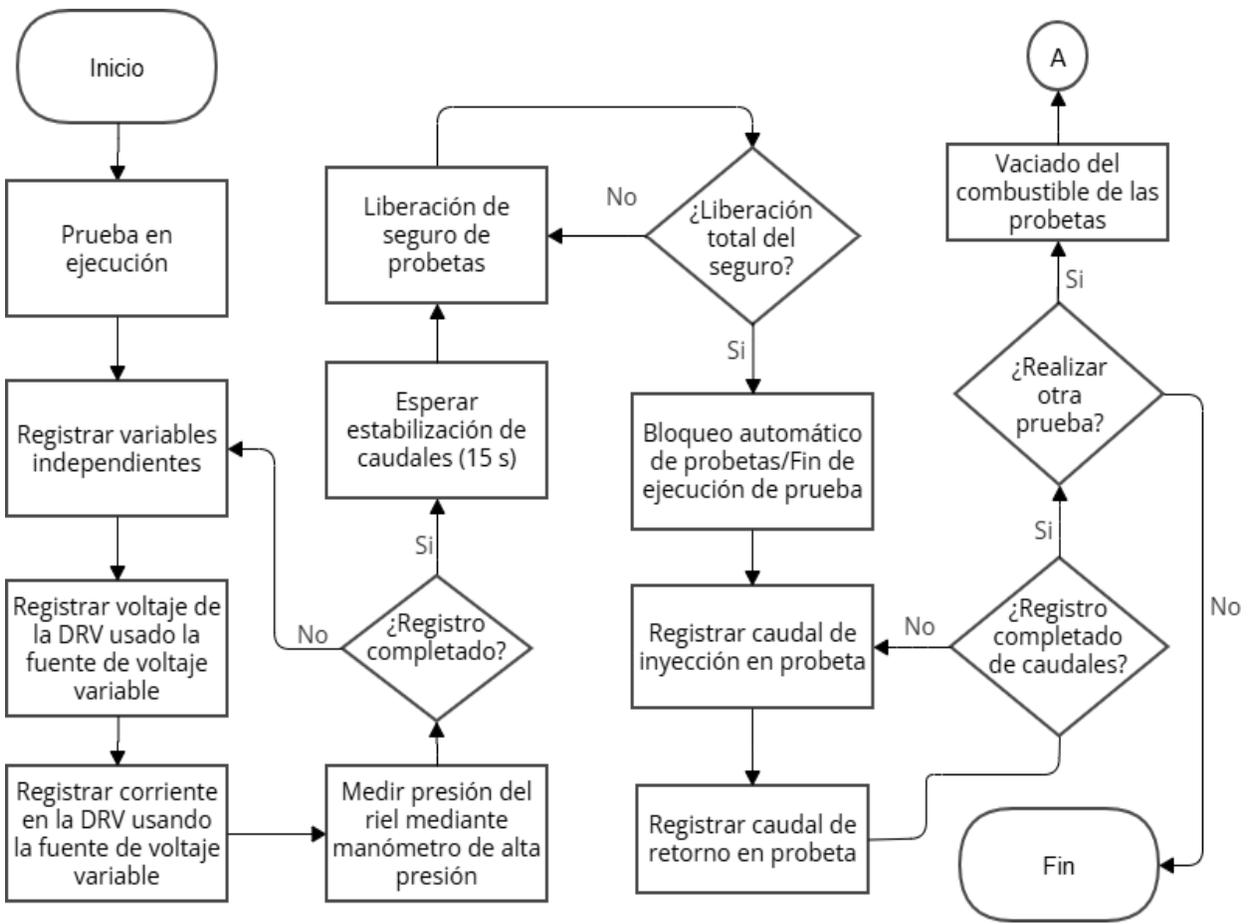
Activación del Sistema. Con la configuración específica lista, se activa el banco de pruebas mediante el botón “COUN”, lo que pone en funcionamiento la bomba de alta presión para suministrar combustible al riel y al inyector. A continuación, se presiona el botón “Start/Stop” en

el Generador de Pulsos CRI200, lo que inicia el flujo de inyección en el inyector según los parámetros establecidos.

2.3.3 Metodología para el Registro de Variables

El flujograma de registro de variables (véase Figura 21) detalla el proceso de medición y anotación de los datos generados durante cada prueba, incluyendo el voltaje, corriente, presión y caudal. Este registro es vital para el análisis de desempeño del sistema de inyección, ya que permite obtener las métricas necesarias para evaluar su comportamiento. Un registro preciso asegura que los resultados reflejen fielmente las condiciones de la prueba, lo que aporta validez al estudio experimental.

Figura 21. Flujograma para el registro de variables



2.3.3.1 Registro del Voltaje en la DRV

Durante cada prueba, se observa y registra el voltaje reflejado en la Fuente de Voltaje Variable conectada a la DRV. Este valor se anota para cada configuración específica de tiempo de inyección y frecuencia, lo que permite evaluar el impacto de las condiciones de operación sobre el voltaje aplicado al sistema de control del riel.

2.3.3.2 Registro de la Corriente en la DRV

La corriente suministrada a la DRV, medida también en la Fuente de Voltaje Variable, se registra de manera similar al voltaje para cada combinación de tiempo de inyección y frecuencia. Estos datos proporcionan información sobre la demanda de corriente en la DRV bajo distintas condiciones operativas.

2.3.3.3 Registro de la Presión del Riel

La presión del riel se mide a través de un manómetro de alta presión instalado en el riel de inyección. Durante cada prueba, se registra la presión antes de finalizar el ciclo de inyección, lo cual asegura que la medición corresponde a condiciones operativas reales sin alteraciones debidas a la detención del sistema.

2.3.3.4 Medición del Caudal de Inyección y del Caudal de Retorno

Para medir el caudal de inyección y el caudal de retorno, se retira el seguro de bloqueo al inicio de cada prueba, con el fin de permitir el flujo de combustible hacia las probetas de recolección. Después de un periodo de estabilización de 15 segundos, se registra el volumen de combustible acumulado en ambas probetas. Al finalizar la prueba, se eleva el seguro, para detener el flujo y facilitar una medición precisa del caudal de inyección y de retorno.

2.3.3.5 Preparación para la Prueba Siguiete

Luego de registrar el caudal en las probetas, se vacía el combustible acumulado y se reposicionan las probetas para realizar la siguiente prueba. Cada prueba se repite al seguir estos pasos, con la configuración general constante y al adaptar las condiciones específicas de tiempo de inyección y frecuencia para cada ensayo.

2.4 Recopilación de Datos

Para la recopilación de datos se establece una tabla general que incluye las variables independientes y dependientes con cada una de sus unidades de acuerdo al SI. En el Anexo 1.1 se muestra el diseño que conservan todas las pruebas en cada uno de los inyectores. Esto facilita el estudio estadístico de forma independiente de cada uno o varios inyectores.

2.4.1 Pruebas del Inyector 0445110 250 Nuevo

Los datos presentados la Tabla 12 evidencian una tendencia general hacia la disminución de la presión en el riel a medida que aumentan las variables independientes. Se observa un máximo de presión a bajas frecuencias y un mínimo alrededor de los 15 Hz. Paralelamente, tanto la cantidad de combustible inyectado como la retornada muestran un incremento proporcional al aumento de la frecuencia y tiempo de inyección. En cuanto a las magnitudes eléctricas, corriente y voltaje experimentan pequeñas variaciones; siendo común una disminución de ambas al incrementar las variables independientes, aunque el voltaje puede presentar aumentos leves en algunos casos. Sin embargo, estas variaciones son mínimas y pueden considerarse despreciables.

Tabla 12. Pruebas del inyector nuevo variando la frecuencia y tiempo de inyección

F	Tiempo de inyección 1 ms					Tiempo de inyección 1.5 ms					Tiempo de inyección 2 ms				
	V	A	PRC	CI	CR	V	A	PRC	CI	CR	V	A	PRC	CI	CR
1	2.71	0.540	740	0.8	0.8	2.63	0.528	740	1.0	1.2	2.70	0.545	740	0.8	1.0
2	2.72	0.541	740	1.6	1.0	2.63	0.526	740	2.0	1.4	2.69	0.538	740	3.0	1.6
3	2.72	0.538	720	2.2	1.4	2.64	0.524	740	2.2	1.6	2.69	0.538	740	4.2	2.0
4	2.71	0.538	740	2.0	1.8	2.64	0.523	740	4.4	1.8	2.69	0.538	740	4.8	2.0
5	2.71	0.536	740	1.8	1.8	2.64	0.522	740	4.2	2.6	2.69	0.538	740	4.4	2.4
6	2.69	0.529	740	4.0	1.8	2.64	0.522	740	5.0	2.6	2.61	0.520	720	6.4	2.6
7	2.64	0.520	720	3.4	2.2	2.64	0.521	740	5.6	2.4	2.59	0.519	720	8.2	3.2
8	2.65	0.521	720	5.4	3.0	2.64	0.521	740	5.8	2.8	2.59	0.519	720	7.6	2.2
9	2.65	0.521	720	4.6	2.8	2.64	0.521	740	7.4	3.6	2.60	0.521	700	9.0	3.0
10	2.65	0.521	720	4.2	3.0	2.64	0.520	740	7.4	3.2	2.60	0.521	700	10.0	3.2
11	2.65	0.521	720	5.2	2.8	2.72	0.561	720	7.8	3.6	2.60	0.519	700	11.0	4.8
12	2.64	0.519	700	5.2	2.4	2.72	0.552	720	8.4	4.4	2.62	0.521	700	11.6	3.6
13	2.64	0.514	700	6.2	3.6	2.72	0.545	720	9.2	3.4	2.59	0.519	680	12.6	5.4
14	2.64	0.519	700	7.0	2.8	2.71	0.544	700	9.6	4.0	2.59	0.519	680	13.2	5.0
15	2.64	0.520	700	6.4	3.4	2.71	0.543	700	10.6	4.0	2.60	0.519	680	12.8	5.8

Nota: Para todas las pruebas se genera una presión constante de 6 bares en la bomba de inyección de alta presión. Además, se emplean las siguientes abreviaturas: F (Frecuencia en Hz), V (Voltaje en V), A (Amperaje en A), PRC (Presión del riel común en bares), CI (Caudal de inyección en ml) y CR (Caudal de retorno en ml).

2.4.2 Pruebas en el Inyector 0445110 250 Usado

En la Tabla 13 los resultados obtenidos muestran que, en general, la presión en el riel disminuye al aumentar la frecuencia y tiempo de inyección, alcanzando un valor máximo en 1 Hz y un mínimo en torno a los 8-15 Hz. A partir de cierta frecuencia, se observa una variabilidad en la presión. Por otro lado, tanto la entrega como el retorno de combustible incrementan proporcionalmente con las variables independientes. Respecto a la corriente y el voltaje, se detectan pequeñas variaciones: el voltaje tiende a aumentar y la corriente a disminuir con el incremento las variables independientes. Sin embargo, estas variaciones son mínimas y pueden considerarse constantes.

Tabla 13. Pruebas del inyector usado variando la frecuencia y tiempo de inyección

F	Tiempo de inyección 1 ms					Tiempo de inyección 1.5 ms					Tiempo de inyección 2 ms				
	V	A	PRC	CI	CR	V	A	PRC	CI	CR	V	A	PRC	CI	CR
1	2.69	0.554	900	1.2	0.6	2.66	0.553	920	0.8	1.4	2.60	0.532	840	1.2	1.6
2	2.69	0.548	900	1.4	0.8	2.66	0.539	900	2.6	1.8	2.63	0.532	840	3.0	2.2
3	2.69	0.545	920	2.0	1.4	2.67	0.533	900	4.0	1.6	2.62	0.528	840	3.2	1.8
4	2.69	0.542	900	2.6	1.4	2.66	0.528	860	5.2	2.2	2.60	0.523	820	6.0	2.2
5	2.69	0.538	900	4.6	2.0	2.66	0.527	860	5.0	2.6	2.60	0.522	820	6.0	2.2
6	2.70	0.537	900	3.4	2.0	2.65	0.523	860	5.0	2.6	2.60	0.522	800	6.8	3.0
7	2.73	0.613	800	2.2	1.2	2.64	0.522	860	6.0	3.2	2.59	0.520	800	7.6	3.4
8	2.74	0.588	780	3.6	1.8	2.64	0.521	860	7.4	2.6	2.60	0.521	780	9.8	3.6
9	2.73	0.578	780	4.0	2.2	2.64	0.521	820	9.0	3.2	2.62	0.522	780	10.0	4.0
10	2.73	0.570	780	5.0	2.2	2.64	0.521	840	9.0	3.2	2.62	0.522	780	11.6	4.0
11	2.72	0.563	820	5.4	2.8	2.64	0.520	820	11.0	4.0	2.62	0.522	780	12.4	4.2
12	2.72	0.559	840	5.8	3.0	2.63	0.520	820	11.2	3.2	2.62	0.522	780	13.4	4.0
13	2.72	0.554	820	6.6	2.6	2.71	0.610	820	13.8	5.4	2.62	0.522	780	14.4	4.6
14	2.72	0.551	820	6.4	3.2	2.69	0.578	820	12.4	3.6	2.62	0.521	760	16.6	5.2
15	2.73	0.546	800	7.6	3.2	2.70	0.568	840	13.6	4.4	2.62	0.520	740	15.8	5.0

Nota: Para todas las pruebas se genera una presión constante de 6 bares en la bomba de inyección de alta presión. Además, se emplean las siguientes abreviaturas: F (Frecuencia en Hz), V (Voltaje en V), A (Amperaje en A), PRC (Presión del riel común en bares), CI (Caudal de inyección en ml) y CR (Caudal de retorno en ml).

2.4.3 Pruebas del Inyector 0445110 250 Averiado

En la Tabla 14 se observa en general que, al aumentar la frecuencia y tiempo de inyección, la presión en el riel disminuye al aumentar la frecuencia, alcanzando su valor máximo en 1 Hz y su mínimo en torno a los 12-15 Hz. Por otro lado, tanto la entrega como el retorno de combustible muestran un incremento proporcional al aumento de la frecuencia. En cuanto a la corriente y el voltaje, se detectan pequeñas variaciones. El voltaje presenta una tendencia constante, mientras que la corriente disminuye ligeramente con el incremento de la frecuencia. No obstante, estas variaciones son mínimas (menor a ± 0.02 A para la corriente y ± 0.01 V para el voltaje), por lo que pueden considerarse valores prácticamente constantes.

Tabla 14. Pruebas del inyector averiado variando la frecuencia y tiempo de inyección

F	Tiempo de inyección 1 ms					Tiempo de inyección 1.5 ms					Tiempo de inyección 2 ms				
	V	A	PRC	CI	CR	V	A	PRC	CI	CR	V	A	PRC	CI	CR
1	2.80	0.579	780	1.0	1.4	2.71	0.554	780	1.6	1.6	2.75	0.538	740	1.0	2.0
2	2.81	0.568	760	1.0	1.6	2.71	0.545	780	1.4	1.4	2.76	0.538	740	3.4	2.6
3	2.79	0.552	760	1.0	1.8	2.71	0.536	760	2.2	2.0	2.76	0.538	740	3.2	2.6
4	2.80	0.548	760	2.2	1.8	2.71	0.531	760	3.0	2.4	2.75	0.537	740	5.0	3.2
5	2.80	0.547	740	1.8	2.0	2.71	0.528	760	4.0	2.6	2.76	0.538	740	4.8	3.0
6	2.80	0.545	740	2.4	2.0	2.70	0.525	760	4.8	3.2	2.75	0.537	740	5.8	3.4
7	2.81	0.547	740	3.2	2.4	2.70	0.523	760	5.8	3.2	2.75	0.536	720	6.8	3.6
8	2.80	0.545	740	4.8	2.8	2.69	0.521	740	6.8	3.6	2.74	0.533	720	8.2	3.8
9	2.80	0.545	740	4.8	2.8	2.70	0.522	740	7.4	3.6	2.74	0.533	720	8.8	4.0
10	2.80	0.545	740	5.6	3.0	2.70	0.522	740	8.2	3.6	2.73	0.533	720	10.2	4.2
11	2.81	0.545	740	5.6	3.6	2.71	0.521	740	9.0	4.0	2.73	0.533	700	11.8	4.8
12	2.80	0.544	740	5.6	3.8	2.70	0.521	720	9.8	4.0	2.73	0.530	700	12.2	4.6
13	2.80	0.544	740	7.0	3.8	2.70	0.521	720	10.8	4.6	2.73	0.528	700	13.2	5.0
14	2.79	0.544	720	7.2	4.0	2.69	0.520	720	11.6	5.0	2.71	0.526	700	14.0	5.6
15	2.79	0.543	720	7.0	3.8	2.69	0.519	720	12.2	4.8	2.71	0.525	680	15.2	5.6

Nota: Para todas las pruebas se genera una presión constante de 6 bares en la bomba de inyección de alta presión. Además, se emplean las siguientes abreviaturas: F (Frecuencia en Hz), V (Voltaje en V), A (Amperaje en A), PRC (Presión del riel común en bares), CI (Caudal de inyección en ml) y CR (Caudal de retorno en ml).

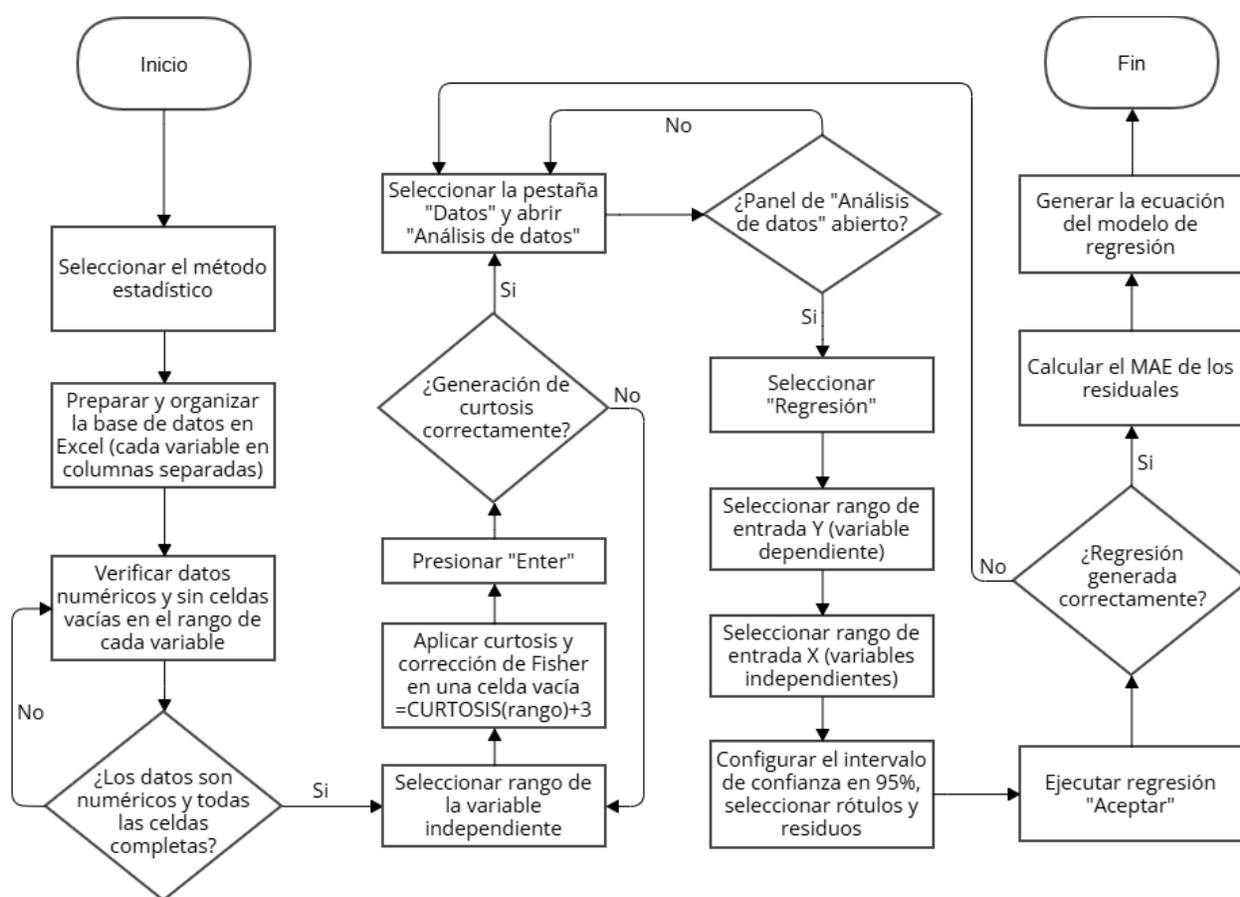
2.5 Aplicación de Métodos Estadísticos en el Estudio

Para analizar el comportamiento de un inyector diésel ante variaciones en múltiples parámetros de operación, se implementó un modelo de regresión lineal múltiple. La selección de este modelo se fundamenta en su capacidad para cuantificar la relación lineal entre una variable dependiente (desempeño del inyector) y múltiples variables independientes (parámetros de operación). Además, el análisis de regresión permite evaluar la significancia estadística de cada parámetro y determinar su contribución individual al desempeño del inyector.

El proceso de análisis, detallado en la sección 2.5.2, incluyó una evaluación preliminar de la distribución de los datos mediante el cálculo de la curtosis. Esta etapa fue esencial para asegurar

que los supuestos del modelo de regresión lineal se cumplieran. Posteriormente, se ajustó el modelo utilizando un software estadístico y se evaluó su ajuste a los datos. La metodología completa, desde la preparación de los datos hasta la interpretación de los resultados, se presenta en el diagrama de flujo de la Figura 22 y se describe en detalle en las subsecciones 2.5.1 a 2.5.3. En el Anexo 1.2 se presenta el formato de la base de datos necesario para realizar los análisis estadísticos por medio del software.

Figura 22. Flujograma para la aplicación de métodos estadísticos



2.5.1 Preparación de la base de Datos en Excel

Para un correcto procesamiento, los datos deben organizarse y detallarse correctamente, tal como se presenta en el esquema de la Figura 23. Cada variable debe ocupar una columna diferente: las variables independientes (X_1 y X_2) deben estar en columnas separadas y la dependiente (Y) en

otra columna. Esta disposición asegura un análisis libre de errores al momento de calcular la curtosis o ejecutar la regresión mediante la función de “datos”, ya que el software requiere un rango continuo de datos al ser seleccionados dentro del cuadro de diálogo. Es importante poner rótulos a cada bloque continuo para tener una mayor comprensión en el análisis y evitar posibles errores. Dentro del rango seleccionado, las celdas no deben contener información no numérica ni estar vacías dentro de cada bloque, únicamente puede tener información textual la celda del rotulo.

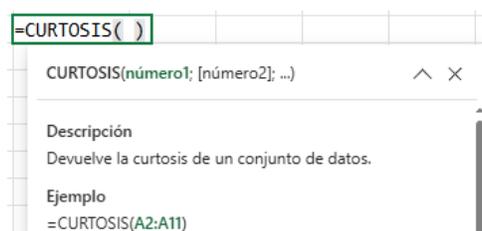
Figura 23. Estructura de la base de datos para la regresión

Caudal de inyección				Caudal de retorno				Presión del riel			
	A	B	C		A	B	C		A	B	C
	Frecuencia de Operación (Hz)	Tiempo de Inyección (ms)	Caudal de Inyección (ml)		Frecuencia de Operación (Hz)	Tiempo de Inyección (ms)	Caudal de Retorno (ml)		Frecuencia de Operación (Hz)	Tiempo de Inyección (ms)	Presión del Riel (ml)
1				1				1			
2	1	1	0,8	2	1	1	0,8	2	1	1	740
3	2	1	1,6	3	2	1	1,0	3	2	1	740
4	3	1	2,2	4	3	1	1,4	4	3	1	720
5	4	1	2,0	5	4	1	1,8	5	4	1	740

Nota: Como variables independientes: Frecuencia (X_1), Tiempo de inyección (X_2). Como variable dependiente (Y): Caudal de inyección, Caudal de retorno, Presión del riel.

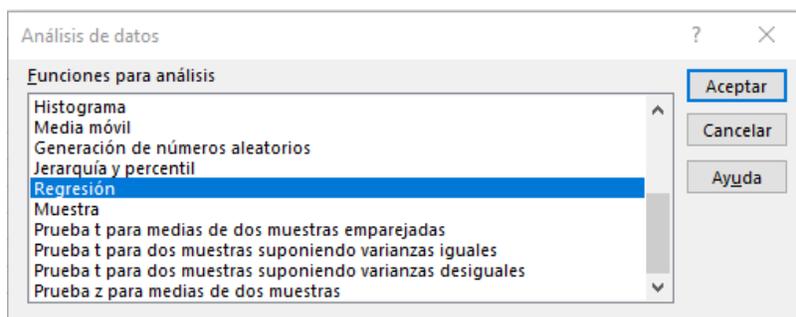
2.5.2 Aplicación de Curtosis

Esta medida estadística permite analizar el grado de apuntamiento o achatamiento de la distribución de los datos experimentales correspondientes a los distintos estados de operación del inyector estudiado, en comparación una distribución de la zona central de referencia. Para aplicar la curtosis, es necesario organizar los datos como se presenta en la Figura 23, donde se selecciona el rango de datos de la variable independiente y se excluye los rótulos. Posteriormente, en una celda independiente, se introduce la función integrada “=CURTOSIS(rango)”, como se observa en la Figura 24. Al seleccionar el rango continuo, el software procesa los valores seleccionados y proporciona la curtosis de cada una de las variables dependientes en las diferentes condiciones evaluadas. Para facilitar la comparación con estudios anteriores que usaron la definición clásica de curtosis, se debe calcular el ‘exceso de curtosis’. Esto implica añadir 3 al valor de curtosis obtenido con la función de Excel [62].

Figura 24. Función de curtosis en Excel

2.5.3 Configuración del Modelo de Regresión

El análisis de regresión proporciona una visión detallada del comportamiento que genera el inyector en diferentes estados operativos, permitiendo identificar la relación entre las variables de estudio. Excel proporciona una herramienta denominada “Análisis de datos”, esta herramienta permite la ejecución de cálculos estadísticos avanzados y dentro de ellos se encuentra el de “Regresión” como se observa en la Figura 25. Esta función permite estimar la relación entre la variable dependiente y las independientes por medio de la generación de resultados según sea la configuración del modelo en su interfaz como se presenta en la Figura 26.

Figura 25. Funciones para análisis de datos

Dentro de la interfaz de configuración de regresión, como se ilustra en la Figura 26, se debe seleccionar las columnas correspondientes a las variables independientes para el rango de entrada X , y de manera similar, para el rango de entrada Y establecida como la variable dependiente. La opción de intervalos de confianza del 95% debe estar activada, ya que esto permitirá cuantificar la incertidumbre y poder afirmar que los valores de los coeficientes se encuentran dentro de un rango

específico. Por otro lado, para visualizar los valores generados de los residuales se debe marcar dicha opción. Los residuales son la diferencia entre los valores reales y los predichos por el modelo, y permiten el cálculo del MAE, el cual es el promedio de los residuales expresados en valores absolutos, esto muestra una medida clara de la precisión del modelo.

