

REPÚBLICA DEL ECUADOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE POSGRADO



MAESTRÍA EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ
CON MENCIÓN EN NEGOCIOS AUTOMOTRICES

TEMA

DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO
PARA SISTEMAS DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA CRDi

Trabajo de Titulación previo a la obtención del Título de Magíster en Ingeniería
Automotriz con mención en Negocios Automotrices

AUTOR: Ing. William Javier Jácome Collaguazo

DIRECTOR: Ing. Zamir Andrés Mera Rosero, PhD

ASESOR: Ing. Carlos Nolasco Mafla Yépez, PhD.

IBARRA - ECUADOR

2025

Yo, **Zamir Andrés Mera Rosero**, certifico que el estudiante **William Javier Jácome Collaguazo** con Cédula N° **1003317748** ha elaborado bajo mi tutoría la sustentación del trabajo de grado titulado: **“Desarrollo de un Modelo de Mantenimiento Predictivo para Sistemas de Inyección Electrónica CRDi.”**

Este trabajo se sujeta a las normas y metodologías dispuestas en el reglamento del título a obtener, por lo tanto, autorizo la presentación a la sustentación para la calificación respectiva.

Ibarra, 25 de marzo del 2025



Ing. Zamir Andrés Mera Rosero, PhD

Tutor

CL: 1003184478



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



AUTORIZACIÓN DE USO Y PUBLICACIÓN
A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

1. IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

En cumplimiento del Art. 144 de la Ley de Educación Superior, hago la entrega del presente trabajo a la Universidad Técnica del Norte para que sea publicado en el Repositorio Digital Institucional, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD	1003317748		
APELLIDOS Y NOMBRES	Jácome Collaguazo William Javier		
DIRECCIÓN	Ibarra, La Esperanza, Calle Galo Plaza 19-131		
EMAIL	wjjacomec@utn.edu.ec		
TELÉFONO FIJO	062660342	TELÉFONO MÓVIL	0996001822

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO	Desarrollo de un Modelo de Mantenimiento Predictivo para Sistemas de Inyección Electrónica CRDi
AUTOR (ES):	Ing. Jácome Collaguazo William Javier
FECHA: DD/MM/AAAA	25/03/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE GRADO	
PROGRAMA DE POSGRADO	Maestría en Ingeniería Automotriz
TÍTULO POR EL QUE OPTA	Magíster en Ingeniería Automotriz con mención en Negocios Automotrices
DIRECTOR	Ing. Zamir Andrés Mera Rosero, PhD



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA



2. CONSTANCIA

El autor William Javier Jácome Collaguazo, 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 esta y saldrá en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 19 días del mes de mayo del año 2025

EL AUTOR:

Firma

William Javier Jácome Collaguazo

CI: 1003317748

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación se lo dedico a mi hijo Emilio Javier, quien ha sido en todo este tiempo mi mayor inspiración para poder cumplir cada sueño, meta y objetivo que me he planteado en mi vida personal, profesional y deportiva. Desde el primer día que llegó a este mundo, cada paso que doy es pensando en él y su bienestar.

William Javier Jácome Collaguazo.

RECONOCIMIENTO

Agradezco principalmente a mis padres, quienes con mucho esfuerzo me han apoyado no solo para conseguir este título, han sido mi pilar fundamental a lo largo de este camino llamado vida. Agradezco también a mi tutor y asesor quienes con su colaboración he podido sacar adelante este trabajo de titulación y poder así incorporarme.

William Javier Jácome Collaguazo.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA	I
CONSTANCIA	II
DEDICATORIA.....	III
RECONOCIMIENTO	IV
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	V
ÍNDICE DE TABLAS.....	VII
ÍNDICE DE ECUACIONES	VIII
GLOSARIO	IX
RESUMEN	X
ABSTRACT	XI
CAPÍTULO I	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN	1
1.1. Planteamiento del problema	1
1.2. Antecedentes.....	1
1.3. Objetivos.....	2
1.3.1. Objetivo General.....	2
1.3.2. Objetivos Específicos	2
1.4. Justificación.....	3
1.5. Alcance	3
CAPÍTULO II.....	4
MARCO REFERENCIAL	4
2.1. Marco Teórico	4
2.1.1. Introducción.....	4
2.1.2. Circuito de Alimentación Motor Diésel	5
2.1.3. Tipos de Sistemas de Inyección Electrónicos.....	5
2.1.4. Tipos de Mantenimiento.....	7
2.1.5. Emisiones Contaminantes en los Motores Diésel.....	7
2.1.6. Los gases de escape	9
2.2. Marco Legal.....	10
2.2.1. Constitución de la República del Ecuador.....	10
2.2.2. Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC).....	10
2.2.3. Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial	11
2.2.4. Reglamento a la LOTTTSV	11
2.2.5. Resolución Nro. 046-DIR-2012-ANT.....	11

2.2.6. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2207.....	12
CAPÍTULO III	13
MARCO METODOLÓGICO	13
3.1. Descripción del área de estudio	13
3.2. Enfoque y tipo de investigación	13
3.3. Procedimientos de investigación	14
3.3.1. Fase 1: Composición del combustible diésel del Ecuador	15
3.3.2. Fase 2: Nivel de afectación del diésel sobre el Sistema CRDi.....	16
3.3.3. Fase 3: Modelo estadístico de las fallas que presenta el Sistema CRDi. 16	
3.3.4. Fase 4: Modelo predictivo de mantenimiento del Sistema CRDi	17
3.4. Consideraciones Bioéticas.....	19
CAPÍTULO IV	20
RESULTADOS Y DISCUSIÓN	20
4.1. Composición del combustible diésel en el Ecuador	20
4.1.1. Caracterización del combustible diésel	20
Propiedades físico - químicas de estudio del combustible diésel.....	21
4.1.2. Regulaciones ambientales.....	22
4.1.3. Composición del combustible diésel en el Ecuador	23
4.2. Nivel de afectación del diésel sobre el Sistema CRDi	25
4.3. Modelo estadístico de fallas del Sistema CRDi.....	27
4.3.1. Descripción general de la muestra.....	27
4.3.2. Caracterización vehicular de la muestra.....	29
4.3.3. Mantenimiento del Sistema CRDi.....	34
4.4. Modelo predictivo de mantenimiento del Sistema CRDi.....	39
4.4.1. Modelo BNL - Contaminación del Combustible.....	39
4.4.2. Modelo BNL - Tipo de Mantenimiento en función del Km.....	40
4.4.3. Modelo BNL - Tipo de Mantenimiento en Función del TUM.....	41
CONCLUSIONES.....	42
RECOMENDACIONES	44
REFERENCIAS	45
ANEXOS	52

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor diésel.....	12
Tabla 2. Descripción de las variables empleadas en el estudio	17
Tabla 3. Propiedades de estudio del combustible diésel	22
Tabla 4. Requisitos del Diésel Premium	23
Tabla 5. Contenido de agua y sedimento básico del diésel premium ecuatoriano	23
Tabla 6