Las tablas generadas por la herramienta “Análisis de datos” se visualizan en las subsecciones 3.1.1.2, 3.1.2.2 y 0, donde se presentan los datos obtenidos del resumen estadístico que permite evaluar el ajuste del modelo generado. El análisis de varianza permite evaluar la significancia de las variables, los coeficientes de regresión muestran la relación entre las variables independientes con la dependiente y el análisis de los residuales indica la distribución de los errores.

Figura 26. Interfaz de la configuración de la regresión

2.5.3.1 Generación de la Ecuación del Modelo de Regresión

En el análisis de regresión, la generación de la ecuación del modelo que representa la relación de la variable dependiente con las independientes es una de las etapas cruciales para visualizar dicha relación. La tabla de los coeficientes de regresión explica esta relación, donde los valores obtenidos de la intersección representan el valor de la variable Y cuando las variables X_1

y X_2 son cero o nulas. Por el contrario, los coeficientes de las variables X_1 y X_2 detallan el comportamiento que se genera en la variable Y al momento de incrementar un nivel por parte de las variables predictoras. Esto permite identificar el efecto estadísticamente que tiene cada variable X , como también la magnitud y sentido de su efecto sobre la variable Y [63]. Estos valores son los que se incluyen en la ecuación del modelo de regresión. La ecuación (3), detalla la relación cuantitativa de la variable Y con las variables X_1 y X_2 y la estructura de la ecuación de un modelo de regresión lineal múltiple aplicado al variar la frecuencia y tiempo de inyección.

$$Y = \beta_0 + \beta_1 \times \text{Frequency} + \beta_2 \times \text{Injection time} \quad (3)$$

Donde Y representa la variable dependiente, β_0 el valor de la intersección, β_1 el coeficiente de la frecuencia (X_1), *Frequency* la variable independiente X_1 , β_2 el coeficiente del tiempo de inyección (X_2), *Injection time* es la variable independiente X_2 .

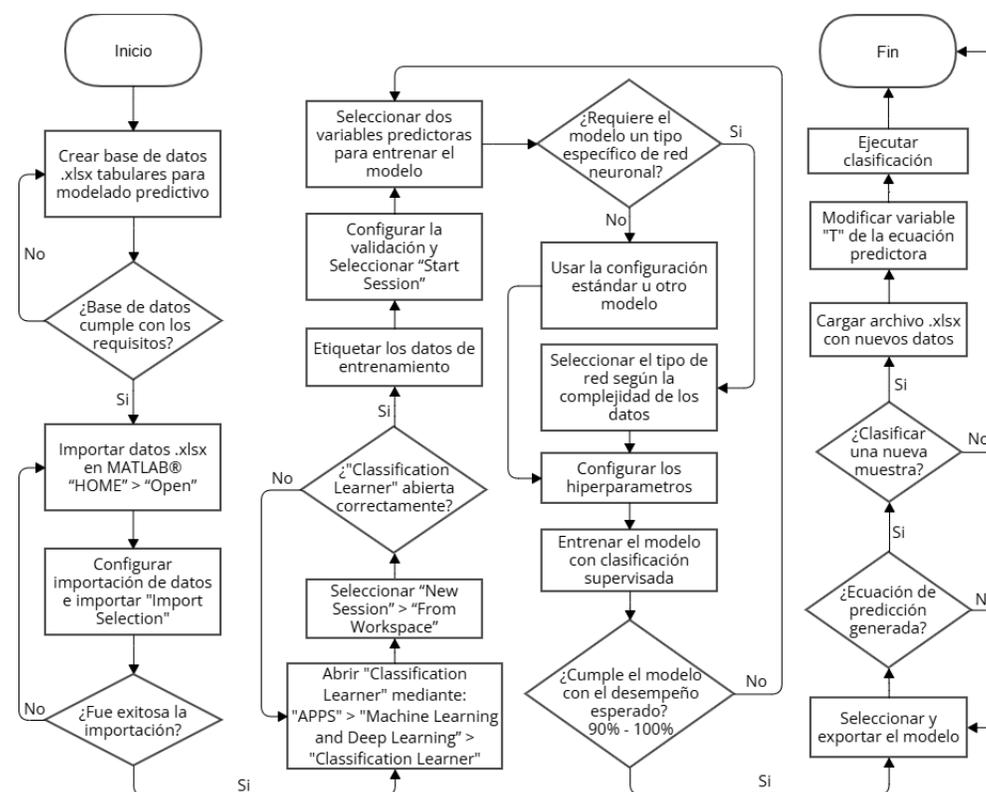
2.6 Implementación de Algoritmos de Clasificación en Aprendizaje Automático

Se propone una metodología para el desarrollo de un sistema de diagnóstico predictivo para inyectores, utilizando técnicas de aprendizaje automático. Esta metodología, detallada en la Figura 27, se centra en el entrenamiento de modelos de clasificación supervisada para discriminar entre estados de funcionamiento del inyector. La selección de algoritmos de clasificación supervisada se justifica por su capacidad para establecer relaciones entre características extraídas de los datos y una variable de salida categórica que representa el estado del inyector. Además, en el Anexo 1.3 se detalla el formato para registrar o crear la base de datos, lo cual permite entrenar el modelo con algoritmos de clasificación en Aprendizaje Automático.

El flujo de trabajo propuesto abarca desde la adquisición y preprocesamiento de los datos hasta la evaluación del modelo entrenado. La etapa de preprocesamiento es fundamental para garantizar la calidad de los datos y su adecuación para el entrenamiento del modelo. La validación

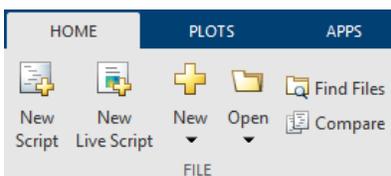
cruzada se emplea como técnica de evaluación para estimar el rendimiento general del modelo y mitigar el sobreajuste. La exportación del modelo permite su implementación en un entorno operativo real para la toma de decisiones en tiempo real. Los apartados 2.6.1 a 2.6.5 ofrecen una descripción exhaustiva de cada una de las etapas de este modelo predictivo.

Figura 27. Flujograma para la aplicación del modelo predictivo por Aprendizaje Automático

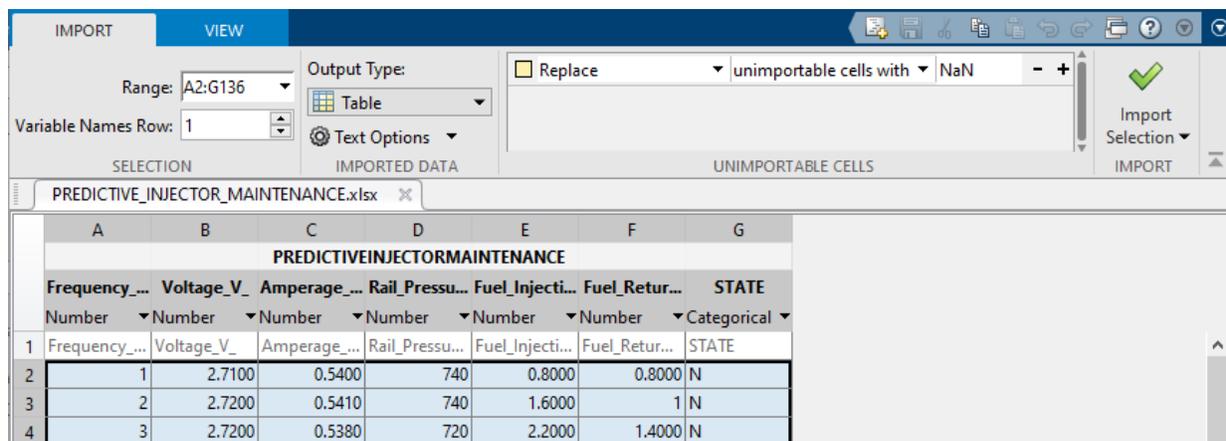


2.6.1 Importación de datos en MATLAB®

Para implementar el modelo entrenado en MATLAB® mediante Aprendizaje Automático, se crea previamente una base de datos, como se detalla en el Anexo 2, en un archivo con extensión “xlsx”. Luego, al cargar el archivo en MATLAB®, se debe ingresar a la pestaña "HOME" y seleccionar la opción "Open", como se muestra en la Figura 28. Después, se elige el archivo que contiene la base de datos. Es importante seleccionar la opción "All Files" al buscar el archivo “xlsx” en el ordenador, para que se muestre correctamente y se pueda cargar sin problemas.

Figura 28. Selección de archivo en MATLAB®

Una vez cargado el archivo se abre una ventana como se observa en la Figura 29, la cual tiene opciones como la selección de los rangos de los datos y la configuración de salida en tabla o matriz. Siendo escogido la opción de salida de tabla para mayor facilidad en el entrenamiento del modelo. En este apartado es importante tener en cuenta que la última columna de la tabla debe presentar el código o membrete con el cual se va a clasificar o etiquetar el estado del inyector. Posteriormente se procede a importar la base de datos al comando de Matlab seleccionando la opción de “Import Selection”.

Figura 29. Configuración e importación de datos en MATLAB®

2.6.2 Uso de Modelos de Clasificación en Aprendizaje Automático

En este estudio, como se muestra en la Figura 30, se utilizó la herramienta “Classification Learner” dentro de la sección de “Machine Learning and Deep Learning” para entrenar el modelo con los datos previamente cargados en el software. A continuación, se debe seleccionar la opción “New Session” y luego escoger “From Workspace”, lo que permitirá acceder a la base de datos cargada.

Figura 30. Método de aprendizaje en MATLAB®



Este software utiliza un tipo especial de aprendizaje supervisado para crear un modelo que clasifique en qué estado se encuentra cada inyector. Al entrenar el modelo, es fundamental etiquetar los datos según el estado del inyector, ya sea nuevo, usado o averiado. Esto ayuda al modelo a comprender el estado del inyector y a realizar predicciones precisas. La Figura 31 muestra una tabla con 135 filas y 7 columnas. Las 135 filas muestran los resultados de las pruebas realizadas y las 7 columnas muestran los diferentes factores que determinan el estado del inyector. Es importante destacar que la última columna tiene el código que indica el inyector estado de funcionamiento del inyector. El objetivo del modelo entrenado es determinar con precisión el estado de los inyectores en función de los datos experimentales, permitiendo diagnósticos futuros con nueva información y facilitando el mantenimiento predictivo.

Figura 31. Preparación de datos para el modelo de inyectores

Data set

Data Set Variable
 PREDICTIVEINJECTORMAINTENANCE 135x7 table

Response
 From data set variable
 From workspace
 STATE categorical 3 unique

Predictors

	Name	Type	Range
<input checked="" type="checkbox"/>	Frequency_Hz_	double	1 .. 15
<input checked="" type="checkbox"/>	Voltage_V_	double	2.59 .. 2.81
<input checked="" type="checkbox"/>	Amperage_A_	double	0.514 .. 0.613
<input checked="" type="checkbox"/>	Rail_Pressure_bar_	double	680 .. 920
<input checked="" type="checkbox"/>	Fuel_Injection_ml_	double	0.8 .. 16.6
<input checked="" type="checkbox"/>	Fuel_Return_ml_	double	0.6 .. 5.8
<input type="checkbox"/>	STATE	categorical	3 unique

Add All Remove All

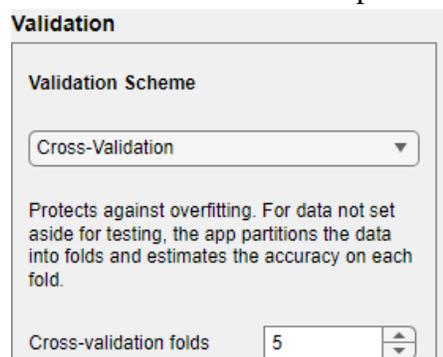
[How to prepare data](#) Refresh

2.6.3 Procedimiento de Validación y Análisis del Modelo

Para certificar el modelo de aprendizaje automático sea preciso, se debe validarlo. Es decir, comprobar qué tan bien se desempeña con los datos que usamos para entrenarlo y también con datos nuevos que queremos clasificar. Por eso, es muy importante asegurarse de que el modelo funcione bien en diferentes situaciones. Para garantizar la precisión del modelo, [64] menciona que se utiliza una técnica llamada validación cruzada que implica dividir los datos en dos partes: una para entrenar el modelo y la otra para probar su rendimiento. Pasan por varias rondas de intercambio hasta que cada muestra tiene la oportunidad de ser probada y validada. De manera similar, [65] sugiere que es mejor utilizar entre 5 y 10 grupos (k-fold) cuando se utilizan computadoras para analizar datos por sus requerimientos computacionales. Pero si el modelo es más complicado, es necesario hacer más iteraciones o dividirlo en partes más pequeñas para asegurar resultados precisos y mantener una alta calidad.

Para la validación del modelo, cuenta con 135 datos que tienen 5 particiones de acuerdo a la Figura 32, donde cada uno tiene 27 datos. Entonces, se utiliza 108 muestras para entrenar el modelo y 27 para validarlo. En cada ronda, cuatro de las cinco particiones se utilizan para entrenar y una para validar. Para ello, este proceso se lo hace cinco veces, cambiando los datos cada vez para asegurarse de validar todas las muestras. Este proceso permite encontrar el promedio del error de validación, lo que nos dará una buena idea de qué tan bien está funcionando el sistema [66].

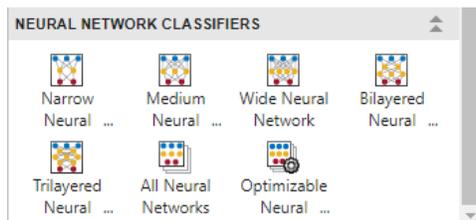
Figura 32. Validación del modelo con particiones de datos



2.6.4 Selección de Redes Neuronales para Modelo Predictivo

En el contexto de la selección de modelos predictivos, las redes neuronales se destacan por su capacidad para modelar relaciones no lineales complejas entre variables. El software ofrece diversas configuraciones de red, como la Narrow Neural Network, que utiliza una capa oculta con pocas neuronas y es adecuado para problemas más simples. La Medium Neural Network cuenta con más neuronas para manejar relaciones más complejas. La Wide Neural Network tiene un número elevado de neuronas para procesar grandes volúmenes de datos. Los modelos Bilayered Neural Network y Trilayered Neural Network, con más capas ocultas, son ideales para capturar patrones más profundos y detallados. La Figura 33 presenta las opciones de modelos de redes neuronales disponibles para el entrenamiento.

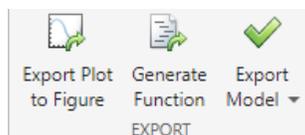
Figura 33. Clasificadores de redes neuronales (Neural Network Classifiers)



2.6.5 Generación de la Ecuación de Predicción del Modelo Entrenado.

La generación de la ecuación del modelo previamente entrenado es fundamental para realizar futuras clasificaciones o predicciones con nuevas bases de datos que cumplan con todas las variables empleadas en el entrenamiento. Para ello, MATLAB® ofrece una función “Export Model” al finalizar el entrenamiento del modelo bajo aprendizaje supervisado. De acuerdo con la Figura 34, esta función permite exportar el modelo en tres formatos diferentes, cada una adaptada a diferentes necesidades para optimizar su desempeño [67].

Figura 34. Opción de clasificaciones



Para el presente estudio, se busca que el modelo entrenado mantenga su integridad y configuraciones al momento de ser exportado, con la finalidad de asegurar su precisión al momento de su aplicación con nuevos datos sin correr el riesgo de pérdida de información o tener que realizar ajustes adicionales al modelo. Por este motivo, MATLAB® recomienda emplear la exportación completa, debido a que esta modalidad mantiene la integridad del modelo. A continuación, en la Figura 35, se presenta la ecuación del modelo que ha sido generada y exportada en la ventana de trabajo de MATLAB®. En este código, "Yfit" representa las predicciones, mientras que "ModelInjectorNUA" contiene la base de datos de las variables de los inyectores. La función "predictFcn" genera predicciones para nuevos datos.

Figura 35. Ecuación generada por el modelo entrenado

```
Structure 'ModelInjectorNUA' exported from Classification Learner.
To make predictions on a new table, T:
    [yfit,scores] = ModelInjectorNUA.predictFcn(T)
For more information, see How to predict using an exported model.
```

Para clasificar una nueva muestra, se carga un archivo en formato "xlsx" y se modifica la variable "T" con el nombre del archivo que contiene nuevos datos organizados según las variables utilizadas en el modelo entrenado. Esta flexibilidad permite que el modelo sea adaptable, ya que, al cambiar el archivo de entrada, se pueden procesar grandes volúmenes de datos o distintas muestras de inyectores sin necesidad de reentrenar el modelo. Además, la estructura del modelo permite una rápida interpretación y análisis de resultados, ya que "Yfit" entrega directamente la clasificación predicha para cada muestra. En la Figura 36 presenta la tabla predeterminada generada por el modelo, ilustrando cómo se visualizan las clasificaciones correspondientes a los nuevos datos.

Figura 36. Tabla por defecto de resultados de clasificación

		Predicted Class		
		A	N	U
True Class	A	0	1	1
	N	1	0	1
	U	1	1	0

CAPÍTULO III

3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En el presente capítulo se describe el comportamiento del inyector CRI tomando en cuenta la variación del tiempo de inyección y la frecuencia de operación, para obtener datos de las variables dependientes (caudal de inyección, caudal de retorno y presión del riel). Con esto se obtiene un análisis estadístico y del comportamiento de los caudales (inyección y retorno), como también de la presión del riel entre un inyector nuevo, usado y averiado. Además, en base a los datos recolectados en la campaña experimental se desarrolla un sistema de diagnóstico predictivo por medio de Aprendizaje Automático. Esto permitirá obtener valores referenciales para determinar el estado de los inyectores CRI 0445110 250 de la Mazda BT 50, con ello llevar a cabo un correcto mantenimiento predictivo.

A continuación, se detallan los datos obtenidos de los inyectores por medio de graficas que representan las variables dependientes bajo los parámetros antes mencionados. En las gráficas los caudales y la presión de los inyectores son representados por medio de barras. Además, se establece las siglas para reconocer cada inyector, siendo “N” el inyector nuevo “U” el inyector usado y “A” el inyector averiado.

3.1 Análisis Estadístico del Estado de Operación del Inyector

El análisis exhaustivo de la curtosis presente en el apartado 3.1.1.1, 3.1.2.1 y 3.1.3.1, permite conocer la distribución de cada uno de los estados de operación del inyector en sus respectivas variables dependientes. La curtosis para los tres estados indica que tanto el caudal de inyección como el de retorno y presión del riel presentan mayormente una distribución platicúrtica. Esto indica que los datos de estas variables dependientes tienden a ser menos apuntados; es decir,

los datos están un poco más dispersos en los valores intermedios. Como resultado, la distribución tiene un pico central menos pronunciado y menor cantidad de valores en los extremos.

Además, los resultados del estudio enfocados en los análisis de regresión aplicado en los tres estados de operación del inyector en cada una de sus variables dependientes, exponen la evaluación de la influencia que genera las variables independientes sobre las variables dependientes con un 95% de confiabilidad, presentes en la sección 3.1.1.2, 3.1.2.2 y 0.

3.1.1 Caudal de Inyección

El análisis estadístico del caudal de inyección en los estados nuevo, usado y averiado muestra diferencias significativas en el desempeño del inyector. La curtosis presenta una distribución platicúrtica en todos los estados (2.41, 2.31 y 2.38), reflejando patrones de variabilidad debido al desgaste y las condiciones mecánicas. La regresión lineal múltiple evidencia una fuerte relación entre el caudal y las variables independientes, con altos valores de R^2 en todos los estados, confirmando la precisión del modelo predictivo.

El análisis de los coeficientes de regresión muestra que el caudal tiende a aumentar al incrementar las variables independientes, aunque el grado de sensibilidad varía según el estado del inyector. Los inyectores usados presentan los coeficientes más altos, lo que indica mayor sensibilidad a los cambios en las variables, seguidos de los averiados, mientras que los nuevos muestran la menor sensibilidad. Esto sugiere que el desgaste moderado amplifica la relación entre las variables y el caudal, mientras que el deterioro severo puede limitar este efecto. Estos hallazgos justifican el comportamiento del caudal bajo diferentes condiciones, proporcionando información clave para anticipar cambios en el desempeño del inyector y optimizar estrategias de mantenimiento predictivo.

3.1.1.1 Análisis Estadístico Curtosis

Los resultados de la curtosis, presentados en la Tabla 15, indican la distribución de los datos de cada uno de los estados de operación del inyector (N, U y A). En el caso del caudal de inyección presenta una distribución platicúrtica generada en todos los estados del inyector, con valores de curtosis de 2.41, 2.31 y 2.38 en ese orden de los estados de operación.

Tabla 15. Resultados de curtosis para el caudal de inyección

Estado del Inyector	Caudal de inyección
Nuevo	2.41
Usado	2.31
Averiado	2.38

3.1.1.2 Análisis Estadístico Regresión Lineal Múltiple

Los análisis de estadísticas de regresión reflejan una relación fuerte entre las variables independientes y el caudal de inyección como se detalla en la Tabla 16. En el N, el coeficiente de correlación múltiple (R) es 0.96, con un coeficiente de determinación (R^2) de 0.92, lo que indica que el 92% de la variabilidad del caudal se explica por las variables frecuencia y tiempo de inyección. El R^2 ajustado es de 91%, y el error estándar es de 1 ml. En el U, el R es de 0.94, con un R^2 de 89% y un R^2 ajustado de 88%, mientras que el error típico es de 1.5 ml. El A muestra un R de 0.97, un R^2 de 94%, un R^2 ajustado de 94% y un error típico de 0.99 ml. Estos valores sugieren que los modelos de regresión se ajustan bien a los datos en los tres casos, con una alta precisión.

Tabla 16. Estadísticas de regresión para el caudal de inyección

Medidas de precisión	Inyector nuevo	Inyector usado	Inyector averiado	Unidad
Coeficiente de correlación múltiple	0.96	0.94	0.97	---
Coeficiente de determinación R^2	92	89	94	%
R^2 ajustado	91	88	94	%
Error típico	1.00	1.50	0.99	ml

Nota: El modelo de regresión cuenta con 45 observaciones para el caudal de inyección en cada estado del inyector.

En los análisis de varianza observados en la Tabla 17, tanto la frecuencia como el tiempo de inyección muestran una influencia significativa en el caudal de los tres estados del inyector. Para el inyector nuevo, la frecuencia tiene una suma de cuadrados de 346.63 ml², con un valor de F de 348.25, y el tiempo de inyección una suma de cuadrados de 118.41 ml², con un valor de F de 118.96. En el inyector usado, la frecuencia tiene una suma de cuadrados de 532.81 ml², mientras que el tiempo de inyección muestra una suma de cuadrados de 192.53 ml², con un valor de F de 86.06. Para el inyector averiado, la frecuencia es de 494.96 ml², con un valor de F de 506.08, y el tiempo de inyección es de 133.99 ml² con un valor de F de 137.00.

Además, las variables independientes en los tres casos presentan un valor P menor a 0.05, lo que indica que las diferencias observadas son estadísticamente significativas con un nivel de confianza del 95%. En todos los inyectores, el error residual es bajo (41.81 ml² en el nuevo, 93.97 ml² en el usado y 41.08 ml² en el averiado), lo que indica que la variabilidad en el caudal es explicada principalmente por las variables estudiadas.

Tabla 17. Análisis de varianza para el caudal de inyección

Estado del inyector	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados (ml ²)	Gl	Promedio de cuadrados (ml ²)	Razón-F	Valor-P
Nuevo	Frecuencia	346.63	1	346.63	348.25	0.0000
	Tiempo de inyección	118.41	1	118.41	118.96	7.89×10 ⁻¹⁴
	Residuales	41.81	42	1.00		
	Total	506.84	44			
Usado	Frecuencia	532.81	1	532.81	238.15	0.0000
	Tiempo de inyección	192.53	1	192.53	86.06	1.01×10 ⁻¹¹
	Residuales	93.97	42	2.24		
	Total	819.31	44			
Averiado	Frecuencia	494.96	1	494.96	506.08	0.0000
	Tiempo de inyección	133.99	1	133.99	137.00	8.33×10 ⁻¹⁵
	Residuales	41.08	42	0.98		
	Total	670.02	44			

Los resultados de la regresión como se aprecian en la Tabla 18, confirman que tanto el tiempo de inyección como la frecuencia tienen un impacto significativo en el caudal. En el inyector

nuevo, el coeficiente asociado al tiempo de inyección es 3.97 ml/ms, lo que significa que, por cada incremento de 1 ms, el caudal aumenta en 3.97 ml. Asimismo, el coeficiente de la frecuencia es 0.64 ml/Hz, indicando que un incremento de 1 Hz en la frecuencia lo aumenta en 0.64 ml, con valores de p de 7.89×10^{-14} y 6.05×10^{-22} , respectivamente. Para el inyector usado, los coeficientes son idénticos: 3.97 ml/ms para el tiempo de inyección y 0.64 ml/Hz para la frecuencia, ambos con alta significancia estadística. En el inyector averiado, cada milisegundo de tiempo de inyección incrementa el caudal en 4.23 ml/ms, mientras que un incremento de 1 Hz en la frecuencia lo incrementa en 0.77 ml/Hz. Los valores de p en todos los casos son altamente significativos, y la intercepción negativa es meramente un ajuste del modelo sin interpretación práctica.

Tabla 18. Coeficientes de regresión para el caudal de inyección

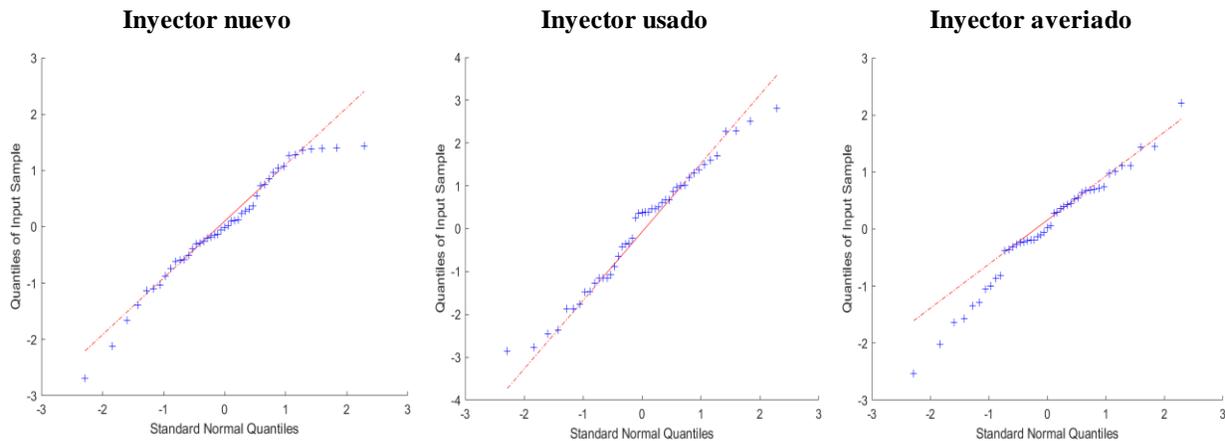
Estado del inyector	Origen de las variaciones	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Valor-P	Inferior 95%	Superior 95%
Nuevo	Intercepto	-5.09	0.63	-8.09	4.19×10^{-10}	-6.37	-3.82
	Frecuencia	0.64	0.03	18.66	6.05×10^{-22}	0.57	0.71
	Tiempo de inyección	3.97	0.36	10.91	7.89×10^{-14}	3.24	4.71
Usado	Intercepto	-6.96	0.94	-7.37	4.32×10^{-9}	-8.86	-5.05
	Frecuencia	0.80	0.05	15.43	6.52×10^{-19}	0.69	0.90
	Tiempo de inyección	5.07	0.55	9.28	1.01×10^{-11}	3.96	6.17
Averiado	Intercepto	-6.21	0.62	-9.94	1.34×10^{-12}	-7.47	-4.95
	Frecuencia	0.77	0.03	22.50	4.75×10^{-25}	0.70	0.84
	Tiempo de inyección	4.23	0.36	11.70	8.34×10^{-15}	3.50	4.96

Nota: Las unidades correspondientes al coeficiente y al error típico son las siguientes: ml para el intercepto, ml/Hz para la frecuencia y ml/ms para el tiempo de inyección.

El análisis de los residuales para los tres inyectores como se observa en el Anexo 3, indica que las predicciones del modelo son precisas. En el inyector nuevo, el error absoluto medio (MAE) es de 0.76 ml, lo que sugiere que las predicciones se desvían en promedio 0.76 ml del valor real. En el inyector usado, los residuales varían entre -2.86 ml y 2.8 ml, con un MAE de 1.23 ml, indicando una desviación moderada respecto a los valores observados. En el inyector averiado, el MAE es de 0.75 ml, con residuales entre -2.54 ml y 2.21 ml, lo que muestra que el modelo predice con una precisión moderada. La Figura 37, muestra las gráficas QQ de residuales del modelo de

caudal de inyección para cada estado de operación del inyector muestran valores cercanos a la línea de referencia, validando los modelos; Sin embargo, algunos puntos se alejan ligeramente de dicha línea, lo cual se debe a la curtosis observada en la Tabla 15.

Figura 37. QQ de residuales del modelo de caudal de inyección



Las ecuaciones (4), (5) y (6) presentan las ecuaciones de regresión para el inyector nuevo, usado y averiado, respectivamente. Estas expresiones permiten comprender cómo las variables independientes afectan a la variable dependiente. Además, cada ecuación refleja las diferencias en el comportamiento de los inyectores según su estado, destacando cómo varía su rendimiento frente a cambios en las condiciones de operación.

$$Fuel\ injection_N = -5.0946 + 0.6424 \times Frequency + 3.9733 \times Injection\ time \quad (4)$$

$$Fuel\ injection_U = -6.9581 + 0.7964 \times Frequency + 5.0667 \times Injection\ time \quad (5)$$

$$Fuel\ injection_A = -6.2054 + 0.7676 \times Frequency + 4.2267 \times Injection\ time \quad (6)$$

3.1.2 Caudal de Retorno

El análisis del caudal de retorno en los estados nuevo, usado y averiado revela diferencias significativas en el desempeño del inyector. La curtosis muestra variabilidad, con una distribución leptocúrtica en el estado nuevo y platicúrtica en los estados usado y averiado. La regresión lineal múltiple confirma una fuerte relación entre el caudal y las variables independientes, con valores

de R^2 entre 0.84 y 0.97. El análisis de varianza destaca efectos significativos del tiempo y la frecuencia de inyección.

El análisis de los coeficientes de regresión muestra que el tiempo de inyección tiene un impacto mayor sobre el caudal de retorno en comparación con la frecuencia. Este efecto es más pronunciado en los inyectores usados, cuyos coeficientes asociados al tiempo de inyección son los más elevados, seguidos por los averiados, mientras que los nuevos presentan los valores más bajos. Este patrón sugiere que el desgaste incrementa la sensibilidad del caudal de retorno al tiempo de inyección. Estos resultados permiten justificar el comportamiento del caudal de retorno frente a las variables independientes, destacando la importancia del tiempo de inyección en la evaluación del desempeño del inyector.

3.1.2.1 Análisis Estadístico Curtosis

Los resultados de la curtosis, presentados en la Tabla 19, indican la distribución de los datos de cada uno de los estados de operación del inyector (N, U y A). En el caso del caudal de retorno, para los mismos tres estados, se tiene respectivamente una curtosis de 3.15, 2.53 y 2.26, lo que muestra una distribución leptocúrtica para el caudal de retorno para el N, en contraparte para el U y A la distribución es platicúrtica.

Tabla 19. Resultados de curtosis para el caudal de retorno

Estado del Inyector	Caudal de retorno
Nuevo	3.15
Usado	2.53
Averiado	2.26

3.1.2.2 Análisis Estadístico Regresión Lineal Múltiple

El análisis de las estadísticas de regresión reflejado en la Tabla 20, muestra que el caudal de retorno en los tres inyectores, tiene una fuerte relación directa entre las variables estudiadas. En

el caso del inyector nuevo, tiene un R de 0.92, con un R^2 de 0.84, que el modelo explica el 84% de la variabilidad en el caudal, mientras que el R^2 ajustado es de 83%. En el inyector usado, el R es de 0.94, con un R^2 de 88% y un R^2 ajustado de 87%. Finalmente, en el inyector averiado, el R es el más alto, de 0.98, con un R^2 de 97% y un R^2 ajustado de 96%. Los errores típicos son relativamente bajos en los tres inyectores (0.48 ml para el nuevo, 0.42 ml para el usado y 0.21 ml para el averiado), lo que refleja una buena precisión en las predicciones.

Tabla 20. Estadísticas de regresión para el caudal de retorno

Medidas de precisión	Inyector nuevo	Inyector usado	Inyector averiado	Unidad
Coefficiente de correlación múltiple	0.92	0.94	0.98	---
Coefficiente de determinación R^2	84	88	97	%
R^2 ajustado	83	87	96	%
Error típico	0.48	0.42	0.21	ml

Nota: El modelo de regresión cuenta con 45 observaciones para el caudal de retorno en cada estado del inyector.

El análisis de varianza reflejado en la Tabla 21 confirma que tanto la frecuencia como el tiempo de inyección tienen un efecto significativo sobre el caudal de retorno. En el inyector nuevo, la frecuencia tiene una suma de cuadrados de 44.81 ml^2 , un valor de F de 193.5, y el tiempo de inyección una suma de cuadrados de 5.81 ml^2 con un valor de F de 25.08. El error residual es bajo, con una suma de 9.73 ml^2 . En el inyector usado, la frecuencia muestra una suma de cuadrados de 38.83 ml^2 y un valor de F de 222.12, mientras que el tiempo de inyección tiene una suma de cuadrados de 14.15 ml^2 y un valor de F de 80.92. El error residual es de 7.34 ml^2 . En el inyector averiado, la frecuencia presenta una suma de cuadrados de 44.53 con un valor de F de 980.2, y el tiempo de inyección una suma de 10.9 ml^2 con un valor de F de 10.09. En los tres casos, se confirma una significancia estadística alta ($p < 0.05$) con un nivel de confianza del 95% y un error mínimo en la variabilidad no explicada por las variables independientes.

Tabla 21. Análisis de varianza para el caudal de retorno

Estado del inyector	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados (ml ²)	Gl	Promedio de cuadrados (ml ²)	Razón-F	Valor-P
Nuevo	Frecuencia	44.81	1	44.81	193.50	0.0000
	Tiempo de inyección	5.81	1	5.81	25.08	1.04×10 ⁻⁵
	Residuales	9.73	42	0.23		
	Total	60.34	44			
Usado	Frecuencia	38.83	1	38.83	222.12	0.0000
	Tiempo de inyección	14.15	1	14.15	80.92	2.40×10 ⁻¹¹
	Residuales	7.34	42	0.17		
	Total	60.32	44			
Averiado	Frecuencia	44.53	1	44.53	980.20	0.0000
	Tiempo de inyección	10.09	1	10.09	222.16	0.0000
	Residuales	1.91	42	0.05		
	Total	56.53	44			

Por otro lado, los coeficientes de regresión en la Tabla 22 destacan la influencia del tiempo de inyección y la frecuencia en el caudal de retorno. En el inyector nuevo, el coeficiente asociado al tiempo de inyección es 1.37 ml/ms, indicando que, por cada milisegundo adicional, el caudal aumenta en 1.37 ml. El coeficiente de la frecuencia es 0.22 ml/Hz, señalando que un incremento de 1 Hz genera un aumento de 0.22 ml. En el inyector usado, el incremento en el caudal es de 1.37 ml/ms y 0.22 ml/Hz, similar al inyector nuevo. En el inyector averiado, el caudal aumenta 1.16 ml/ms y 0.23 ml/Hz. En todos los casos, los coeficientes son estadísticamente significativos.

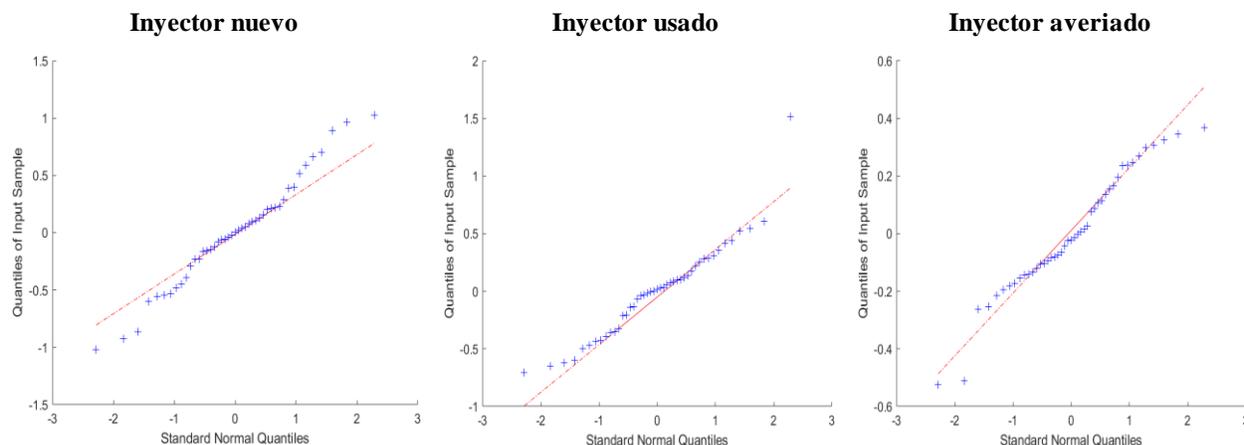
Tabla 22. Coeficientes de regresión para el caudal de retorno

Estado del inyector	Origen de las variaciones	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Valor-P	Inferior 95%	Superior 95%
Nuevo	Intercepto	-0.39	0.30	-1.28	0.206	-1.00	0.22
	Frecuencia	0.23	0.02	13.91	2.54×10 ⁻¹⁷	0.20	0.26
	Tiempo de inyección	0.88	0.18	5.01	1.04×10 ⁻⁵	0.53	1.23
Usado	Intercepto	-0.97	0.26	-3.68	6.59×10 ⁻⁴	-1.50	-0.44
	Frecuencia	0.22	0.01	14.90	2.26×10 ⁻¹⁸	0.19	0.24
	Tiempo de inyección	1.37	0.15	9.00	2.40×10 ⁻¹¹	1.07	1.68
Averiado	Intercepto	-0.29	0.13	-2.15	0.038	-0.56	-0.02
	Frecuencia	0.23	0.01	31.31	9.65×10 ⁻³¹	0.22	0.25
	Tiempo de inyección	1.16	0.08	14.90	2.25×10 ⁻¹⁸	1.00	1.32

Nota: Las unidades correspondientes al coeficiente y al error típico son las siguientes: ml para el intercepto, ml/Hz para la frecuencia y ml/ms para el tiempo de inyección.

El análisis de los residuales, según se observa en el Anexo 3, muestra una variabilidad moderada entre los valores reales de los caudales y los pronosticados. En el caso del inyector nuevo, los residuos fluctúan entre -1.02 ml y 1.03 ml, con un MAE de 0.35 ml. En el inyector usado, los residuales fluctúan entre -0.71 ml y 1.52 ml, con un MAE de 0.30 ml. Finalmente, en el inyector averiado, los residuales van desde -0.52 ml hasta 0.37 ml, con un MAE de 0.17 ml. Esto sugiere que, aunque hay algunas desviaciones entre los valores reales y las predicciones, el modelo es moderadamente preciso para los tres inyectores. Las gráficas QQ de los residuales del modelo de caudal de retorno, ilustradas en la Figura 38 para cada condición operativa del inyector, muestran que los puntos están, en su mayoría, cercanos a la línea de referencia, lo que da soporte a la precisión del modelo. Sin embargo, ciertos puntos se desvían levemente de la línea ideal, un efecto asociado a la curtosis señalada en la Tabla 19.

Figura 38. QQ de residuales del modelo de caudal de retorno



La ecuación de regresión para el inyector nuevo, usado y averiado se muestran en las ecuaciones (7), (8) y (9), respectivamente. Donde cada ecuación refleja el comportamiento que se genera dependiendo del estado del inyector y la influencia generada en las variables independientes con respecto a la dependiente.

$$Fuel\ return_N = -0.3898 + 0.2310 \times Frequency + 0.8800 \times Injection\ time \quad (7)$$

$$Fuel\ return_U = -0.9711 + 0.2150 \times Frequency + 1.3733 \times Injection\ time \quad (8)$$

$$Fuel\ return_A = -0.2886 + 0.2302 \times Frequency + 1.1600 \times Injection\ time \quad (9)$$

3.1.3 Presión del Riel Común

El análisis de la presión del riel común en inyectores nuevos, usados y averiados revela diferencias significativas. La curtosis muestra una distribución platicúrtica para los inyectores nuevos y usados, mientras que el averiado presenta una distribución leptocúrtica, reflejando variaciones en la dispersión de datos. La regresión lineal múltiple indica una relación significativa entre la presión del riel y las variables independientes, con valores de R^2 entre 63% y 79%.

Los coeficientes muestran que el tiempo de inyección y la frecuencia afectan negativamente la presión, siendo el tiempo de inyección el factor más influyente. Los coeficientes del tiempo de inyección son mayores en el inyector usado, seguido por el averiado y el nuevo. Aunque la frecuencia tiene un efecto negativo, su impacto es menor. Estos resultados explican el comportamiento decreciente de la presión del riel al aumentar las variables independientes.

3.1.3.1 Análisis Estadístico Curtosis

Los resultados de la curtosis para el caso de la presión del riel común, presentados en la Tabla 23, indican la distribución de los datos de cada uno de los estados de operación del inyector (N, U y A). En el caso del N y U presentan una curtosis platicúrtica con valores de 2.25 y 2.24 respectivamente, mientras que el inyector A, con una curtosis de 3.18, indica una distribución leptocúrtica.

Tabla 23. Resultados de curtosis para la presión del riel común

Estado del Inyector	Presión del riel
Nuevo	2.25
Usado	2.24
Averiado	3.18

3.1.3.2 Análisis Estadístico Regresión Lineal Múltiple

La regresión lineal que se detalla en la Tabla 24 muestra un R del 0.84 en el inyector nuevo, lo que indica una fuerte relación entre las variables independientes y la presión del riel, con un R^2 de 70% y un R^2 ajustado de 68%, además de un error típico de 10.94 bares. En el caso del inyector usado, el R es del 0.80, con un R^2 de 63% y un R^2 ajustado de 62%, con un error típico de 28.84 bares. Para el inyector averiado, el R es del 0.89, con un R^2 de 79% y un R^2 ajustado de 78%, mostrando un error de 10.28 bares. Estos resultados indican que, aunque los modelos capturan buena parte de la variabilidad en la presión, algunos factores no considerados pueden estar influyendo.

Tabla 24. Estadísticas de regresión para la presión del riel

Medidas de precisión	Inyector nuevo	Inyector usado	Inyector averiado	Unidad
Coefficiente de correlación múltiple	0.84	0.80	0.89	---
Coefficiente de determinación R^2	70	63	79	%
R^2 ajustado	68	62	78	%
Error típico	10.94	28.84	10.28	bar

Nota: El modelo de regresión cuenta con 45 observaciones para la presión del riel en cada estado del inyector.

El análisis de la varianza en la Tabla 25 muestra que tanto la frecuencia como el tiempo de inyección influyen significativamente en la presión del riel en los tres inyectores. En el inyector nuevo, la frecuencia tiene una suma de cuadrados de 11147 bares² y un valor de F de 93.07, mientras que el tiempo de inyección tiene una suma de cuadrados de 480 bares² y un valor de F de 4.1. Para el inyector usado, la frecuencia presenta una suma de cuadrados de 43430 bares² y un valor de F de 52.22, mientras que el tiempo tiene una suma de cuadrados de 17280 bares² y un valor de F de 20.78. En el inyector averiado, la frecuencia tiene una suma de cuadrados de 12808 bares² y un valor de F de 121.24, y el tiempo una suma de cuadrados de 4320 bares² con un valor de F de 40.89. En todos los casos, el valor-P es menor a 0.05, indicando una confiabilidad del 95% y un error mínimo, demostrando una variabilidad reducida frente a la influencia de las variables.

Tabla 25. Análisis de varianza para la presión del riel

Estado del inyector	Origen de las variaciones	Suma de cuadrados (bar ²)	Gl	Promedio de cuadrados (bar ²)	Razón-F	Valor-P
Nuevo	Frecuencia	11147.0	1	11147.00	93.07	3.24×10 ⁻¹²
	Tiempo de inyección	480.0	1	480.00	4.01	0.05
	Residuales	5030.6	42	119.78		
	Total	16658.0	44			
Usado	Frecuencia	43430.0	1	43430.0	52.22	6.92×10 ⁻⁹
	Tiempo de inyección	17280.0	1	17280.0	20.78	4.41×10 ⁻⁵
	Residuales	34934.0	42	831.76		
	Total	95644.0	44			
Averiado	Frecuencia	12808.0	1	12808.0	121.24	5.86×10 ⁻¹⁴
	Tiempo de inyección	4320.0	1	4320.0	40.89	1.07×10 ⁻⁷
	Residuales	4436.8	42	105.64		
	Total	21564.0	44			

En la Tabla 26, el tiempo de inyección como la frecuencia afectan negativamente la presión del riel en los tres inyectores. En el inyector nuevo, el coeficiente del tiempo de inyección es -8.00 bar/ms (valor-p 0.0518) y el de la frecuencia es -3.64 bar/Hz (valor-p 3.24×10⁻¹²). En el usado, el coeficiente del tiempo de inyección es -48 bar/ms (valor-p 4.41×10⁻⁵) y el de la frecuencia es -7.19 bar/Hz (valor-p 6.92×10⁻⁹). Para el inyector averiado, el coeficiente del tiempo de inyección es -24 bar/ms (valor-p 1.07×10⁻⁷) y el de la frecuencia es -3.90 bar/Hz (valor-p 5.86×10⁻¹⁴). Estos valores confirman que la presión del riel disminuye con el aumento de estas variables.

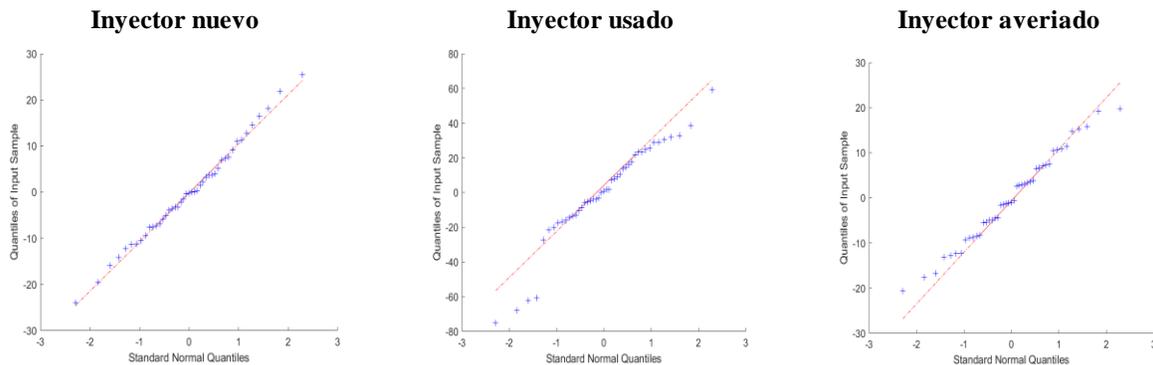
Tabla 26. Coeficientes de regresión para la presión del riel

Estado del inyector	Origen de las variaciones	Coefficiente	Error típico	Estadístico t	Valor-P	Inferior 95%	Superior 95%
Nuevo	Intercepto	762.92	6.91	110.44	2.16×10 ⁻⁵³	748.98	776.86
	Frecuencia	-3.64	0.38	-9.65	3.24×10 ⁻¹²	-4.40	-2.88
	Tiempo de inyección	-8.00	4.00	-2.00	0.052	-16.06	0.06
Usado	Intercepto	960.63	18.20	52.77	5.04×10 ⁻⁴⁰	923.90	997.37
	Frecuencia	-7.19	1.00	-7.23	6.92×10 ⁻⁹	-9.20	-5.18
	Tiempo de inyección	-48.00	10.53	-4.56	4.41×10 ⁻⁵	-69.25	-26.75
Averiado	Intercepto	804.13	6.49	123.95	1.72×10 ⁻⁵⁵	791.03	817.22
	Frecuencia	-3.90	0.35	-11.01	5.86×10 ⁻¹⁴	-4.62	-3.19
	Tiempo de inyección	-24.00	3.75	-6.39	1.07×10 ⁻⁷	-31.57	-16.43

Nota: Las unidades correspondientes al coeficiente y al error típico son las siguientes: bar para el intercepto, bar/Hz para la frecuencia y bar/ms para el tiempo de inyección.

En cuanto a los residuales (Anexo 3), el inyector nuevo muestra diferencias entre -23.99 bares y 25.51 bares, con un MAE de 8.30 bares, mientras que el inyector usado tiene residuales que van de -75.11 bares a 59.22 bares, con un MAE de 20.93 bares. En el averiado, los residuales varían entre -20.6 bares y 19.68 bares, con un MAE de 8.25 bares. El MAE es el promedio de los residuales del modelo en valores absolutos. Muestra pequeñas desviaciones en las predicciones de la presión del riel común, con respecto a los valores reales de la presión en cada uno de los inyectores. Sin embargo, el nivel general de precisión es aceptable en los tres casos analizados. El análisis de los residuos en la Figura 39 indica un buen ajuste del modelo de presión en el riel común, con la mayoría de los puntos alineados con la línea de identidad. Sin embargo, se observan algunas pequeñas desviaciones, debido a la curtosis detectada en la Tabla 23.

Figura 39. QQ de residuales del modelo de presión del riel común



Finalmente, las ecuaciones (10), (11) y (12) refleja las ecuaciones generadas en el inyector nuevo, usado y averiado, respectivamente. Cada ecuación muestra el comportamiento generado en la presión del riel dependiendo del estado de operación del inyector y la influencia entre las variables.

$$Rail\ pressure_N = 762.9206 - 3.6428 \times Frequency - 8.0 \times Injection\ time \quad (10)$$

$$Rail\ pressure_U = 960.6349 - 7.1905 \times Frequency - 48.0 \times Injection\ time \quad (11)$$

$$Rail\ pressure_A = 804.1270 - 3.9048 \times Frequency - 24.0 \times Injection\ time \quad (12)$$

3.2 Análisis del Comportamiento de los Inyectores

Se evalúa el impacto del estado del inyector en el desempeño del sistema de inyección, considerando el caudal, retorno y presión del riel común. Los resultados muestran variaciones significativas entre inyectores.

3.2.1 Caudal de Inyección

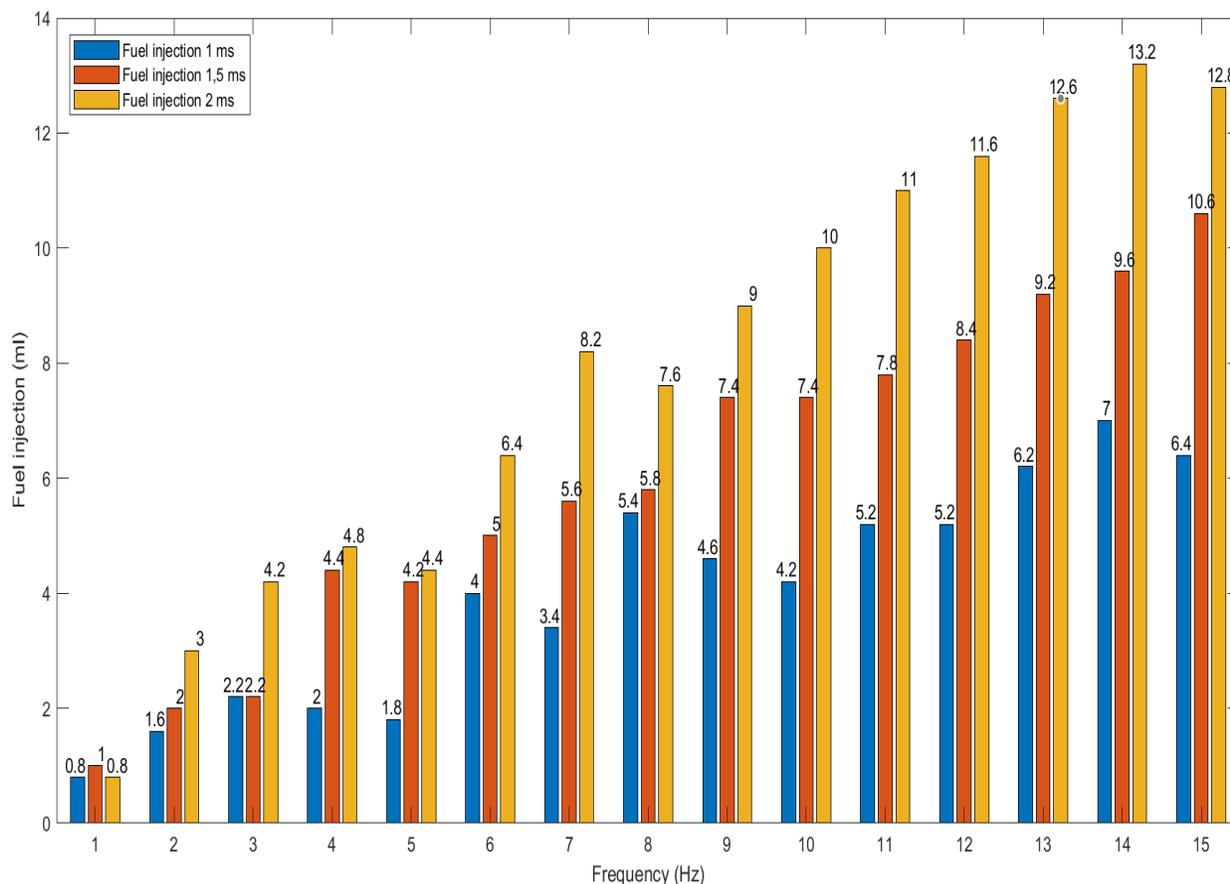
El análisis del caudal de inyección revela tendencias diferenciadas según el estado operativo del inyector. En un inyector nuevo, el caudal aumenta uniformemente con la frecuencia, alcanzando valores máximos a altas frecuencias y mostrando ligeras oscilaciones, lo que refleja un funcionamiento eficiente. En un inyector usado, se observan aumentos similares, pero con mayor variabilidad y disminuciones ocasionales a frecuencias intermedias, lo que indica un rendimiento afectado por el desgaste. El inyector defectuoso presenta valores intermedios con fluctuaciones y picos a frecuencias específicas, lo que refleja ineficiencias internas. En general, el caudal de inyección aumenta con frecuencia y tiempo de inyección en los tres estados, con diferencias atribuibles al desgaste o al daño, lo que afecta al suministro de combustible y al rendimiento.

3.2.1.1 Inyector Nuevo

El caudal de inyección en función de la frecuencia y tiempo de inyección para el inyector nuevo, en la Figura 40 se observan incrementos notables en los tres tiempos de inyección. A 1 Hz, el caudal inicial es de 0,8 ml para 1 ms y 2 ms, y de 1,0 ml para 1,5 ms. A 2 Hz, se observan aumentos significativos para cada tiempo de inyección: 1,6 ml para 1 ms, 2,0 ml para 1,5 ms y 3,0 ml para 2 ms. A 3 Hz, los caudales aumentan a 2,2 ml tanto para 1 ms como para 1,5 ms, alcanzando los 4,2 ml a 2 ms. A 4 Hz, se observan incrementos continuos, con caudales de 2,0 ml durante 1 ms, 4,4 ml durante 1,5 ms y 4,8 ml durante 2 ms. Sin embargo, a 5 Hz, se observa un ligero descenso en los tres tiempos de inyección: 1.8 ml para 1 ms, 4.2 ml para 1.5 ms y 4.4 ml

para 2 ms. A 6 Hz, el caudal retoma su tendencia de aumento, alcanzando 4.0 ml para 1 ms, 5.0 ml para 1.5 ms y 6.4 ml para 2 ms. En 7 Hz, el caudal continúa incrementándose, con valores de 3.4 ml en 1 ms, 5.6 ml en 1.5 ms y 8.2 ml en 2 ms. En 8 Hz, el caudal continúa incrementándose, con valores de 5.4 ml en 1 ms, 5.8 ml para 1.5 ms y 7.6 ml para 2 ms. En 9 Hz, los valores de caudal se estabilizan en 4.6 ml para 1 ms, mientras que para 1.5 ms y 2 ms se incrementan a 7.4 ml y 9.0 ml, respectivamente, manteniendo esta estabilidad hasta 10 Hz. En 11 Hz, el caudal aumenta a 5.2 ml para 1 ms, 7.8 ml para 1.5 ms y 11.0 ml para 2 ms. A 12 Hz, se observa una leve estabilización en 5.2 ml para 1 ms, mientras que los caudales en 1.5 ms y 2 ms suben a 8.4 ml y 11.6 ml, respectivamente. En 13 Hz, el caudal retoma el incremento, alcanzando 6.2 ml en 1 ms, 9.2 ml en 1.5 ms y manteniéndose en 12.6 ml para 2 ms. A 14 Hz, se alcanzan los valores máximos de caudal,

Figura 40. Caudal de inyección del inyector nuevo según frecuencia y tiempo de inyección



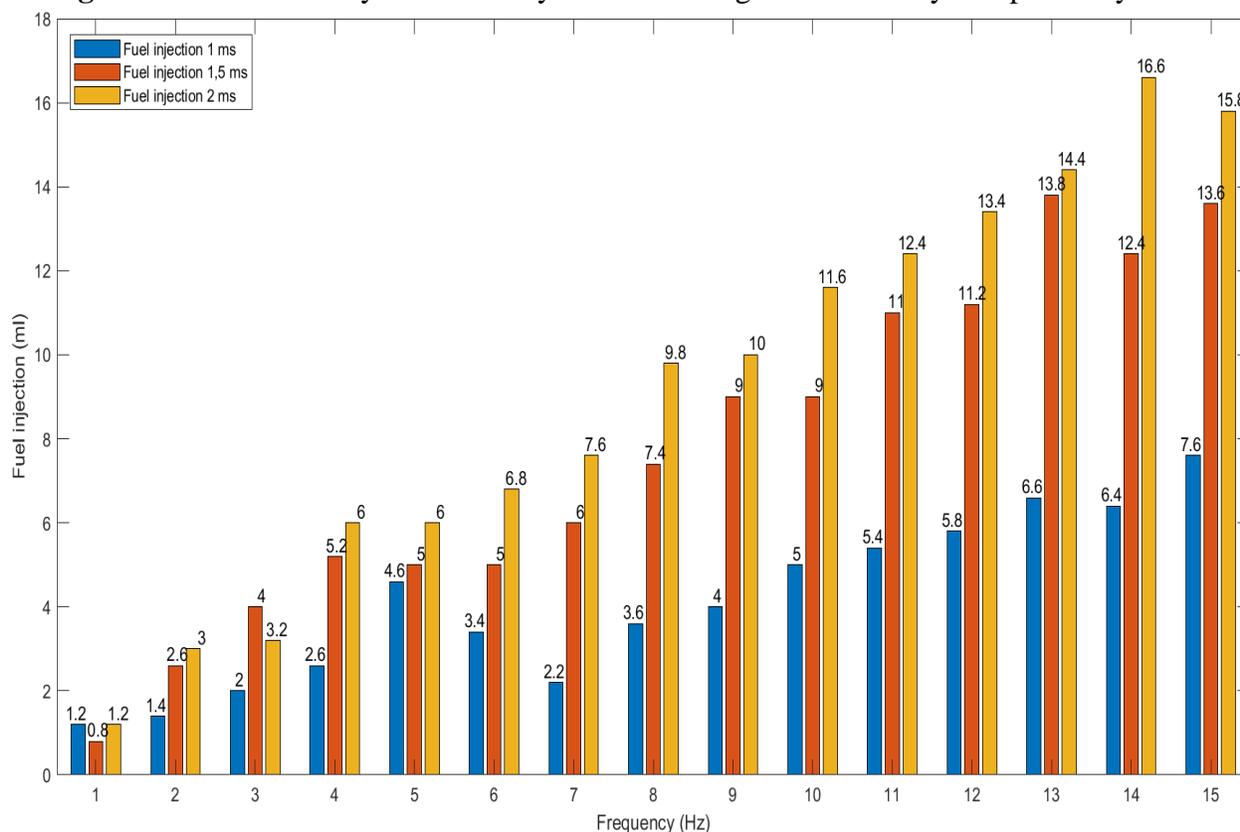
En 8 Hz, se registra una subida en los caudales, situándose en 5.4 ml para 1 ms y 5.8 ml para 1.5 ms, aunque hay una ligera disminución a 7.6 ml en 2 ms. A 9 Hz, los valores de caudal se estabilizan en 4.6 ml para 1 ms, mientras que para 1.5 ms y 2 ms se incrementan a 7.4 ml y 9.0 ml, respectivamente, manteniendo esta estabilidad hasta 10 Hz. En 11 Hz, el caudal aumenta a 5.2 ml para 1 ms, 7.8 ml para 1.5 ms y 11.0 ml para 2 ms. A 12 Hz, se observa una leve estabilización en 5.2 ml para 1 ms, mientras que los caudales en 1.5 ms y 2 ms suben a 8.4 ml y 11.6 ml, respectivamente. En 13 Hz, el caudal retoma el incremento, alcanzando 6.2 ml en 1 ms, 9.2 ml en 1.5 ms y manteniéndose en 12.6 ml para 2 ms. A 14 Hz, se alcanzan los valores máximos de caudal,

con 7.0 ml en 1 ms, 9.6 ml en 1.5 ms y 13.2 ml en 2 ms. Finalmente, en 15 Hz, se observa un ligero descenso en el caudal, registrando 6.4 ml para 1 ms, mientras que los caudales para 1.5 ms y 2 ms alcanzan 10.6 ml y 12.8 ml, respectivamente.

3.2.1.2 Inyector Usado

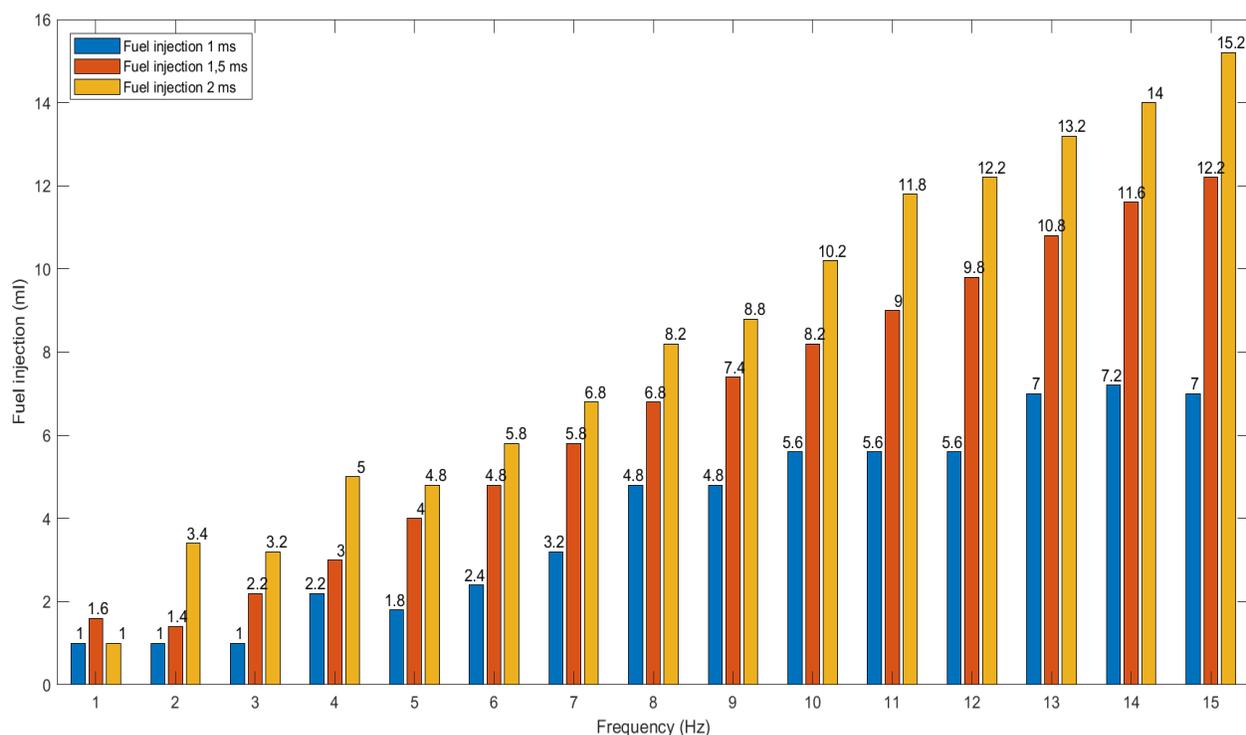
Al analizar el comportamiento del caudal en función de la frecuencia en un inyector usado, en la Figura 41 se observan variaciones en los caudales a medida que la frecuencia aumenta en cada tiempo de inyección. A 1 Hz, el caudal es de 1.2 ml para 1 ms y 2 ms, y de 0.8 ml para 1.5 ms. A 2 Hz, los caudales aumentan a 1.4 ml (1 ms), 2.6 ml (1.5 ms) y 3.0 ml (2 ms). En 3 Hz, el caudal sigue subiendo a 2.0 ml (1 ms), 4.0 ml (1.5 ms) y 3.2 ml (2 ms). En 4 Hz, el caudal se eleva a 2.6 ml (1 ms), 5.2 ml (1.5 ms) y 6.0 ml (2 ms). A 5 Hz, el caudal alcanza 4.6 ml (1 ms), mientras que en 1.5 ms y 2 ms permanece en 5.0 ml y 6.0 ml, respectivamente.

A 6 Hz, se observa un descenso a 3.4 ml en 1 ms, mientras que en 1.5 ms se mantiene en 5.0 ml y en 2 ms se eleva a 6.8 ml. En 7 Hz, el caudal sigue descendiendo a 2.2 ml para 1 ms, mientras que en 1.5 ms aumenta ligeramente a 6.0 ml y en 2 ms sube a 7.6 ml. A 8 Hz, el caudal de 1 ms se recupera, alcanzando 3.6 ml, mientras que en 1.5 ms sube a 7.4 ml y en 2 ms llega a 9.8 ml. A partir de 9 Hz, el caudal sigue en ascenso, registrando valores de 4.0 ml en 1 ms, 9.0 ml en 1.5 ms y 10.0 ml en 2 ms. En 10 Hz, los caudales se incrementan nuevamente, alcanzando 5.0 ml en 1 ms, 9.0 ml en 1.5 ms y 11.6 ml en 2 ms. En 11 Hz, el caudal sube a 5.4 ml para 1 ms, 11.0 ml para 1.5 ms y 12.4 ml para 2 ms. A 12 Hz, el incremento continúa con valores de 5.8 ml en 1 ms, 11.2 ml en 1.5 ms y 13.4 ml en 2 ms. En 13 Hz, se observan máximos de 6.6 ml para 1 ms, 13.8 ml para 1.5 ms y 14.4 ml para 2 ms. En 14 Hz, el caudal desciende ligeramente a 6.4 ml en 1 ms, 12.4 ml en 1.5 ms y 16.6 ml en 2 ms. Finalmente, a 15 Hz, se registran los valores máximos de 7.6 ml en 1 ms, 13.6 ml en 1.5 ms y 15.8 ml en 2 ms.

Figura 41. Caudal de inyección del inyector usado según frecuencia y tiempo de inyección

3.2.1.3 Inyector Averiado

Al analizar el caudal de inyección en función de la frecuencia para un inyector averiado (véase Figura 42), se observan incrementos y variaciones de acuerdo con los distintos tiempos de inyección. A 1 Hz, el caudal inicia en 1.0 ml para 1 ms y 2 ms, mientras que para 1.5 ms es de 1.6 ml. A 2 Hz, el caudal permanece en 1.0 ml en 1 ms, disminuye a 1.4 ml en 1.5 ms y sube a 3.4 ml en 2 ms. En 3 Hz, el caudal registra valores de 1.0 ml en 1 ms, 2.2 ml en 1.5 ms y 3.2 ml en 2 ms. En 4 Hz, los caudales aumentan a 2.2 ml en 1 ms, 3.0 ml en 1.5 ms y 5.0 ml en 2 ms. A 5 Hz, se observa una caída a 1.8 ml en 1 ms, mientras que en 1.5 ms sube a 4.0 ml y en 2 ms disminuye ligeramente a 4.8 ml. A 6 Hz, el caudal aumenta a 2.4 ml para 1 ms, sube a 4.8 ml para 1.5 ms y alcanza 5.8 ml en 2 ms. En 7 Hz, el caudal sigue en aumento, con 3.2 ml en 1 ms, 5.8 ml en 1.5 ms y 6.8 ml en 2 ms. A 8 Hz, el caudal de 1 ms muestra un incremento significativo, llegando a 4.8 ml, mientras que en 1.5 ms sube a 6.8 ml y en 2 ms a 8.2 ml.

Figura 42. Caudal de inyección del inyector averiado según frecuencia y tiempo de inyección

A 9 Hz, los valores se mantienen en 4.8 ml para 1 ms, 7.4 ml para 1.5 ms y 8.8 ml para 2 ms. En 10 Hz, el caudal sube a 5.6 ml en 1 ms, 8.2 ml en 1.5 ms y 10.2 ml en 2 ms. En 11 Hz, el caudal permanece en 5.6 ml para 1 ms, incrementa a 9.0 ml para 1.5 ms y alcanza 11.8 ml en 2 ms. A 12 Hz, los caudales son de 5.6 ml en 1 ms, 9.8 ml en 1.5 ms y 12.2 ml en 2 ms. En 13 Hz, se observan máximos de 7.0 ml para 1 ms, 10.8 ml para 1.5 ms y 13.2 ml para 2 ms. En 14 Hz, el caudal aumenta ligeramente a 7.2 ml en 1 ms, 11.6 ml en 1.5 ms y 14.0 ml en 2 ms. Finalmente, a 15 Hz, se registran los valores máximos de 7.0 ml en 1 ms, 12.2 ml en 1.5 ms y 15.2 ml en 2 ms. Este comportamiento refleja una tendencia de incremento general del caudal conforme aumenta la frecuencia, aunque con algunas oscilaciones en frecuencias intermedias, sugiriendo posibles ineficiencias internas del inyector averiado.

3.2.2 Caudal de Retorno

El comportamiento del caudal de retorno en los diferentes estados operativos del inyector evidencia variaciones que se acentúan al incrementar la frecuencia y el tiempo de inyección. En el

inyector nuevo, el caudal de retorno tiende a aumentar de manera progresiva y controlada con la frecuencia, estabilizándose en ciertos puntos y mostrando valores relativamente bajos en tiempos de inyección más cortos. Para el inyector usado, las fluctuaciones son más notorias, con caudales que presentan incrementos menos uniformes, sugiriendo una mayor variabilidad atribuible al desgaste que afecta la precisión del retorno. En el caso del inyector averiado, el caudal de retorno es más elevado desde frecuencias bajas, con incrementos pronunciados y comportamientos erráticos a frecuencias intermedias, lo que refleja deficiencias internas significativas. Estas diferencias indican que el estado del inyector impacta directamente la capacidad de retorno del combustible, afectando la eficiencia del sistema de inyección y la estabilidad en la mezcla aire-combustible.

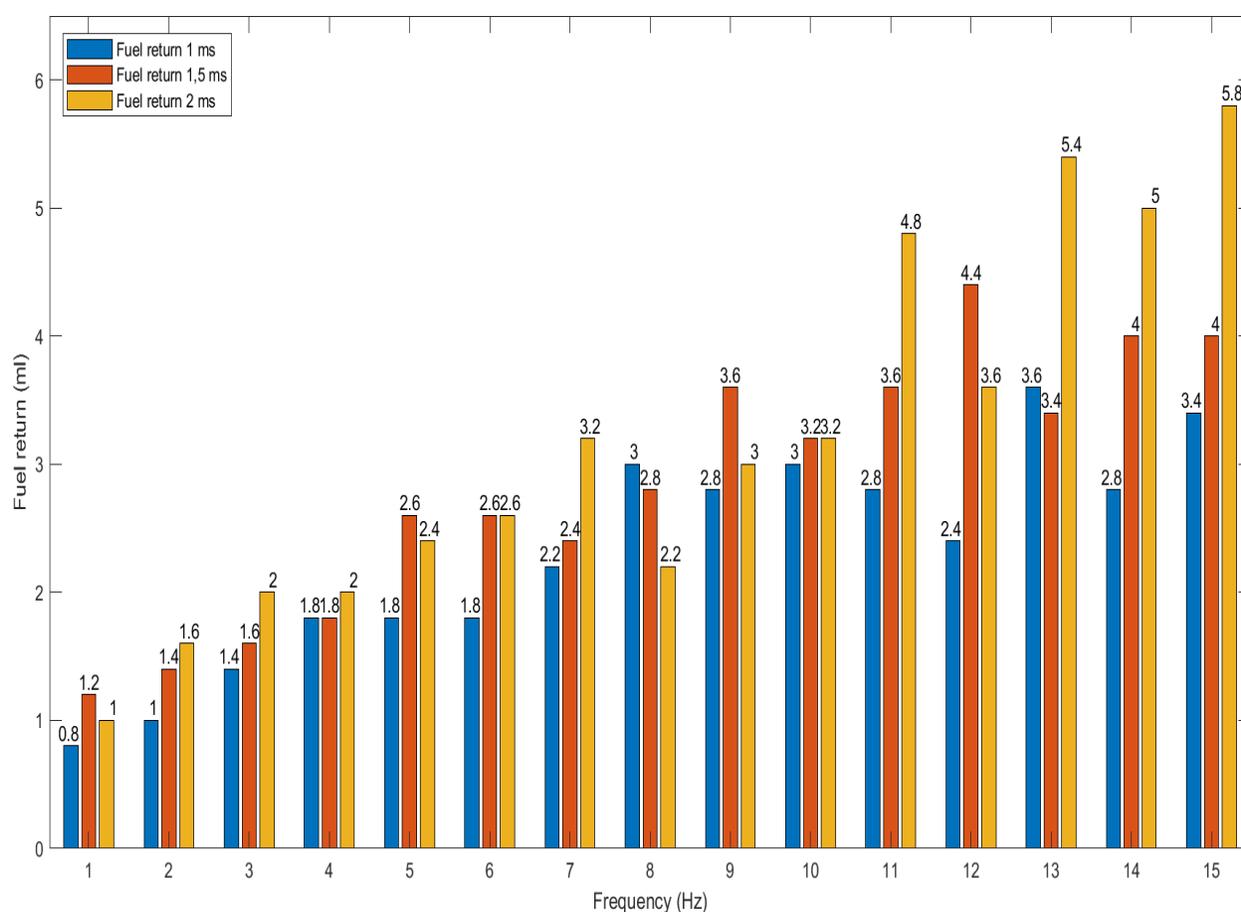
3.2.2.1 Inyector Nuevo

Al analizar el comportamiento del caudal de retorno en función de la frecuencia para un inyector nuevo, se observa una tendencia general de aumento en los caudales conforme la frecuencia incrementa, con algunas fluctuaciones dependiendo del tiempo de inyección como se muestra en la Figura 43. A 1 Hz, el caudal es relativamente bajo en todos los tiempos, iniciando en 0.8 ml para 1 ms, 1.2 ml para 1.5 ms y 1 ml para 2 ms. Al subir a 2 Hz, los caudales muestran una tendencia ascendente, alcanzando 1 ml para 1 ms, 1.4 ml para 1.5 ms y 1.6 ml para 2 ms. En 3 Hz, los valores continúan aumentando, con 1.4 ml en 1 ms, 1.6 ml en 1.5 ms y 2 ml en 2 ms. A 4 Hz, el caudal se estabiliza en 1.8 ml para los tiempos de 1 ms y 1.5 ms, mientras que para 2 ms permanece en 2 ml.

En 5 Hz, el caudal se mantiene en 1.8 ml para 1 ms, aumenta a 2.6 ml en 1.5 ms y llega a 2.4 ml en 2 ms. Al alcanzar 6 Hz, el caudal para 1 ms sigue en 1.8 ml, mientras que en 1.5 ms y 2 ms se incrementa a 2.6 ml. En 7 Hz, los caudales muestran una variación, alcanzando 2.2 ml para

1 ms, 2.4 ml para 1.5 ms y 3.2 ml para 2 ms. A 8 Hz, el caudal aumenta a 3 ml para 1 ms, mientras que para 1.5 ms se eleva a 2.8 ml y disminuye a 2.2 ml para 2 ms. A 9 Hz, los valores siguen incrementando con 2.8 ml en 1 ms, 3.6 ml en 1.5 ms y 3 ml en 2 ms. En 10 Hz, el caudal se mantiene en 3 ml para 1 ms, alcanza 3.2 ml en 1.5 ms y se incrementa a 3.2 ml en 2 ms. En 11 Hz, el caudal disminuye ligeramente a 2.8 ml para 1 ms, sube a 3.6 ml para 1.5 ms y presenta un notable aumento a 4.8 ml en 2 ms.

Figura 43. Caudal de retorno del inyector nuevo según frecuencia y tiempo de inyección



A 12 Hz, el caudal baja levemente a 2.4 ml en 1 ms, se incrementa a 4.4 ml en 1.5 ms y disminuye a 3.6 ml en 2 ms. A 13 Hz, se observa un aumento a 3.6 ml para 1 ms, 3.4 ml para 1.5 ms y un máximo de 5.4 ml en 2 ms. En 14 Hz, los caudales muestran una estabilización, registrando 2.8 ml en 1 ms, 4 ml en 1.5 ms y 5 ml en 2 ms. Finalmente, en 15 Hz, el caudal asciende a 3.4 ml

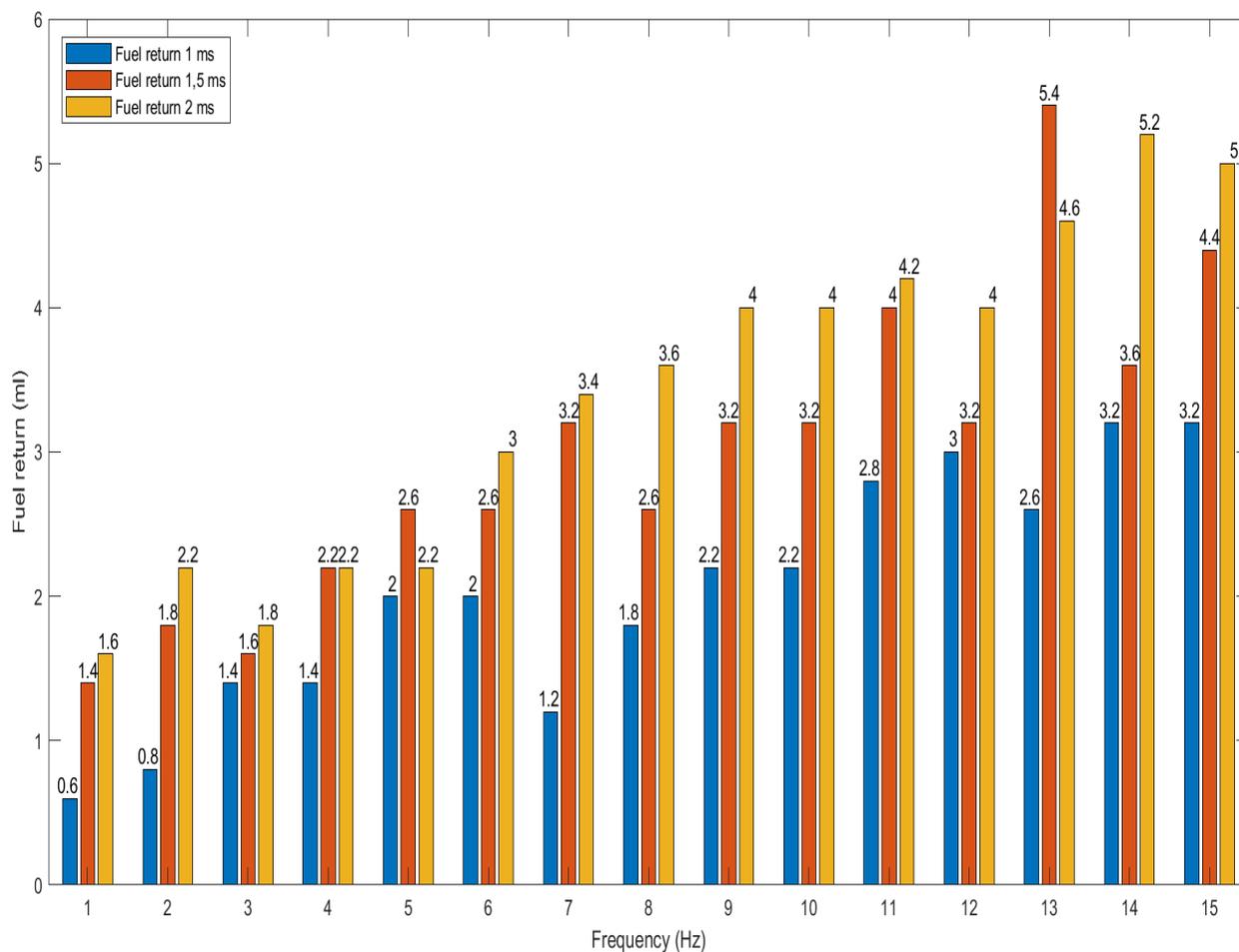
para 1 ms, permanece en 4 ml para 1.5 ms y sube a 5.8 ml en 2 ms. Este comportamiento refleja una tendencia de crecimiento en el caudal de retorno conforme aumenta la frecuencia, con algunas estabilizaciones y variaciones a frecuencias intermedias y un aumento significativo en tiempos de inyección más largos.

3.2.2.2 Inyector Usado

En la Figura 44, al analizar el comportamiento del caudal de retorno en función de la frecuencia para un inyector usado, se observa una tendencia general de aumento en los caudales a medida que la frecuencia se incrementa, con variaciones dependiendo del tiempo de inyección. A 1 Hz, el caudal es relativamente bajo en todos los tiempos, iniciando en 0.6 ml para 1 ms, 1.4 ml para 1.5 ms y 1.6 ml para 2 ms. Al aumentar a 2 Hz, los caudales muestran una tendencia ascendente, alcanzando 0.8 ml para 1 ms, 1.8 ml para 1.5 ms y 2.2 ml para 2 ms. A 3 Hz, se nota una ligera caída en el tiempo de inyección de 1.5 ms, con un valor de 1.4 ml en 1 ms, 1.6 ml en 1.5 ms y 1.8 ml en 2 ms. En 4 Hz, el caudal se mantiene en 1.4 ml para 1 ms, mientras que aumenta a 2.2 ml en 1.5 ms y se estabiliza en 2.2 ml en 2 ms.

A medida que la frecuencia continúa aumentando, el caudal sigue incrementándose. A 5 Hz, se observan caudales de 2 ml para 1 ms, 2.6 ml para 1.5 ms y 2.2 ml para 2 ms, indicando una estabilización en el tiempo de 2 ms. En 6 Hz, el caudal aumenta a 2 ml para 1 ms, 2.6 ml para 1.5 ms y 3 ml para 2 ms. A 7 Hz, se observa una disminución a 1.2 ml para 1 ms, pero los caudales para 1.5 ms y 2 ms aumentan significativamente a 3.2 ml y 3.4 ml, respectivamente, destacando un incremento en los tiempos de inyección mayores. En 8 Hz, el caudal para 1 ms sube a 1.8 ml, mientras que para 1.5 ms se estabiliza en 2.6 ml y para 2 ms se incrementa a 3.6 ml. A partir de 9 Hz, el caudal continúa incrementándose de manera más sostenida, alcanzando 2.2 ml en 1 ms, 3.2 ml en 1.5 ms y 4 ml en 2 ms, manteniendo valores similares en 10 Hz.

Figura 44. Caudal de retorno del inyector usado según frecuencia y tiempo de inyección



En 11 Hz, los caudales aumentan a 2.8 ml en 1 ms, 4 ml en 1.5 ms y 4.2 ml en 2 ms, reflejando una mayor tendencia al aumento conforme sube la frecuencia. A 12 Hz, los caudales se estabilizan en 3 ml para 1 ms, 3.2 ml para 1.5 ms y 4 ml para 2 ms, destacando una estabilidad en los tiempos de 1.5 ms y 2 ms. En 13 Hz, se observa un nuevo incremento, con 2.6 ml para 1 ms, 5.4 ml para 1.5 ms y 4.6 ml para 2 ms. A 14 Hz, se registran incrementos adicionales, alcanzando 3.2 ml en 1 ms, 3.6 ml en 1.5 ms y 5.2 ml en 2 ms. Finalmente, a 15 Hz, el caudal se estabiliza nuevamente en 3.2 ml para 1 ms, 4.4 ml para 1.5 ms y 5 ml para 2 ms, con una ligera disminución en comparación con la frecuencia previa, pero aun manteniendo un aumento general respecto a frecuencias más bajas. Este comportamiento sugiere una tendencia de crecimiento en el caudal de

retorno conforme aumenta la frecuencia, con algunas estabilizaciones y fluctuaciones a frecuencias intermedias.

3.2.2.3 Inyector Averiado

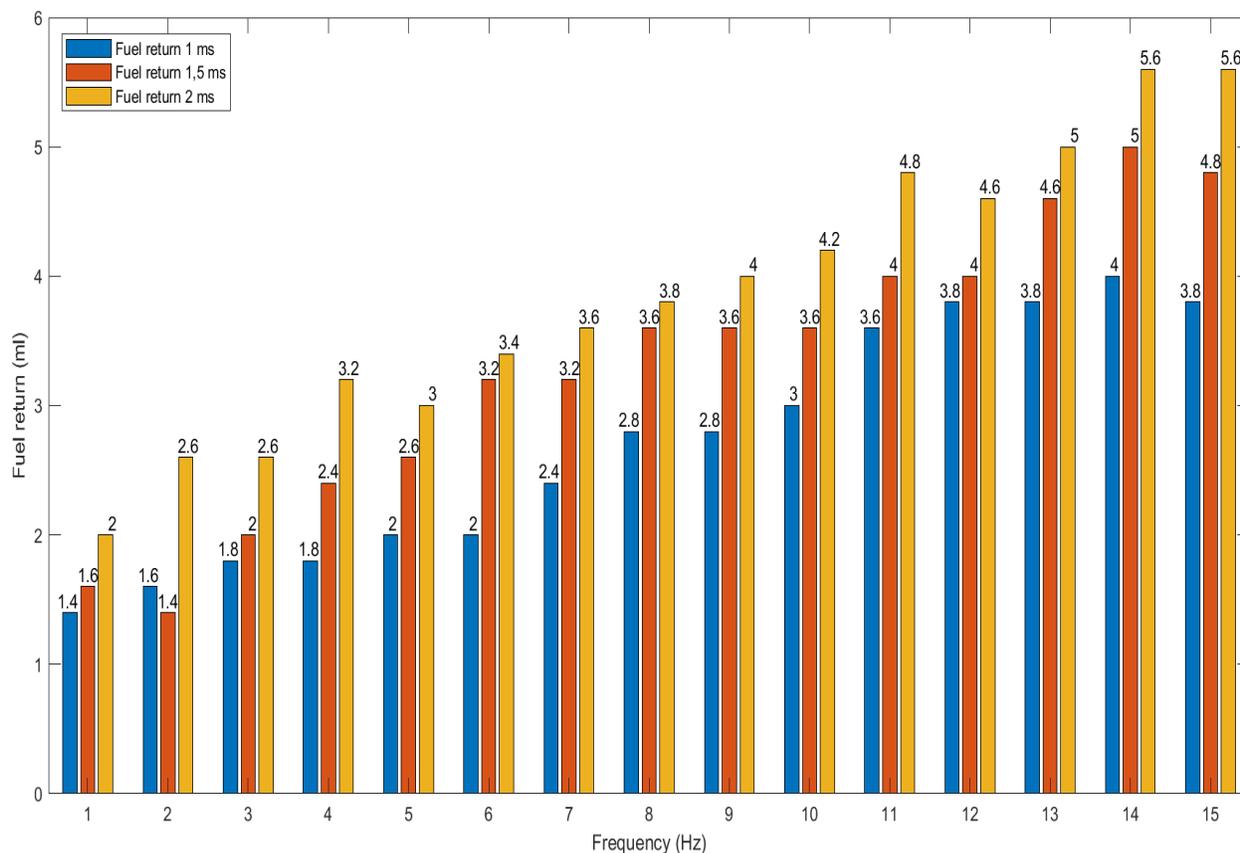
Al analizar el caudal de retorno de un inyector averiado en función de la frecuencia, se observa una tendencia general de incremento, con fluctuaciones dependiendo del tiempo de inyección como se ilustra en la Figura 45. A 1 Hz, el caudal inicia en 1.4 ml para 1 ms, 1.6 ml para 1.5 ms y 2 ml para 2 ms. A 2 Hz, el caudal sube ligeramente, alcanzando 1.6 ml para 1 ms, 1.4 ml en 1.5 ms y 2.6 ml en 2 ms. En 3 Hz, se registra un incremento moderado, alcanzando 1.8 ml para 1 ms, 2 ml en 1.5 ms y manteniendo 2.6 ml en 2 ms. A 4 Hz, los caudales muestran mayor estabilidad, con 1.8 ml para 1 ms, 2.4 ml para 1.5 ms y 3.2 ml en 2 ms.

En 5 Hz, el caudal de retorno sigue aumentando, alcanzando 2 ml en 1 ms, 2.6 ml en 1.5 ms, mientras que en 2 ms presenta una leve disminución a 3 ml. A 6 Hz, el caudal continúa su tendencia ascendente en todos los tiempos de inyección, alcanzando 2.4 ml en 1 ms, 3.2 ml en 1.5 ms y 3.4 ml en 2 ms. A 7 Hz, el caudal para 1 ms sube a 2.8 ml, manteniéndose estable en 1.5 ms en 3.2 ml y mostrando un leve aumento a 3.6 ml en 2 ms. En 8 y 9 Hz, los caudales tienden a estabilizarse, con 2.8 ml para 1 ms, 3.6 ml en 1.5 ms y 4 ml en 2 ms. En 10 Hz, los valores se mantienen sin variaciones significativas, con 3 ml para 1 ms, 3.6 ml para 1.5 ms y 4 ml en 2 ms. A 11 Hz, el caudal aumenta a 3.6 ml para 1 ms, 4 ml para 1.5 ms y 4.8 ml para 2 ms.

En 12 Hz, el caudal se estabiliza ligeramente, alcanzando 3.8 ml en 1 ms, 4 ml en 1.5 ms, mientras que en 2 ms desciende a 4.6 ml. A 13 Hz, se observa un máximo de 4 ml en 1 ms, 4.6 ml en 1.5 ms y 5.6 ml en 2 ms. A 14 Hz, el caudal sigue en aumento, alcanzando 4 ml en 1 ms, 5 ml en 1.5 ms y 5.6 ml en 2 ms. Finalmente, a 15 Hz, el caudal muestra una ligera reducción, con 3.8 ml en 1 ms, 4.8 ml en 1.5 ms y 5.6 ml en 2 ms. Este análisis revela una tendencia general de

aumento en el caudal de retorno a medida que aumenta la frecuencia, con variaciones y picos que sugieren posibles ineficiencias internas en el inyector, tales como problemas de atomización o desgaste estructural.

Figura 45. Caudal de retorno del inyector averiado según frecuencia y tiempo de inyección



3.2.3 Presión del Riel Común

La presión del riel varía significativamente según el estado de funcionamiento del inyector. En un inyector nuevo, la presión permanece estable a bajas frecuencias, con ligeras disminuciones a medida que aumenta la frecuencia, particularmente en tiempos de inyección más largos, lo que indica una alta capacidad para mantener la presión bajo demanda. Por el contrario, el inyector usado muestra fluctuaciones más notables, con una presión inicialmente alta que disminuye progresivamente a frecuencias más altas, lo que indica una respuesta menos consistente durante

períodos prolongados. El inyector defectuoso generalmente exhibe una presión más baja desde bajas frecuencias, con una caída pronunciada a medida que aumenta la frecuencia, siendo los tiempos de inyección más largos los más afectados. Estas variaciones indican que el estado operativo del inyector influye directamente en la capacidad del sistema para mantener la presión del riel, donde los defectos internos en los inyectores usados y defectuosos comprometen la estabilidad a frecuencias más altas, limitando el rendimiento en condiciones de mayor demanda.

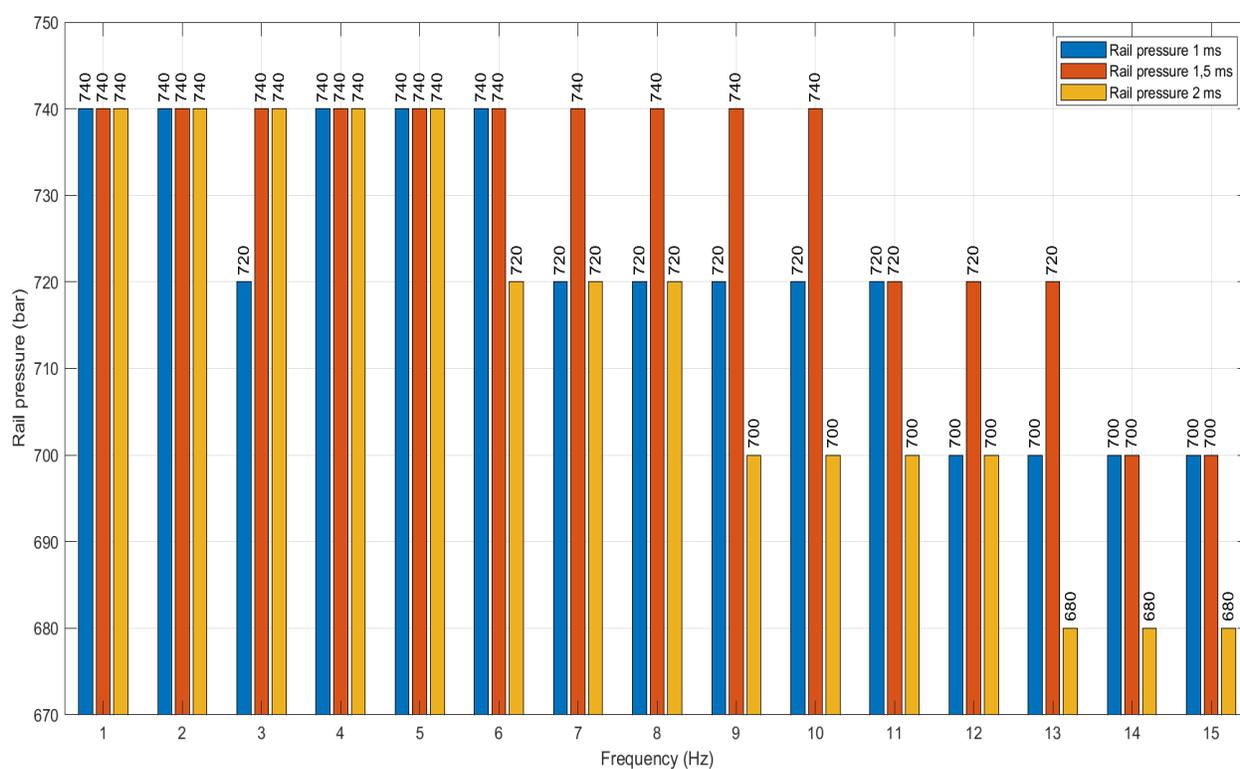
3.2.3.1 Inyector Nuevo

En la Figura 46, al analizar el comportamiento de la presión del riel en función de la frecuencia para un inyector nuevo, se observa una tendencia general de estabilidad, con algunas variaciones a medida que la frecuencia aumenta. A 1 Hz y 2 Hz, la presión es uniforme en todos los tiempos de inyección, registrando 740 bar en 1 ms, 1.5 ms y 2 ms. Este valor se mantiene en 740 bar para los tres tiempos de inyección hasta alcanzar 3 Hz, donde la presión disminuye a 720 bar solo en 1 ms, mientras que en 1.5 ms y 2 ms permanece en 740 bar. Entre 4 Hz y 5 Hz, no se presentan cambios, con 740 bar en los tiempos de 1 ms, 1.5 ms y 2 ms.

En 6 Hz, la presión disminuye a 720 bar en el tiempo de 2 ms, manteniéndose en 740 bar en los tiempos de 1 ms y 1.5 ms. Para 7 Hz y 8 Hz, la presión se estabiliza en 720 bar en los tiempos de 1 ms y 2 ms, con 740 bar en el tiempo de 1.5 ms. Al llegar a 9 Hz, se observa una ligera variación: la presión baja a 720 bar en 1 ms, permanece en 740 bar para 1.5 ms, y se reduce a 700 bar en 2 ms, comportamiento que se repite en 10 Hz. En 11 Hz, la presión baja a 720 bar tanto en 1 ms como en 1.5 ms, manteniéndose en 700 bar en 2 ms. Esta tendencia se ajusta nuevamente en 12 Hz, donde la presión desciende a 700 bar para 1 ms, se mantiene en 720 bar en 1.5 ms y se estabiliza en 700 bar en 2 ms.

Para 13 Hz, la presión registra 700 bar en 1 ms, 720 bar en 1.5 ms y descende a 680 bar en 2 ms. A 14 Hz, la presión es de 700 bar en 1 ms, 700 bar en 1.5 ms y 680 bar en 2 ms, valor que se mantiene en 15 Hz para todos los tiempos de inyección. El inyector nuevo muestra una estabilidad inicial en la presión del riel a bajas frecuencias, pero a medida que aumenta la frecuencia, se observa una disminución gradual, especialmente en los tiempos de inyección más largos, lo que indica una mayor demanda de combustible.

Figura 46. Presión del riel del inyector nuevo según frecuencia y tiempo de inyección



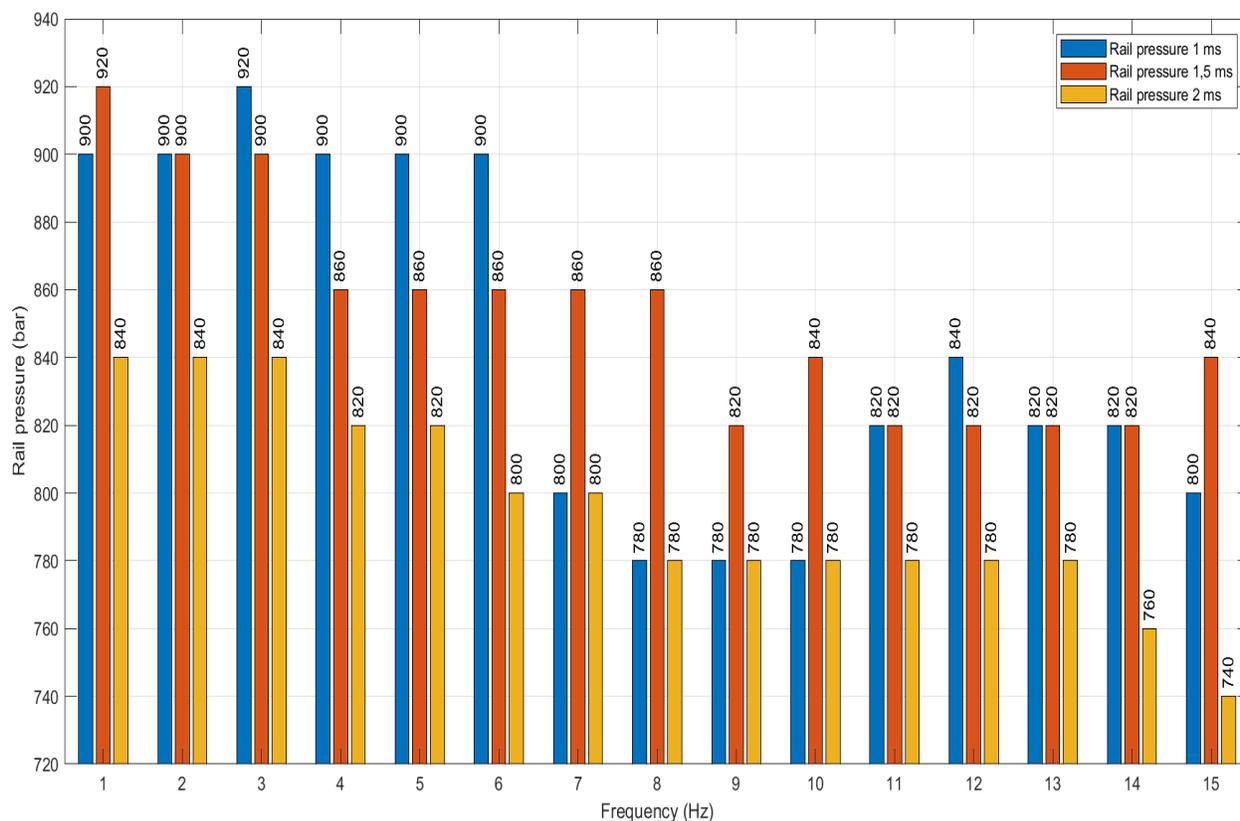
3.2.3.2 Inyector Usado

Al evaluar la presión del riel de un inyector usado en función de la frecuencia, en la Figura 47 se observa una tendencia general de estabilidad, con algunas variaciones en los tiempos de inyección. A 1 Hz, la presión es 900 bar para 1 ms, 920 bar para 1.5 ms y 840 bar para 2 ms. En 2 Hz, la presión se mantiene en 900 bar para 1 ms, 900 bar para 1.5 ms y 840 bar para 2 ms. A 3 Hz, se observa un ligero incremento en 1 ms (920 bar), mientras que los tiempos de 1.5 ms y 2 ms

permanecen constantes en 900 bar y 840 bar, respectivamente. Entre 4 Hz y 6 Hz, la presión es constante en 900 bar para 1 ms, mientras que en 1.5 ms se mantiene en 860 bar (en 4 y 5 Hz) y 800 bar en 6 Hz.

En 2 ms, la presión disminuye de 820 bar a 800 bar a medida que la frecuencia aumenta. A 7 Hz, la presión en 1 ms desciende a 800 bar, mientras que en 1.5 ms sigue estable en 860 bar y en 2 ms se mantiene en 800 bar. A 8 Hz y 9 Hz, la presión se estabiliza en 780 bar para 1 ms y 2 ms, con una ligera variación en 1.5 ms, donde se mantiene en 860 bar en 8 Hz y desciende a 820 bar en 9 Hz. En 10 Hz, la presión permanece en 780 bar para 1 ms y 2 ms, mientras que en 1.5 ms aumenta a 840 bar. A partir de 11 Hz, la presión en 1 ms se eleva a 820 bar, se mantiene en 820 bar para 1.5 ms y baja a 780 bar en 2 ms, comportamiento que se mantiene hasta 12 Hz, donde la presión alcanza 840 bar en 1 ms, 820 bar en 1.5 ms y 780 bar en 2 ms. A partir de 13 Hz, la presión en 1 ms se eleva a 820 bar, se mantiene en 820 bar para 1.5 ms y baja a 780 bar en 2 ms, comportamiento que se mantiene hasta 14 Hz, donde la presión alcanza 820 bar en 1 ms, 820 bar en 1.5 ms y 760 bar en 2 ms. A partir de 15 Hz, la presión en 1 ms se eleva a 800 bar, se mantiene en 800 bar para 1.5 ms y baja a 740 bar en 2 ms.

Figura 47. Presión del riel del inyector usado según frecuencia y tiempo de inyección



En 13 Hz, la presión se mantiene en 820 bar para 1 ms y 1.5 ms, mientras que en 2 ms se estabiliza en 780 bar. A 14 Hz, la presión desciende a 820 bar en 1 ms, se mantiene en 820 bar en 1.5 ms y baja a 760 bar en 2 ms. Finalmente, en 15 Hz, la presión desciende a 800 bar para 1 ms, sube a 840 bar en 1.5 ms y baja a 740 bar en 2 ms. Este comportamiento sugiere que, a medida que la frecuencia aumenta, la presión del riel tiende a disminuir, especialmente en los tiempos de inyección más largos, donde el efecto de la frecuencia es más pronunciado.

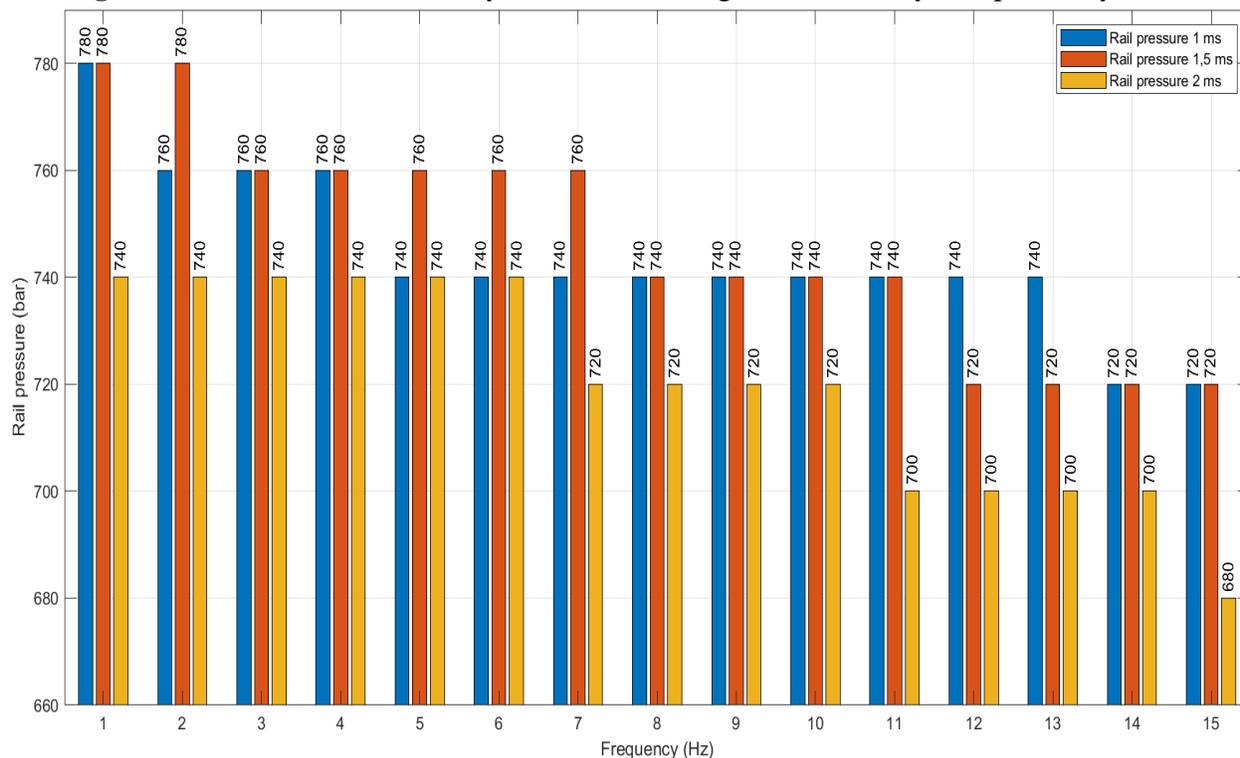
3.2.3.3 Inyector Averiado

Al analizar la presión del riel de un inyector averiado en función de la frecuencia, se observa una tendencia general de disminución de la presión a medida que aumenta la frecuencia, con fluctuaciones dependiendo del tiempo de inyección como se muestra en Figura 48. A frecuencias bajas, la presión es más alta: a 1 Hz, se registra 780 bar para 1 ms y 1.5 ms, y 740 bar para 2 ms. Para 2 Hz, la presión se mantiene en 760 bar para 1 ms y 780 bar para 1.5 ms, mientras que para 2 ms es 740 bar. En 3 Hz, se observa una ligera caída a 760 bar para 1 ms y 1.5 ms, con 740 bar para 2 ms. A 4 Hz, la presión sigue siendo 760 bar para 1 ms y 1.5 ms, y 740 bar para 2 ms. Entre 5 Hz y 7 Hz, la presión se mantiene estable en 740 bar para 1 ms, 760 bar para 1.5 ms y 740 bar para 2 ms. A 8 Hz, se mantiene en 740 bar para 1 ms, 760 bar para 1.5 ms y 720 bar para 2 ms.

Para frecuencias de 9 Hz a 12 Hz, la presión en 1 ms se mantiene en 740 bar, mientras que en 1.5 ms oscila entre 740 y 720 bar, y en 2 ms disminuye, alcanzando 700 bar en 11 Hz y 12 Hz. A 13 Hz, la presión sigue la misma tendencia con 740 bar para 1 ms, 720 bar para 1.5 ms y 700 bar para 2 ms. Finalmente, a 14 Hz, la presión es 720 bar para 1 ms, 720 bar para 1.5 ms, y 700 bar para 2 ms, con una disminución adicional a 680 bar a 15 Hz en 2 ms. Este comportamiento refleja una disminución progresiva de la presión conforme aumenta la frecuencia, con una

modulación adicional del tiempo de inyección, especialmente en los tiempos más largos. Este patrón es característico del inyector averiado, donde los defectos en los componentes internos afectan la capacidad de mantener la presión estable a frecuencias más altas.

Figura 48. Presión del riel del inyector averiado según frecuencia y tiempo de inyección



3.2.4 Comparativa del Inyector Nuevo, Usado y Averiado

Una vez analizados los valores de caudal y presión al variar la frecuencia, se realizó un análisis comparativo entre los tres tipos de inyectores, bajo las condiciones de un tiempo de inyección de 1 ms y niveles de frecuencia de operación desde 1 Hz hasta 15 Hz.

En este análisis, la Figura 49 refleja que el inyector nuevo presenta un menor caudal total de inyección, alcanzando 60 ml, mientras que el inyector usado registró 61.8 ml y el averiado 60.2 ml. El caudal del inyector usado fue superior al del nuevo en 3%, mientras que el del averiado fue superior al del nuevo en 0.33%. Respecto al caudal de retorno, el inyector nuevo alcanzó un total de 34.6 ml, siendo un valor superior al del inyector usado (30.4 ml) e inferior al del averiado (40.6 ml). Estos valores reflejan diferencias significativas, con un incremento de 17.34% en el averiado

y una reducción de 12.14% en el usado, frente al nuevo. En términos de presión acumulada, el inyector usado mostró el mayor valor con 12660 bares, seguido por el averiado con 11160 bares, y finalmente el nuevo con 10820 bares. Estas diferencias sugieren un aumento de 17% para el usado y de 3.14% para el averiado frente al nuevo, lo que indica una menor eficiencia en los inyectores usados y averiados en comparación con el nuevo, especialmente en condiciones de operación a diferentes frecuencias.

Al emplear un tiempo de inyección de 1.5 ms, como se detalla en la Figura 50, el caudal total de inyección aumentó en los tres inyectores. El inyector nuevo alcanzó 90.6 ml, mientras que el usado y el averiado registraron 116 ml y 98.6 ml, respectivamente. Estas cifras representan un incremento de 28.04% para el usado y 8.83% para el averiado respecto al nuevo. El caudal de retorno también reflejó una tendencia similar, con valores de 42.6 ml para el nuevo, 45 ml para el usado y 49.6 ml para el averiado. Estas diferencias indican un aumento relativo del 16.43% en el averiado y del 5.63% en el usado en comparación con el nuevo. La presión acumulada fue de 10960 bares para el inyector nuevo, 12800 bares para el usado y 11200 bares para el averiado, con incrementos relativos de 16.79% y 2.19% en los últimos dos frente al nuevo. En términos de eficiencia, el caudal de retorno representó un 54% del caudal inyectado para el nuevo, mientras que los inyectores usado y averiado mostraron valores de 45% y 60.9%, respectivamente, destacando una mayor pérdida de combustible en los inyectores en estado deteriorado.

La Figura 51 refleja que, a un tiempo de inyección de 2 ms, se mantuvo la tendencia de un menor caudal total de inyección en el inyector nuevo, que alcanzó 119.6 ml, frente a 137.8 ml del usado y 123.6 ml del averiado. Estas diferencias representan incrementos de 15.22% y 3.34% en el caudal de los inyectores usado y averiado respecto al nuevo. El caudal de retorno también fue mayor en los inyectores averiado y usado, con valores de 58 ml y 51 ml respectivamente, en

comparación con los 47.8 ml del nuevo, lo que equivale a incrementos relativos de 21.34% y 6.69%. En cuanto a la presión acumulada, el inyector nuevo alcanzó 10700 bares, mientras que el usado y el averiado registraron 11940 bares y 10800 bares, respectivamente. Estas cifras indican diferencias significativas de 11.59% y 0.93% frente al nuevo. Al analizar los porcentajes del caudal de retorno respecto al caudal inyectado, el inyector nuevo mostró un valor promedio de 46.45%, el usado 46.3% y el averiado 61.45%, destacándose una mayor ineficiencia en los inyectores averiados.

En general, los resultados obtenidos evidencian que el estado del inyector tiene una influencia significativa en el caudal de inyección, el caudal de retorno y la presión acumulada. Los inyectores nuevos presentan un mejor desempeño, con menores pérdidas de combustible y presiones más estables, mientras que los inyectores usados y averiados exhiben mayores caudales de retorno, reflejando una menor eficiencia. Estos hallazgos subrayan la importancia de un mantenimiento adecuado para maximizar el rendimiento y minimizar las pérdidas en el sistema de inyección.

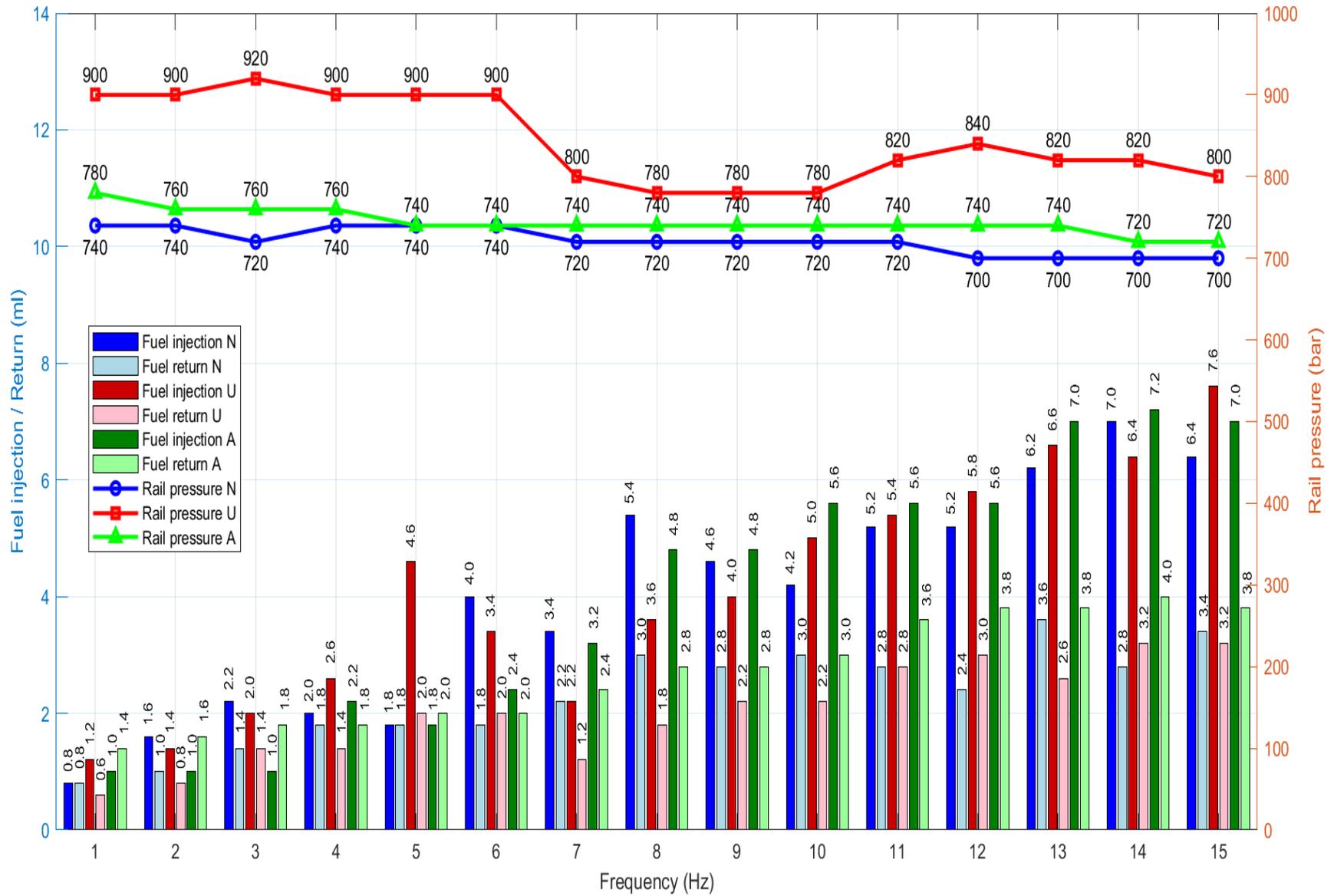


Figura 49. Frecuencia vs. caudal de inyección/retorno y presión del riel común a 1 ms de tiempo de inyección

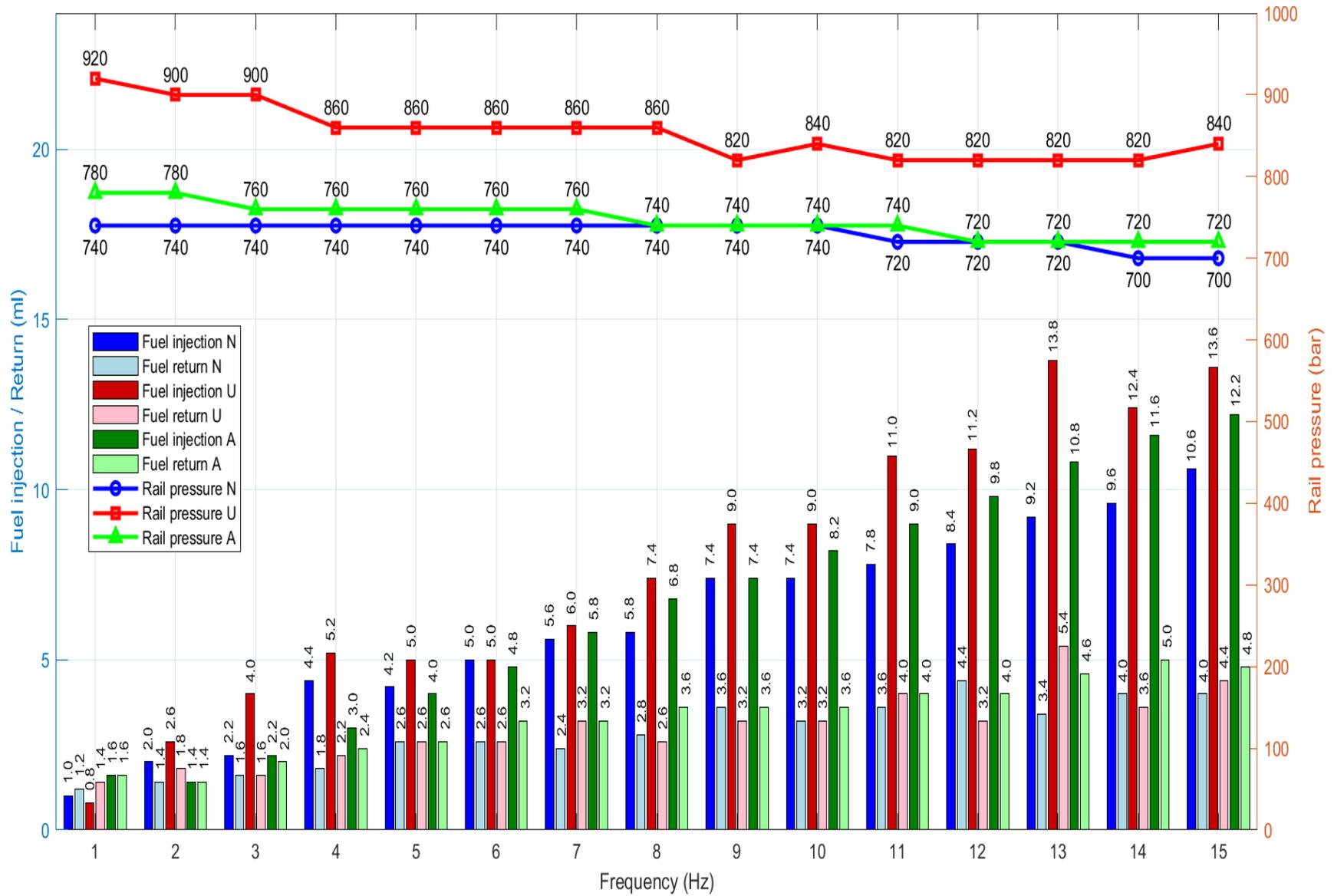


Figura 50. Frecuencia vs. caudal de inyección/retorno y presión del riel común a 1.5 ms de tiempo de inyección

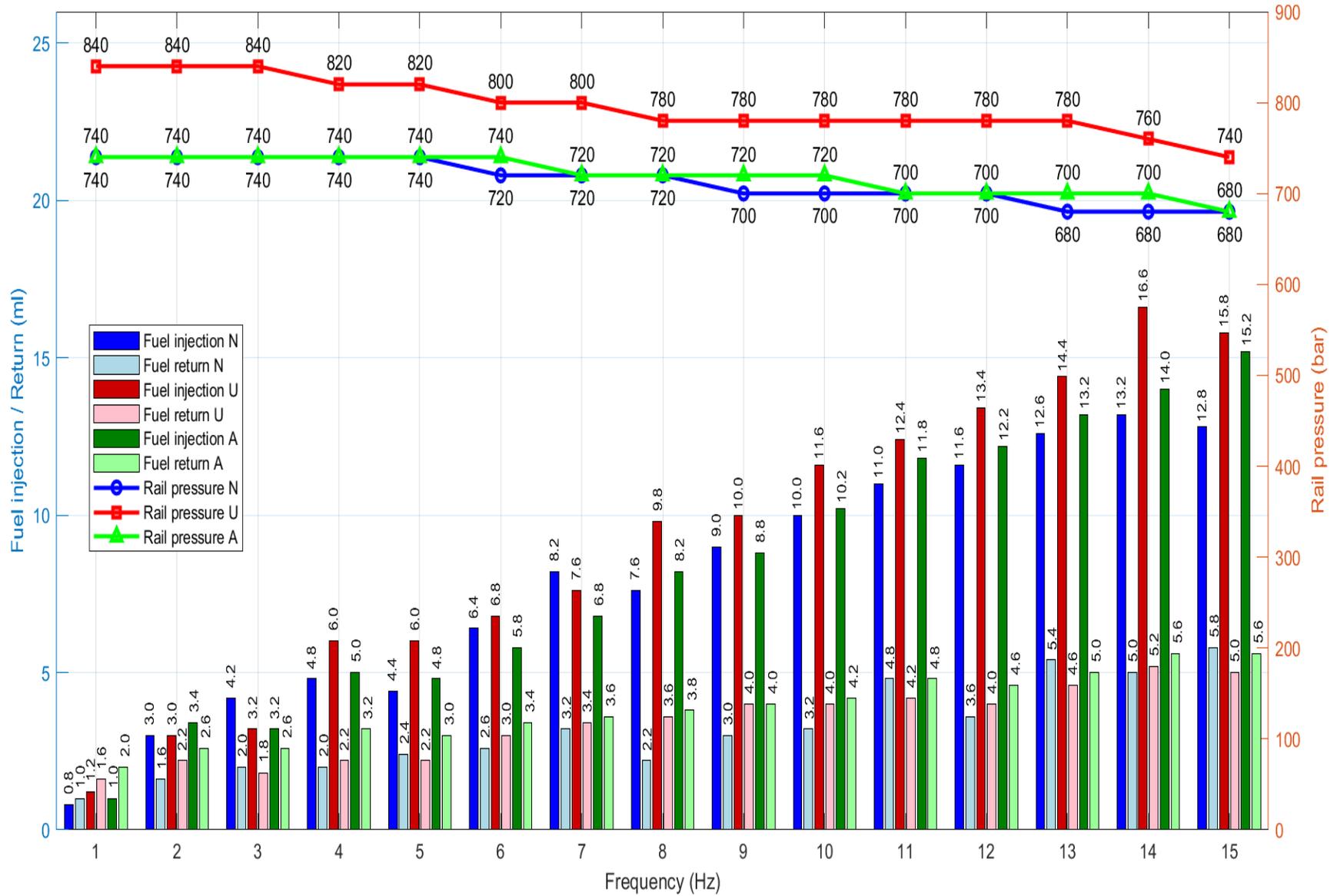


Figura 51. Frecuencia vs. caudal de inyección/retorno y presión del riel común a 2 ms de tiempo de inyección

3.3 Diagnóstico Predictivo del Inyector por Algoritmo de Clasificación

El modelo de clasificación fue entrenado en MATLAB® empleando los datos obtenidos durante la campaña experimental (véase Anexo 2). Estos datos comprenden mediciones del inyector en estado nuevo, usado y averiado, bajo diferentes condiciones de operación: frecuencia, caudal de inyección y presión del riel. La información recopilada permitió entrenar el modelo para predecir el estado del inyector en función de su rendimiento bajo dichas condiciones operativas.

3.3.1 Entrenamiento del Modelo

En la Figura 52 se observa un rendimiento óptimo del modelo entrenado, con una validación del 97.8% al utilizar múltiples variables de entrada. Esto refleja una alta precisión y fiabilidad en la clasificación para el diagnóstico adecuado del inyector y el conocimiento de su estado. El modelo seleccionado es una Red Neuronal Bilayered, constituida por dos capas ocultas de 10 neuronas cada una. Este modelo fue elegido sobre otros ofrecidos por el software de entrenamiento debido a su capacidad para manejar relaciones no lineales complejas y captar patrones significativos y sutiles en los datos de los inyectores. La arquitectura de dos capas ocultas permite que el modelo extraiga representaciones profundas de las relaciones entre las variables, contribuyendo a su alto rendimiento en clasificación sin caer en el sobreajuste.

La función de activación ReLU maneja eficientemente las no linealidades. El costo total de validación es de 3, lo que indica una clasificación precisa de las muestras. La velocidad de predicción es de aproximadamente 4100 observaciones por segundo, lo que lo hace altamente eficiente en términos de tiempo de ejecución. El tiempo de entrenamiento es de 1.668 segundos, lo que sugiere un proceso rápido de ajuste. Además, el modelo tiene un tamaño compacto de aproximadamente 9 kB, lo que lo hace ligero y manejable. La regularización nula ($\Lambda = 0$) y la estandarización de los datos contribuyen a evitar el sobreajuste y mejorar la capacidad de

generalización del modelo, consolidándolo como una herramienta robusta para el diagnóstico predictivo del estado de los inyectores, como se muestra en la Figura 52.

Figura 52. Desempeño y configuración del Modelo Bilayered Neural Network

Model 5: Neural Network		▼ Model Hyperparameters	
Status: Trained		Preset: Bilayered Neural Network	
Training Results		Number of fully connected layers: 2	
Accuracy (Validation)	97.8%	First layer size: 10	
Total cost (Validation)	3	Second layer size: 10	
Prediction speed	~4100 obs/sec	Activation: ReLU	
Training time	1.668 sec	Iteration limit: 1000	
Model size (Compact)	~9 kB	Regularization strength (Lambda): 0	
		Standardize data: Yes	

3.3.2 Resultados del Entrenamiento

La distribución de los puntos en la Figura 44 muestra que el inyector nuevo (N), representado en rojo, tiene una mayor concentración en la región inferior del gráfico, con valores de voltaje y amperaje más bajos. Este grupo también presenta una buena separación respecto a los otros estados, aunque existen algunas predicciones cercanas a las del inyector usado, lo que permite una clasificación precisa en la mayoría de los casos. No obstante, esto podría explicar la aparición de errores de clasificación en ciertos casos.

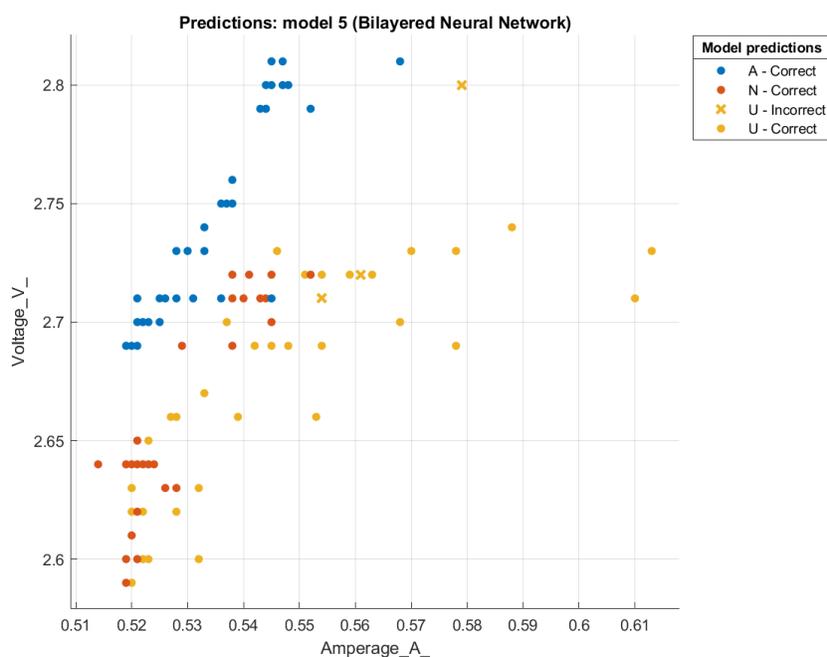
El inyector usado (U), representado en amarillo, está distribuido en una región más cercana al inyector nuevo (N), con algunos solapamientos ligeros con los valores característicos del inyector averiado. Esto es consistente con la información de la matriz de confusión detallada en la Figura 54, donde el modelo cometió errores al clasificar el inyector usado como averiado y nuevo. Esta confusión ocurre porque el inyector usado comparte características intermedias, con cierto desgaste, pero sin alcanzar las condiciones extremas del inyector averiado.

El inyector averiado (A) presenta valores de voltaje más altos y está agrupado principalmente en la parte superior izquierda del gráfico, lo que sugiere una clara separación de este grupo respecto a los demás. Esta separación se debe a la condición de falla del inyector

averiado, que afecta significativamente sus valores de voltaje y amperaje, y genera un perfil distintivo que facilita la correcta clasificación por parte del modelo.

La gráfica muestra una alta tasa de verdaderos positivos (TPR) para el inyector averiado y el nuevo, dado que la mayoría de sus puntos están correctamente clasificados en regiones bien definidas. Sin embargo, la mayor dispersión y solapamiento de los puntos correspondientes al inyector usado lleva a una mayor tasa de falsos negativos (FNR) para esta categoría, donde ciertos inyectores usados son clasificados incorrectamente.

Figura 53. Grafica de dispersión del modelo entrenado

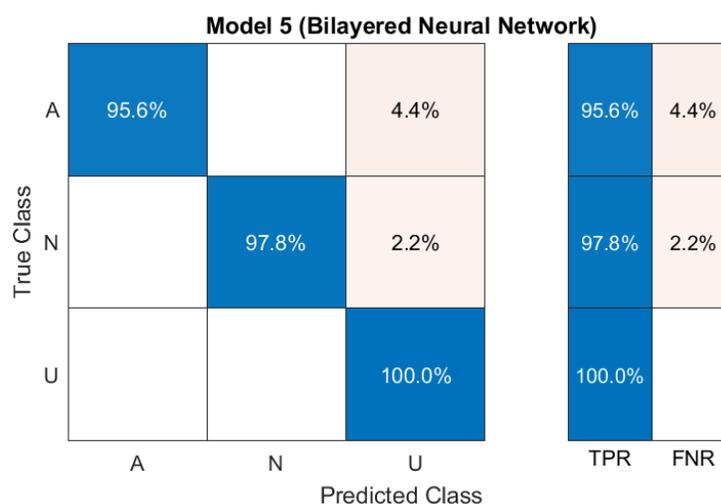


La matriz de confusión del modelo entrenado, ilustrada en la Figura 54, evidencia un alto nivel de confiabilidad y rendimiento, con una precisión del 97.8%. De las 135 predicciones totales, 132 fueron correctas, distribuidas equitativamente en 45 datos por cada estado del inyector. Para el inyector nuevo (N), el modelo obtuvo 44 predicciones correctas de las 45 muestras, lo que equivale una Tasa de Verdaderos Positivos (TPR) del 97.8% y una Tasa de Falsos Negativos (FNR) del 2.2%, derivada de una única clasificación incorrecta asignada como inyector usado. En

el caso del inyector usado (U), el modelo logró una clasificación perfecta, con 45 predicciones correctas, que equivale a una TPR del 100% y una FNR del 0%, sin errores de clasificación. Finalmente, para el inyector averiado (A), se alcanzó una precisión del 95.6% que representa 43 clasificaciones correctas y una FNR del 4.4%, debido a 2 clasificaciones incorrectas, donde estas últimas fueron asignadas erróneamente como inyectores usados.

Los resultados reflejan que el modelo mantiene una alta TPR en cada categoría, minimizando los errores y alcanzan un equilibrio óptimo entre sensibilidad y especificidad. La alta efectividad en la clasificación de los inyectores, particularmente en el caso de los inyectores usados con una TPR del 100%, confirma la robustez y precisión del modelo para el diagnóstico de fallas en los inyectores.

Figura 54. Matrix de confusión del modelo entrenado

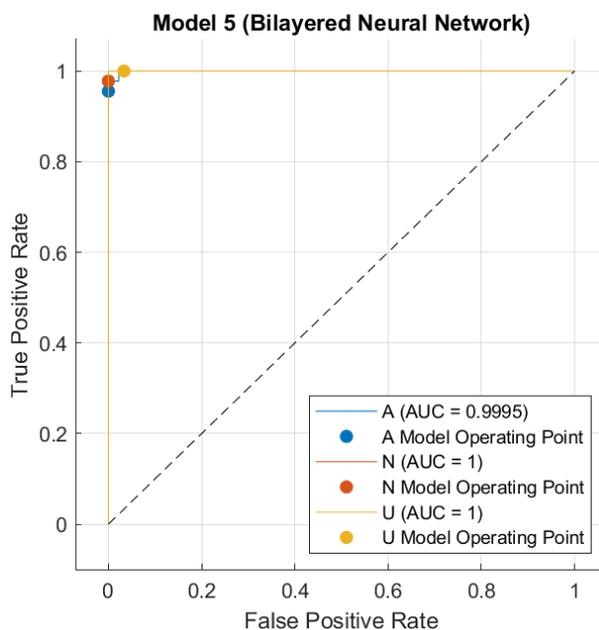


Las curvas ROC generadas a partir del modelo entrenado, como se muestra en la Figura 55, confirman la alta precisión y confiabilidad del modelo en la clasificación. Estas curvas se encuentran claramente alejadas de la línea diagonal, que representa una clasificación al azar, lo que demuestra que el desempeño del modelo es significativamente superior al azar. El área bajo la curva (AUC) para los inyectores nuevo y usado es cercana a 1, lo que sugiere una excelente

capacidad del modelo para identificar correctamente estos estados. Para el averiado, el AUC alcanza un valor de 0.9995, lo cual es casi perfecto y evidencia una precisión notable en la detección de este estado específico.

Los puntos situados en la parte superior izquierda de las curvas ROC observados en la figura indican que el modelo logra una baja tasa de falsos positivos, lo que significa que rara vez clasifica incorrectamente un inyector en un estado distinto al real. Además, esta posición en la curva refleja una alta sensibilidad, lo cual indica que el modelo es capaz de detectar correctamente los verdaderos positivos con eficacia. Este buen equilibrio entre sensibilidad y especificidad demuestra que el modelo mantiene una relación adecuada entre la tasa de verdaderos positivos y la tasa de falsos positivos, lo cual optimiza la precisión y fiabilidad en la clasificación de los tres estados de los inyectores.

Figura 55. Curva ROC del modelo entrenado

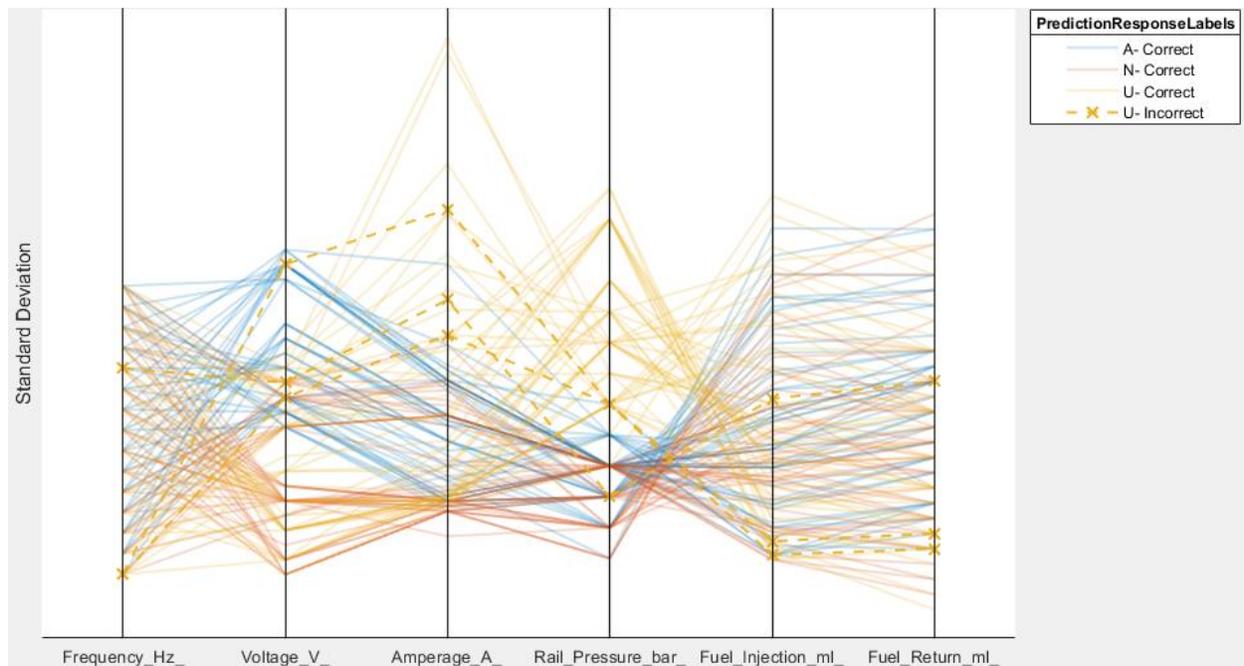


El diagrama de coordenadas paralelas representado en la Figura 56, visualiza de manera clara las clasificaciones correctas e incorrectas del modelo, evidenciando un desempeño óptimo en la mayoría de las predicciones realizadas sobre los inyectores. Los errores se representan

mediante líneas discontinuas y marcas “x”. El análisis de cada estado revela que el modelo clasifica con mayor precisión en el estados nuevo y averiado, donde las líneas se concentran en regiones más definidas, lo cual evidencia una menor variabilidad. Por el contrario, las predicciones incorrectas, particularmente en el estado usado, presentan una mayor dispersión.

Aunque existen errores en todas las variables, se aprecia que la variable de voltaje, amperaje y presión del riel presentan una mejor distribución de las predicciones, con una separación más clara entre los tres estados de los inyectores. Esta observación se sustenta en una menor superposición de líneas entre las clasificaciones correctas e incorrectas en estas variables. Los errores de clasificación son limitados y se concentran mayormente en el inyector usado.

Figura 56. Coordenadas paralelas del modelo entrenado



3.3.3 Función Predictora en el Modelo Clasificador de Inyectores N, U y A

Una vez concluido el entrenamiento del modelo de diagnóstico predictivo, se exporta en forma de ecuación, lo cual genera un código en MATLAB®, como se observa en la Figura 57. En este código, la variable “Yfit” representa la predicción del modelo, mientras que

“ModelInjectorNUA” encapsula toda la información y parámetros que el modelo ha aprendido durante el proceso de entrenamiento. Esta estructura permite reutilizar el modelo para clasificar nuevas muestras de manera eficiente. La función responsable de generar predicciones sobre nuevos datos es “predictFcn”, la cual se invoca para procesar y clasificar las observaciones adicionales basándose en los patrones previamente entrenados. Para clasificar una nueva muestra, esta se puede cargar mediante un archivo en formato “xlsx”, en la variable “T”. El modelo procesa estos datos y asigna una clase a cada muestra, basada en los patrones aprendidos durante el entrenamiento.

```
[yfit, scores] = ModelInjectorNUA.predictFcn(T)
```

Figura 57. Ecuación generada del modelo entrenado

Es importante señalar que la ecuación generada del modelo de diagnóstico predictivo opera con todas las variables empleadas durante el entrenamiento del modelo. Esto captura las relaciones complejas entre ellas para mejorar la precisión del diagnóstico. Al basarse en las mismas variables, se asegura la consistencia en las predicciones y se minimiza el riesgo de errores por falta de información clave.

3.3.4 Ejecución del Modelo de Diagnostico Predictivo

Se empleó una nueva base de datos de validación compuesta por 135 muestras de inyectores modelo 0445110 250 en tres estados (nuevo, usado y averiado) para evaluar el desempeño de un modelo previamente desarrollado. Cada estado del inyector cuenta con 45 muestras, las cuales se obtuvieron a partir de las variables definidas por el modelo y detalladas en el Tabla 11. Los datos se cargaron en un archivo .xlsx e importaron a MATLAB® según el procedimiento descrito en el apartado 2.6.1.

El modelo demostró una alta precisión en la clasificación de los estados de los inyectores en esta base de validación, como se muestra en la Figura 58. Este resultado indica un rendimiento

sólido y robusto, lo que lo convierte en una herramienta útil para el diagnóstico de inyectores modelo 0445110 250, compatibles con vehículos Mazda BT-50 y Ford Ranger equipados con motores de 2.5 litros.

Figura 58. Desempeño del modelo de clasificación para inyectores 0445110 250

```
yfit =  
135×1 categorical array  
N  
N  
N  
N  
N
```

scores =		
0.0000	1.0000	0.0000
0.0000	1.0000	0.0000
0.0000	1.0000	0.0000
0.0001	0.9999	0.0000
0.0000	1.0000	0.0000

CAPÍTULO IV

4 Conclusiones y Recomendaciones

4.1 Conclusiones

El análisis de regresión revela una influencia significativa de las variables independientes sobre las dependientes, con un 95% de confiabilidad (valor $P < 0.05$) para los tres inyectores (N, U y A). En cuanto al caudal de inyección, el R^2 fue de 92% (N), 89% (U) y 94% (A), mostrando la fuerte relación de estas variables con el caudal. Los valores F confirman que tanto la frecuencia y el tiempo de inyección tienen una influencia significativa en el caudal, con 348.25 y 118.96 (N), 532.81 y 192.53 (U), mientras que en el A son 494.96 y 133.99 (A). El MAE en este caso fue 0.76 (N), 1.23 (U) y 0.75 (A), indicando mayor variabilidad en el inyector averiado. Respecto al caudal de retorno, el A mostró una mayor variabilidad, con una R^2 de 97%, frente a 84% (N) y 88% (U). Los valores F (980.20 y 222.16 A; 193.50 y 25.08 N; 222.12 y 80.92 U) corroboran que la frecuencia y el tiempo de inyección tienen una influencia significativa en el caudal. El MAE fue de 0.35 (N), 0.30 (U) y 0.17 (A), lo que confirma un bajo error en el modelo de los inyectores. En cuanto a la presión del riel común, el análisis mostró una relación inversa con la frecuencia y el tiempo de inyección, siendo más sensible en el inyector averiado ($R^2 = 79%$, $F = 121.24$ y 40.89) comparado con el nuevo ($R^2 = 70%$, $F = 93.07$ y 4.01) y usado ($R^2 = 63%$, $F = 52.22$ y 20.78). El MAE fue de 8.30 (N), 20.83 (U) y 8.25 (A), destacando el impacto del desgaste en la estabilidad de la presión.

El caudal de inyección aumenta gradualmente con el aumento en las variables independientes, así como con el retorno. El N tiene un caudal aproximadamente de 0.87 ml a 1 Hz hasta 9.93 ml a 15 Hz, y el aumento del tiempo de inyección de 1 ms hasta 2 ms incrementa de 4 ml a 7,97 ml. El U funciona de la misma manera, exhibiendo 1.07 ml a 1 Hz y 12,33 ml a 15 Hz,

y para el tiempo de inyección experimenta un aumento de 4.12 ml a 1 ms a 9.19 ml a 2 ms. El inyector A tiene caudales que varían de 1.2 ml a 11.47 ml con respecto a la frecuencia, y el tiempo de inyección aumenta los caudales de 4.01 ml hasta 8.24 ml. El flujo de retorno presenta un patrón similar entre los inyectores y su caudal aumenta a medida que se inyecta combustible con más frecuencia y mayores tiempos de inyección. La presión en el riel común disminuye como resultado de inyecciones repetidas durante períodos de tiempo más largos. La presión del N disminuye de 740 bares a 693 bares en el rango de frecuencia de 15 Hz, mientras que el A tiene una caída de presión de 766 bares a 706 bares en ese mismo rango de frecuencia. Además, los datos empíricos son cruciales para el desarrollo de modelos predictivos avanzados que anticipen fallos con alta precisión y optimicen el diseño de inyectores, haciéndolos más eficientes y confiables.

El modelo de clasificación basado en Bilayered Neural Network, entrenado para predecir el estado de los inyectores, logró una tasa de precisión del 97.8% durante el proceso de entrenamiento y validación, como se observa en la matriz de confusión que muestra una correcta clasificación del 97.8% del inyector nuevo, 100% del usado y 95.6% del averiado. Las gráficas ROC revelan un excelente desempeño, con un área bajo la curva (AUC) de aproximadamente de 1 para el inyector nuevo y usado, y 0.9995 para el averiado. Estas cifras reflejan la capacidad del modelo para distinguir con precisión entre los tres estados del inyector. Además, la validación cruzada confirma la robustez del modelo, con una alta sensibilidad y baja tasa de falsos positivos. Por otro lado, las gráficas de dispersión y los diagramas de coordenadas paralelas confirman la robustez del modelo, mostrando una clara separación entre las clases de inyectores basadas en las variables como el voltaje y la presión del riel. Durante la fase de prueba, el modelo fue aplicado a cinco muestras nuevas, clasificando correctamente el estado de operación en que se encuentra el

inyector, con una confianza superior al 99.8% en cada predicción, lo que demuestra su efectividad en condiciones reales.

4.2 Recomendaciones

Es recomendable ajustar los niveles de frecuencia y tiempo de inyección utilizados en las pruebas para reflejar un rango más amplio de condiciones operativas reales. La inclusión de frecuencias superiores a 15 Hz y tiempos de inyección menores a 1 ms o mayores a 2 ms podría revelar más información sobre el comportamiento de los inyectores en situaciones de demanda elevada, lo que puede ser útil para vehículos de mayor rendimiento o en aplicaciones industriales.

Aunque el análisis actual presenta resultados robustos, aumentar la cantidad de muestras por cada estado del inyector (N, U, A) mejoraría la precisión de los análisis estadísticos y el rendimiento de los modelos predictivos basados en ML. Incluir más tipos de inyectores y condiciones intermedias entre los tres estados actuales podría proporcionar un modelo predictivo más generalizable.

Dado el éxito del modelo de ML con una precisión del 97.8%, se recomienda avanzar hacia la implementación de un sistema de monitoreo y diagnóstico predictivo en tiempo real en vehículos. Este sistema podría utilizar sensores para medir la presión del riel, el voltaje y la corriente, entre otros, integrados con el modelo predictivo desarrollado para anticipar fallas y optimizar el mantenimiento de los inyectores.

Referencias Bibliográficas

- [1] F. D. Robayo Cabrera and A. S. Sarabia Guevara, “Investigación del comportamiento mecánico y electrónico de los inyectores piezoeléctricos Bosch del sistema de inyección CRDI (Common Rail Diesel Injection) de los vehículos Volkswagen Crafter 2.5 TDI Hyundai Veracruz IX55 3.0.,” Tesis de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/14151>
- [2] E. A. Llanes-Cedeño, Y. Guardia-Puebla, A. De la Rosa-Andino, S. Cevallos-Carvajal, and J. C. Rocha-Hoyos, “Detección de fallas en motores de combustión mediante indicadores de temperatura y presión de inyección,” *Ingenius*, no. 22, pp. 38–46, Jun. 2019, doi: 10.17163/ings.n22.2019.04.
- [3] G. Trujillo, “Impacto de las partículas y la calidad del combustible en la vida de los motores a diésel y el medio ambiente – Parte 2,” Mar. 15, 2022, *México*. [Online]. Available: https://noria.mx/wp-content/uploads/2021/08/Importancia-de-la-calidad-del-combustible-en-la-vida-de-los-motores-diesel_Parte2.pdf
- [4] J. Monieta and L. Kasyk, “Optimization of Design and Technology of Injector Nozzles in Terms of Minimizing Energy Losses on Friction in Compression Ignition Engines,” *Applied Sciences*, vol. 11, no. 16, p. 7341, Aug. 2021, doi: 10.3390/app11167341.
- [5] Observatorio Regional de Planificación para el Desarrollo de América Latina y el Caribe, “Plan de Creación de Oportunidades 2021-2025 de Ecuador,” 2021. [Online]. Available: <https://observatorioplanificacion.cepal.org/es/planes/plan-de-creacion-de-oportunidades-2021-2025-de-ecuador>
- [6] M. O. Tigre Sangurima and N. M. Villa Cayambe, “Repotenciación de un banco de pruebas de inyectores para vehículos a diesel CRDI para el laboratorio de inyección electrónica de la Escuela de Ingeniería Automotriz,” Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, 2015. [Online]. Available: <http://dspace.espech.edu.ec/handle/123456789/4046>
- [7] A. G. Heredia Pacheco and W. A. Chalan Castillo, “Diagnóstico del motor Hyundai D4BH mediante diseño experimental en el sistema de inyección para el mejoramiento del rendimiento y disminución de opacidad,” Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, 2020. [Online]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/18690>
- [8] Y. H. Teoh, H. G. How, C. G. Peh, T. D. Le, and H. T. Nguyen, “Implementation of Common Rail Direct Injection System and Optimization of Fuel Injector Parameters in an Experimental Single-Cylinder Diesel Engine,” *Processes*, vol. 8, no. 9, p. 1122, Sep. 2020, doi: 10.3390/pr8091122.
- [9] “Common-rail system with piezo injectors,” Bosch. [Online]. Available: <https://www.bosch-mobility.com/en/solutions/powertrain/diesel/common-rail-system-piezo/>
- [10] J. A. Granda Gallardo and J. D. Granda Gallardo, “Análisis de fallas en la válvula EGR electrónica y en el Intercooler de un motor Diesel CRDI 2.2 mediante vibraciones y emisiones de gases,” Tesis de grado, 2022. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/23640>

- [11] J. J. Castro Mediavilla and M. E. Gonzáles Torres, “Análisis comparativo del funcionamiento del inyector de un motor CRDI bajo diferentes alturas geográficas,” *INNOVA Research Journal*, vol. 4, no. 1, pp. 60–74, 2019, doi: 10.33890/innova.v4.n1.2019.906.
- [12] I. A. Ordoñez Astudillo and N. D. Rivera Campoverde, “Interpretación de los efectos de la baja de presión de un motor de combustión de interna encendido por compresión CRDi Hyundai Santa Fé 2.0 mediante el análisis de ruido,” Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, 2015. [Online]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7944>
- [13] KIA, “COMMON RAIL - Delphi Manual de Entrenamiento de Servicio 1era Edición,” 2016. [Online]. Available: <https://docplayer.es/19589802-Common-rail-delphi-manual-de-entrenamiento-de-servicio-1a-edicion.html>
- [14] B. F. Simbaña Chorlango, “Identificación del estado de los inyectores electrónicos de motores diésel a base de presiones de funcionamiento,” Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, 2023. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/14001>
- [15] Bosch, “Inyectores Bosch. Soluciones completas y diagnósticos de piezas,” 2017.
- [16] L. M. Guerrero Quintana, “Análisis del comportamiento de los inyectores mecánicos y electrónicos de motores diésel, con el uso de biodiésel. Con mezclas B5 Y B10,” Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8043>
- [17] Delphi, *Manual COMMON RAIL principios de funcionamiento*, 1st ed. 2007. [Online]. Available: <https://docplayer.es/19589802-Common-rail-delphi-manual-de-entrenamiento-de-servicio-1a-edicion.html>
- [18] F. Payri González, *Modelado Fenomenológico del proceso de combustión por difusión diésel*, 1st ed. Editorial Reverté, 2005.
- [19] Bosch, *Sistemas de inyección diésel por acumulador Common Rail*. 2005. [Online]. Available: <https://bit.ly/3ryXabM>
- [20] J. F. Moreno García, “CARACTERIZACIÓN DE UN INYECTOR COMMON RAIL,” 2016. [Online]. Available: <http://crea.ujaen.es/jspui/handle/10953.1/14601>
- [21] E. M. Barros Barzallo, J. J. Carrasco Palomeque, and D. A. Medina Pacheco, “Diseño y construcción de un banco de pruebas de inyectores diesel tipo mecánico y electrónico,” Tesis de grado, Universidad del Azuay, 2011. [Online]. Available: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/6070>
- [22] J. Duarte Forero, D. García, and J. Bello, “Modelo de tasa de inyección en fase líquida para el inyector Isuzu 4JJ1 mediante dinámica de fluidos computacional,” *LADEE*, vol. 1, no. 1, pp. 10–25, Nov. 2020, doi: 10.17981/ladee.01.01.2020.2.
- [23] C. A. Cabezas Bejarano and E. D. Freire Poveda, “Investigación del comportamiento mecánico y electrónico de los inyectores marca Bosch serie 0 445 110 290 y 0 445 110 293 utilizados en el sistema CRDI (Common Rail Diesel Injection),” Tesis de grado, Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, 2018. [Online]. Available: <http://repositorio.espe.edu.ec/handle/21000/14029>

- [24] M. Manzanares Brotons, J. Llumà Fuentes, J. Domingo Peña, C. Alonso, and J. García Gamundi, "ECU: Sistemas electrónicos de inyección en motores de combustión Interna," in *XII Congreso Universitario de Innovación Educativa en las Enseñanzas Técnicas*, Barcelona: EUETIB, 2004, pp. 1–7. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/bitstream/handle/2117/9500/CUIEET-XII-EEEEI-4.pdf>
- [25] E. H. Arias Rojas and Y. Quintero Carreño, "Validación experimental del efecto de la longitud y del ángulo del cono de un inyector de turbina Pelton en la distorsión del chorro," Instituto Tecnológico Metropolitano, 2022. [Online]. Available: <http://hdl.handle.net/20.500.12622/5714>
- [26] "Multi-point injection - injector voltage and current," Pico Automotive. [Online]. Available: <https://www.picoauto.com/library/automotive-guided-tests/multi-point-voltage-vs-current>
- [27] "CRD (Bosch) solenoid injector circuit current," Pico Automotive. [Online]. Available: <https://www.picoauto.com/library/automotive-guided-tests/bosch-current-at-idle>
- [28] A. B. Noboa Asencio, "Investigación del comportamiento mecánico y electrónico de los inyectores Bosch '0445120289' y '0445110250' del sistema Common Rail," Tesis de grado, Universidad Internacional Del Ecuador, 2019. [Online]. Available: <https://repositorio.uide.edu.ec/handle/37000/2892>
- [29] C. H. Lee, "Fuel injection rate variation and energy consumption of solenoid in a diesel solenoid injector with injector driving current patterns," *Journal of Mechanical Science and Technology*, vol. 38, no. 10, pp. 5737–5745, Oct. 2024, doi: 10.1007/s12206-024-0944-9.
- [30] R. Passo G, C. Ulcuango M, C. Toapanta T, and L. Luna V, "Activación y control de inyectores diésel CRDI de las marcas denso y delphi," *Universidad, Ciencia y Tecnología*, vol. 2, no. 2, pp. 186–194, Nov. 2019, [Online]. Available: <https://uctunexpo.autanabooks.com/index.php/uct/article/view/238>
- [31] Z. Zhang, J.-W. Shi, X.-L. Cheng, Y.-J. Dai, and W.-Q. Tao, "Numerical examination of high-pressure fuel injection in common rail injector based on hydro-mechanical model," *Physics of Fluids*, vol. 34, no. 5, May 2022, doi: 10.1063/5.0091830.
- [32] T. Stoeck, "Analytical methodology for testing Common Rail fuel injectors in problematic cases," *Diagnostyka*, vol. 22, no. 2, pp. 47–52, Apr. 2021, doi: 10.29354/diag/135999.
- [33] T. Stoeck, "Methodology for Common Rail fuel injectors testing in case of non-typical faults," *Diagnostyka*, vol. 21, no. 2, pp. 25–30, May 2020, doi: 10.29354/diag/122034.
- [34] P. Ignaciuk and L. Gil, "DAMAGES TO INJECTORS IN DIESEL ENGINES," *Advances in Science and Technology Research Journal*, vol. 8, no. 21, pp. 58–61, 2014, doi: 10.12913/22998624.1091880.
- [35] A. F. Mancheno Ordóñez and J. H. Suárez Cisneros, "Estudio de las calibraciones de los inyectores en función del diésel distribuido en el país," Tesis de grado, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador, 2017.
- [36] D. A. Ayala Bedoya and C. A. Pullas Cisneros, "Análisis Comparativo del Desempeño de un Inyector CRDI mediante el Equipo de Diagnostico Bosch EPS 205," Tesis de grado, Universidad Internacional del Ecuador, Quito, Ecuador, 2022.

- [37] G. X. Cobo Baquerizo, “Análisis de averías en componentes diesel crdi (common rail direct injection),” Tesis de grado, Universidad del Azuay, 2013. [Online]. Available: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/3278>
- [38] J. Ren, R. Ren, M. Green, and X. Huang, “A Deep Learning Method for Fault Detection of Autonomous Vehicles,” in *2019 14th International Conference on Computer Science & Education (ICCSE)*, Toronto: IEEE, Aug. 2019, pp. 749–754. doi: 10.1109/ICCSE.2019.8845483.
- [39] X. Yan *et al.*, “An Online Learning Framework for Sensor Fault Diagnosis Analysis in Autonomous Cars,” *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, vol. 24, no. 12, pp. 14467–14479, Dec. 2023, doi: 10.1109/TITS.2023.3305620.
- [40] M. Naeem, S. T. H. Rizvi, and A. Coronato, “A Gentle Introduction to Reinforcement Learning and its Application in Different Fields,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 209320–209344, 2020, doi: 10.1109/ACCESS.2020.3038605.
- [41] W. Qiang and Z. Zhongli, “Reinforcement learning model, algorithms and its application,” in *2011 International Conference on Mechatronic Science, Electric Engineering and Computer (MEC)*, IEEE, Aug. 2011, pp. 1143–1146. doi: 10.1109/MEC.2011.6025669.
- [42] D. Cao *et al.*, “Reinforcement Learning and Its Applications in Modern Power and Energy Systems: A Review,” *Journal of Modern Power Systems and Clean Energy*, vol. 8, no. 6, pp. 1029–1042, 2020, doi: 10.35833/MPCE.2020.000552.
- [43] F. AlMahamid and K. Grolinger, “Reinforcement Learning Algorithms: An Overview and Classification,” in *2021 IEEE Canadian Conference on Electrical and Computer Engineering (CCECE)*, IEEE, Sep. 2021, pp. 1–7. doi: 10.1109/CCECE53047.2021.9569056.
- [44] H. Li, J. Song, M. Xue, H. Zhang, and M. Song, “A Survey of Neural Trees: Co-Evolving Neural Networks and Decision Trees,” *IEEE Trans Neural Netw Learn Syst*, pp. 1–20, 2024, doi: 10.1109/TNNLS.2024.3446891.
- [45] I. D. Mienye and N. Jere, “A Survey of Decision Trees: Concepts, Algorithms, and Applications,” *IEEE Access*, vol. 12, pp. 86716–86727, 2024, doi: 10.1109/ACCESS.2024.3416838.
- [46] B. Abdualgalil and S. Abraham, “Applications of Machine Learning Algorithms and Performance Comparison: A Review,” in *2020 International Conference on Emerging Trends in Information Technology and Engineering (ic-ETITE)*, IEEE, Feb. 2020, pp. 1–6. doi: 10.1109/ic-ETITE47903.2020.490.
- [47] S. Pathak, I. Mishra, and A. Swetapadma, “An Assessment of Decision Tree based Classification and Regression Algorithms,” in *2018 3rd International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)*, IEEE, Nov. 2018, pp. 92–95. doi: 10.1109/ICICT43934.2018.9034296.
- [48] A. R. Henderson, “Testing experimental data for univariate normality,” *Clinica Chimica Acta*, vol. 366, no. 1–2, pp. 112–129, Apr. 2006, doi: 10.1016/j.cca.2005.11.007.

- [49] R. Bono, J. Arnau, R. Alarcón, and M. J. Blanca, “Bias, Precision, and Accuracy of Skewness and Kurtosis Estimators for Frequently Used Continuous Distributions,” *Symmetry (Basel)*, vol. 12, no. 1, p. 19, Dec. 2019, doi: 10.3390/sym12010019.
- [50] M. Huang, “Theory and Implementation of linear regression,” in *2020 International Conference on Computer Vision, Image and Deep Learning (CVIDL)*, IEEE, Jul. 2020, pp. 210–217. doi: 10.1109/CVIDL51233.2020.00-99.
- [51] S. Ansari and A. B. Nassif, “A Comprehensive Study of Regression Analysis and the Existing Techniques,” in *2022 Advances in Science and Engineering Technology International Conferences (ASET)*, IEEE, Feb. 2022, pp. 1–10. doi: 10.1109/ASET53988.2022.9734973.
- [52] D. C. Montgomery and G. C. Runger, *Applied Statistics and Probability for Engineers*, 7th ed. Hoboken, Nueva Jersey: John Wiley & Sons, 2018.
- [53] M. H. Kutner, C. J. Nachtsheim, and J. Neter, *Applied Linear Statistical Models*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2004.
- [54] N. R. Draper and H. Smith, *Applied Regression Analysis*, 3rd ed. Wiley, 1998. doi: 10.1002/9781118625590.
- [55] D. N. Gujarati, *Basic Econometrics*, 4th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill, 2003.
- [56] J. F. Hair, W. C. Black, B. J. Babin, and R. E. Anderson, *Multivariate Data Analysis*, 8th ed. Cengage, 2018.
- [57] A. A. Espinoza Anrango and A. N. Gordillo Carrera, “Análisis de vibraciones en el motor electrónico MAZDA BT-50 CRDI utilizando biodiésel y diésel,” Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, 2024. [Online]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15797>
- [58] DTSMARKET.RU, “0445110250 BOSCH Форсунка топливная.” [Online]. Available: <http://dtsmarket.ru/0445110250-bosch-forsunka-toplivnaya>
- [59] J. P. Reyes Cualchi, “Diagnóstico de motores diésel electrónicos, a base de presiones en el riel común (CRDI),” Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, 2018. [Online]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8354>
- [60] Bosch, “Sistemas de Inyección Diesel,” Aug. 31, 2017. [Online]. Available: <https://es.slideshare.net/Jordan2009/sistemas-de-inyeccin-diesel-bosch>
- [61] C. J. Becerra Tapia and W. N. Guevara Rodríguez, “Evaluación a base de presiones de bombas de alta presión en sistemas Common Rail,” Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, 2022. [Online]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/11998>
- [62] P. Braden and T. Matis, “Cornish–Fisher-Based Control Charts Inclusive of Skewness and Kurtosis Measures for Monitoring the Mean of a Process,” *Symmetry (Basel)*, vol. 14, no. 6, p. 1176, Jun. 2022, doi: 10.3390/sym14061176.
- [63] J. Berrendero, “TEMA 4 Modelo de regresión múltiple,” *Universidad Autónoma de Madrid*. [Online]. Available: <https://verso.mat.uam.es/~joser.berrendero/cursos/adatos/ad2-tema4-12.pdf>

- [64] P. Refaeilzadeh, L. Tang, and H. Liu, “Cross-Validation,” in *Encyclopedia of Database Systems*, Boston, MA: Springer US, 2009, pp. 532–538. doi: 10.1007/978-0-387-39940-9_565.
- [65] J. I. Baciero Fernández, “Elaboración de un Modelo de Reconocimiento de Entidades Nominales (NER) para su uso en aplicaciones de Procesamiento del Lenguaje Natural (NLP),” Proyecto fin de carrera, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, 2020. [Online]. Available: <https://oa.upm.es/62858/>
- [66] J. Allgaier and R. Pryss, “Cross-Validation Visualized: A Narrative Guide to Advanced Methods,” *Mach Learn Knowl Extr*, vol. 6, no. 2, pp. 1378–1388, Jun. 2024, doi: 10.3390/make6020065.
- [67] J. E. López Guamialamaz and J. I. Medina Yáñez, “Propuesta técnica de un sistema para el diagnóstico predictivo de un motor diésel en base a gases de escape,” Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2024. [Online]. Available: <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/15516>

Anexo 2. Base de datos para el entrenamiento del modelo en Aprendizaje Automático

Frequency_Hz_	Voltage_V_	Amperage_A_	Rail_Pressure_bar_	Fuel_Injection_ml_	Fuel_Return_ml_	STATE
1	2,71	0,540	740	0,8	0,8	N
2	2,72	0,541	740	1,6	1,0	N
3	2,72	0,538	720	2,2	1,4	N
4	2,71	0,538	740	2,0	1,8	N
5	2,71	0,536	740	1,8	1,8	N
6	2,69	0,529	740	4,0	1,8	N
7	2,64	0,520	720	3,4	2,2	N
8	2,65	0,521	720	5,4	3,0	N
9	2,65	0,521	720	4,6	2,8	N
10	2,65	0,521	720	4,2	3,0	N
11	2,65	0,521	720	5,2	2,8	N
12	2,64	0,519	700	5,2	2,4	N
13	2,64	0,514	700	6,2	3,6	N
14	2,64	0,519	700	7,0	2,8	N
15	2,64	0,520	700	6,4	3,4	N
1	2,63	0,528	740	1,0	1,2	N
2	2,63	0,526	740	2,0	1,4	N
3	2,64	0,524	740	2,2	1,6	N
4	2,64	0,523	740	4,4	1,8	N
5	2,64	0,522	740	4,2	2,6	N
6	2,64	0,522	740	5,0	2,6	N
7	2,64	0,521	740	5,6	2,4	N
8	2,64	0,521	740	5,8	2,8	N
9	2,64	0,521	740	7,4	3,6	N
10	2,64	0,520	740	7,4	3,2	N
11	2,72	0,561	720	7,8	3,6	N
12	2,72	0,552	720	8,4	4,4	N
13	2,72	0,545	720	9,2	3,4	N
14	2,71	0,544	700	9,6	4,0	N
15	2,71	0,543	700	10,6	4,0	N
1	2,70	0,545	740	0,8	1,0	N
2	2,69	0,538	740	3,0	1,6	N
3	2,69	0,538	740	4,2	2,0	N
4	2,69	0,538	740	4,8	2,0	N
5	2,69	0,538	740	4,4	2,4	N
6	2,61	0,520	720	6,4	2,6	N
7	2,59	0,519	720	8,2	3,2	N
8	2,59	0,519	720	7,6	2,2	N
9	2,60	0,521	700	9,0	3,0	N
10	2,60	0,521	700	10,0	3,2	N
11	2,60	0,519	700	11,0	4,8	N
12	2,62	0,521	700	11,6	3,6	N
13	2,59	0,519	680	12,6	5,4	N
14	2,59	0,519	680	13,2	5,0	N
15	2,60	0,519	680	12,8	5,8	N
1	2,69	0,554	900	1,2	0,6	U
2	2,69	0,548	900	1,4	0,8	U
3	2,69	0,545	920	2,0	1,4	U
4	2,69	0,542	900	2,6	1,4	U
5	2,69	0,538	900	4,6	2,0	U
6	2,70	0,537	900	3,4	2,0	U
7	2,73	0,613	800	2,2	1,2	U
8	2,74	0,588	780	3,6	1,8	U
9	2,73	0,578	780	4,0	2,2	U
10	2,73	0,570	780	5,0	2,2	U
11	2,72	0,563	820	5,4	2,8	U
12	2,72	0,559	840	5,8	3,0	U
13	2,72	0,554	820	6,6	2,6	U
14	2,72	0,551	820	6,4	3,2	U
15	2,73	0,546	800	7,6	3,2	U
1	2,66	0,553	920	0,8	1,4	U
2	2,66	0,539	900	2,6	1,8	U
3	2,67	0,533	900	4,0	1,6	U
4	2,66	0,528	860	5,2	2,2	U
5	2,66	0,527	860	5,0	2,6	U
6	2,65	0,523	860	5,0	2,6	U
7	2,64	0,522	860	6,0	3,2	U

8	2,64	0,521	860	7,4	2,6	U
9	2,64	0,521	820	9,0	3,2	U
10	2,64	0,521	840	9,0	3,2	U
11	2,64	0,520	820	11,0	4,0	U
12	2,63	0,520	820	11,2	3,2	U
13	2,71	0,610	820	13,8	5,4	U
14	2,69	0,578	820	12,4	3,6	U
15	2,70	0,568	840	13,6	4,4	U
1	2,60	0,532	840	1,2	1,6	U
2	2,63	0,532	840	3,0	2,2	U
3	2,62	0,528	840	3,2	1,8	U
4	2,60	0,523	820	6,0	2,2	U
5	2,60	0,522	820	6,0	2,2	U
6	2,60	0,522	800	6,8	3,0	U
7	2,59	0,520	800	7,6	3,4	U
8	2,60	0,521	780	9,8	3,6	U
9	2,62	0,522	780	10,0	4,0	U
10	2,62	0,522	780	11,6	4,0	U
11	2,62	0,522	780	12,4	4,2	U
12	2,62	0,522	780	13,4	4,0	U
13	2,62	0,522	780	14,4	4,6	U
14	2,62	0,521	760	16,6	5,2	U
15	2,62	0,520	740	15,8	5,0	U
1	2,80	0,579	780	1,0	1,4	A
2	2,81	0,568	760	1,0	1,6	A
3	2,79	0,552	760	1,0	1,8	A
4	2,80	0,548	760	2,2	1,8	A
5	2,80	0,547	740	1,8	2,0	A
6	2,80	0,545	740	2,4	2,0	A
7	2,81	0,547	740	3,2	2,4	A
8	2,80	0,545	740	4,8	2,8	A
9	2,80	0,545	740	4,8	2,8	A
10	2,80	0,545	740	5,6	3,0	A
11	2,81	0,545	740	5,6	3,6	A
12	2,80	0,544	740	5,6	3,8	A
13	2,80	0,544	740	7,0	3,8	A
14	2,79	0,544	720	7,2	4,0	A
15	2,79	0,543	720	7,0	3,8	A
1	2,71	0,554	780	1,6	1,6	A
2	2,71	0,545	780	1,4	1,4	A
3	2,71	0,536	760	2,2	2,0	A
4	2,71	0,531	760	3,0	2,4	A
5	2,71	0,528	760	4,0	2,6	A
6	2,70	0,525	760	4,8	3,2	A
7	2,70	0,523	760	5,8	3,2	A
8	2,69	0,521	740	6,8	3,6	A
9	2,70	0,522	740	7,4	3,6	A
10	2,70	0,522	740	8,2	3,6	A
11	2,71	0,521	740	9,0	4,0	A
12	2,70	0,521	720	9,8	4,0	A
13	2,70	0,521	720	10,8	4,6	A
14	2,69	0,520	720	11,6	5,0	A
15	2,69	0,519	720	12,2	4,8	A
1	2,75	0,538	740	1,0	2,0	A
2	2,76	0,538	740	3,4	2,6	A
3	2,76	0,538	740	3,2	2,6	A
4	2,75	0,537	740	5,0	3,2	A
5	2,76	0,538	740	4,8	3,0	A
6	2,75	0,537	740	5,8	3,4	A
7	2,75	0,536	720	6,8	3,6	A
8	2,74	0,533	720	8,2	3,8	A
9	2,74	0,533	720	8,8	4,0	A
10	2,73	0,533	720	10,2	4,2	A
11	2,73	0,533	700	11,8	4,8	A
12	2,73	0,530	700	12,2	4,6	A
13	2,73	0,528	700	13,2	5,0	A
14	2,71	0,526	700	14,0	5,6	A
15	2,71	0,525	680	15,2	5,6	A

Anexo 3. Tabla de los residuales para los tres inyectores.

Salidas	Inyector nuevo						Inyector usado						Inyector averiado					
	PCI (ml)	RCI (ml)	PCR (ml)	RCR (ml)	PPR (bar)	RPR (bar)	PCI (ml)	RCI (ml)	PCR (ml)	RCR (ml)	PPR (bar)	RPR (bar)	PCI (ml)	RCI (ml)	PCR (ml)	RCR (ml)	PPR (bar)	RPR (bar)
1	-0.48	1.28	0.72	0.08	751.28	-11.28	-1.10	2.30	0.62	-0.02	905.44	-5.44	-1.21	2.21	1.10	0.30	776.22	3.78
2	0.16	1.44	0.95	0.05	747.63	-7.63	-0.30	1.70	0.83	-0.03	898.25	1.75	-0.44	1.44	1.33	0.27	772.32	-12.32
3	0.81	1.39	1.18	0.22	743.99	-23.99	0.50	1.50	1.05	0.35	891.06	28.94	0.32	0.68	1.56	0.24	768.41	-8.41
4	1.45	0.55	1.41	0.39	740.35	-0.35	1.29	1.31	1.26	0.14	883.87	16.13	1.09	1.11	1.79	0.01	764.51	-4.51
5	2.09	-0.29	1.64	0.16	736.71	3.29	2.09	2.51	1.48	0.52	876.68	23.32	1.86	-0.06	2.02	-0.02	760.60	-20.60
6	2.73	1.27	1.88	-0.08	733.06	6.94	2.89	0.51	1.69	0.31	869.49	30.51	2.63	-0.23	2.25	-0.25	756.70	-16.70
7	3.38	0.02	2.11	0.09	729.42	-9.42	3.68	-1.48	1.91	-0.71	862.30	-62.30	3.39	-0.19	2.48	-0.08	752.79	-12.79
8	4.02	1.38	2.34	0.66	725.78	-5.78	4.48	-0.88	2.12	-0.32	855.11	-75.11	4.16	0.64	2.71	0.09	748.89	-8.89
9	4.66	-0.06	2.57	0.23	722.13	-2.13	5.28	-1.28	2.34	-0.14	847.92	-67.92	4.93	-0.13	2.94	-0.14	744.98	-4.98
10	5.30	-1.10	2.80	0.20	718.49	1.51	6.07	-1.07	2.55	-0.35	840.73	-60.73	5.70	-0.10	3.17	-0.17	741.08	-1.08
11	5.94	-0.74	3.03	-0.23	714.85	5.15	6.87	-1.47	2.77	0.03	833.54	-13.54	6.47	-0.87	3.40	0.20	737.17	2.83
12	6.59	-1.39	3.26	-0.86	711.21	-11.21	7.67	-1.87	2.98	0.02	826.35	13.65	7.23	-1.63	3.63	0.17	733.27	6.73
13	7.23	-1.03	3.49	0.11	707.56	-7.56	8.46	-1.86	3.20	-0.60	819.16	0.84	8.00	-1.00	3.86	-0.06	729.37	10.63
14	7.87	-0.87	3.72	-0.92	703.92	-3.92	9.26	-2.86	3.41	-0.21	811.97	8.03	8.77	-1.57	4.09	-0.09	725.46	-5.46
15	8.51	-2.11	3.95	-0.55	700.28	-0.28	10.06	-2.46	3.63	-0.43	804.78	-4.78	9.54	-2.54	4.33	-0.52	721.56	-1.56
16	1.51	-0.51	1.16	0.04	747.28	-7.28	1.44	-0.64	1.30	0.10	881.44	38.56	0.90	0.70	1.68	-0.08	764.22	15.78
17	2.15	-0.15	1.39	0.01	743.63	-3.63	2.23	0.37	1.52	0.28	874.25	25.75	1.67	-0.27	1.91	-0.51	760.32	19.68
18	2.79	-0.59	1.62	-0.02	739.99	0.01	3.03	0.97	1.73	-0.13	867.06	32.94	2.44	-0.24	2.14	-0.14	756.41	3.59
19	3.43	0.97	1.85	-0.05	736.35	3.65	3.83	1.37	1.95	0.25	859.87	0.13	3.21	-0.21	2.37	0.03	752.51	7.49
20	4.08	0.12	2.08	0.52	732.71	7.29	4.62	0.38	2.16	0.44	852.68	7.32	3.97	0.03	2.60	0.00	748.60	11.40
21	4.72	0.28	2.32	0.28	729.06	10.94	5.42	-0.42	2.38	0.22	845.49	14.51	4.74	0.06	2.83	0.37	744.70	15.30
22	5.36	0.24	2.55	-0.15	725.42	14.58	6.22	-0.22	2.59	0.61	838.30	21.70	5.51	0.29	3.06	0.14	740.79	19.21
23	6.00	-0.20	2.78	0.02	721.78	18.22	7.01	0.39	2.81	-0.21	831.11	28.89	6.28	0.52	3.29	0.31	736.89	3.11
24	6.65	0.75	3.01	0.59	718.13	21.87	7.81	1.19	3.02	0.18	823.92	-3.92	7.04	0.36	3.52	0.08	732.98	7.02
25	7.29	0.11	3.24	-0.04	714.49	25.51	8.61	0.39	3.24	-0.04	816.73	23.27	7.81	0.39	3.75	-0.15	729.08	10.92
26	7.93	-0.13	3.47	0.13	710.85	9.15	9.40	1.60	3.45	0.55	809.54	10.46	8.58	0.42	3.98	0.02	725.17	14.83
27	8.57	-0.17	3.70	0.70	707.21	12.79	10.20	1.00	3.67	-0.47	802.35	17.65	9.35	0.45	4.21	-0.21	721.27	-1.27
28	9.22	-0.02	3.93	-0.53	703.56	16.44	11.00	2.80	3.88	1.52	795.16	24.84	10.11	0.69	4.44	0.16	717.37	2.63
29	9.86	-0.26	4.16	-0.16	699.92	0.08	11.79	0.61	4.10	-0.50	787.97	32.03	10.88	0.72	4.67	0.33	713.46	6.54
30	10.50	0.10	4.39	-0.39	696.28	3.72	12.59	1.01	4.31	0.09	780.78	59.22	11.65	0.55	4.91	-0.11	709.56	10.44
31	3.49	-2.69	1.60	-0.60	743.28	-3.28	3.97	-2.77	1.99	-0.39	857.44	-17.44	3.02	-2.02	2.26	-0.26	752.22	-12.22
32	4.14	-1.14	1.83	-0.23	739.63	0.37	4.77	-1.77	2.21	-0.01	850.25	-10.25	3.78	-0.38	2.49	0.11	748.32	-8.32
33	4.78	-0.58	2.06	-0.06	735.99	4.01	5.56	-2.36	2.42	-0.62	843.06	-3.06	4.55	-1.35	2.72	-0.12	744.41	-4.41
34	5.42	-0.62	2.29	-0.29	732.35	7.65	6.36	-0.36	2.64	-0.44	835.87	-15.87	5.32	-0.32	2.95	0.25	740.51	-0.51
35	6.06	-1.66	2.52	-0.12	728.71	11.29	7.16	-1.16	2.85	-0.65	828.68	-8.68	6.09	-1.29	3.18	-0.18	736.60	3.40
36	6.71	-0.31	2.76	-0.16	725.06	-5.06	7.95	-1.15	3.07	-0.07	821.49	-21.49	6.85	-1.05	3.41	-0.01	732.70	7.30
37	7.35	0.85	2.99	0.21	721.42	-1.42	8.75	-1.15	3.28	0.12	814.30	-14.30	7.62	-0.82	3.64	-0.04	728.79	-8.79
38	7.99	-0.39	3.22	-1.02	717.78	2.22	9.55	0.25	3.50	0.10	807.11	-27.11	8.39	-0.19	3.87	-0.07	724.89	-4.89
39	8.63	0.37	3.45	-0.45	714.13	-14.13	10.34	-0.34	3.71	0.29	799.92	-19.92	9.16	-0.36	4.10	-0.10	720.98	-0.98
40	9.28	0.72	3.68	-0.48	710.49	-10.49	11.14	0.46	3.93	0.07	792.73	-12.73	9.92	0.28	4.33	-0.13	717.08	2.92
41	9.92	1.08	3.91	0.89	706.85	-6.85	11.94	0.46	4.14	0.06	785.54	-5.54	10.69	1.11	4.56	0.24	713.17	-13.17
42	10.56	1.04	4.14	-0.54	703.21	-3.21	12.73	0.67	4.36	-0.36	778.35	1.65	11.46	0.74	4.79	-0.19	709.27	-9.27
43	11.20	1.40	4.37	1.03	699.56	-19.56	13.53	0.87	4.57	0.03	771.16	8.84	12.23	0.97	5.02	-0.02	705.37	-5.37
44	11.85	1.35	4.60	0.40	695.92	-15.92	14.33	2.27	4.79	0.41	763.97	-3.97	12.99	1.01	5.25	0.35	701.46	-1.46
45	12.49	0.31	4.83	0.97	692.28	-12.28	15.12	0.68	5.00	0.00	756.78	-16.78	13.76	1.44	5.49	0.12	697.56	-17.56

Nota: En la tabla, los términos están codificados de la siguiente manera: PCI: Pronóstico caudal de inyección, RCI: Residuos caudal de inyección, PCR: Pronóstico caudal de retorno, RCR: Residuos caudal de retorno, PPR: Pronóstico presión del riel, RPR: Residuos presión del riel; todos en sus respectivas unidades. Las salidas del 1 al 15 corresponden a un tiempo de inyección de 1 ms y una frecuencia que varía de 1 Hz a 15 Hz. Las salidas del 16 al 30 corresponden a un tiempo de inyección de 1,5 ms y la misma frecuencia. Las salidas del 31 al 45 corresponden a un tiempo de inyección de 2 ms, manteniendo la frecuencia de 1 Hz a 15 Hz.

Anexo 4. Código del sistema basado en inyectores

```

function [trainedClassifier, validationAccuracy] = trainClassifier(trainingData)
% [trainedClassifier, validationAccuracy] = trainClassifier(trainingData)
% Returns a trained classifier and its accuracy. This code recreates the
% classification model trained in Classification Learner app. Use the
% generated code to automate training the same model with new data, or to
% learn how to programmatically train models.
%
% Input:
%   trainingData: A table containing the same predictor and response
%   columns as those imported into the app.
%
% Output:
%   trainedClassifier: A struct containing the trained classifier. The
%   struct contains various fields with information about the trained
%   classifier.
%   trainedClassifier.predictFcn: A function to make predictions on new
%   data.
%   validationAccuracy: A double representing the validation accuracy as
%   a percentage. In the app, the Models pane displays the validation
%   accuracy for each model.
%
% Use the code to train the model with new data. To retrain your
% classifier, call the function from the command line with your original
% data or new data as the input argument trainingData.
%
% For example, to retrain a classifier trained with the original data set
% T, enter:
% [trainedClassifier, validationAccuracy] = trainClassifier(T)
%
% To make predictions with the returned 'trainedClassifier' on new data T2,
% use
% [yfit,scores] = trainedClassifier.predictFcn(T2)
%

```

```

% T2 must be a table containing at least the same predictor columns as used
% during training. For details, enter:
%   trainedClassifier.HowToPredict

% Auto-generated by MATLAB on 05-Nov-2024 20:47:26

% Extract predictors and response
% This code processes the data into the right shape for training the
% model.
inputTable = trainingData;
predictorNames = {'Frequency_Hz_', 'Voltage_V_', 'Amperage_A_', 'Rail_Pressure_bar_', 'Fuel_Injection_ml_',
'Fuel_Return_ml_'};
predictors = inputTable(:, predictorNames);
response = inputTable.STATE;
isCategoricalPredictor = [false, false, false, false, false, false];
classNames = categorical({'A'; 'N'; 'U'});

% Train a classifier
% This code specifies all the classifier options and trains the classifier.
classificationNeuralNetwork = fitnet(...
    predictors, ...
    response, ...
    'LayerSizes', [10 10], ...
    'Activations', 'relu', ...
    'Lambda', 0, ...
    'IterationLimit', 1000, ...
    'Standardize', true, ...
    'ClassNames', classNames);

% Create the result struct with predict function
predictorExtractionFcn = @(t) t(:, predictorNames);
neuralNetworkPredictFcn = @(x) predict(classificationNeuralNetwork, x);
trainedClassifier.predictFcn = @(x) neuralNetworkPredictFcn(predictorExtractionFcn(x));

% Add additional fields to the result struct

```

```

trainedClassifier.RequiredVariables = {'Frequency_Hz_', 'Voltage_V_', 'Amperage_A_', 'Rail_Pressure_bar_',
'Fuel_Injection_ml_', 'Fuel_Return_ml_'};
trainedClassifier.ClassificationNeuralNetwork = classificationNeuralNetwork;
trainedClassifier.About = 'This struct is a trained model exported from Classification Learner R2023b.';
trainedClassifier.HowToPredict = sprintf('To make predictions on a new table, T, use: \n [yfit,scores] =
c.predictFcn(T) \nreplacing "c" with the name of the variable that is this struct, e.g. "trainedModel". \n \nThe table,
T, must contain the variables returned by: \n c.RequiredVariables \nVariable formats (e.g. matrix/vector, datatype)
must match the original training data. \nAdditional variables are ignored. \n \nFor more information, see <a
href="matlab:helpview(fullfile(docroot, "stats", "stats.map"), "appclassification_exportmodeltoworkspace")">How
to predict using an exported model</a>');

% Extract predictors and response
% This code processes the data into the right shape for training the
% model.
inputTable = trainingData;
predictorNames = {'Frequency_Hz_', 'Voltage_V_', 'Amperage_A_', 'Rail_Pressure_bar_', 'Fuel_Injection_ml_',
'Fuel_Return_ml_'};
predictors = inputTable(:, predictorNames);
response = inputTable.STATE;
isCategoricalPredictor = [false, false, false, false, false, false];
classNames = categorical({'A'; 'N'; 'U'});

% Perform cross-validation
partitionedModel = crossval(trainedClassifier.ClassificationNeuralNetwork, 'Kfold', 5);

% Compute validation predictions
[validationPredictions, validationScores] = kfoldPredict(partitionedModel);

% Compute validation accuracy
validationAccuracy = 1 - kfoldLoss(partitionedModel, 'LossFun', 'ClassifError');

```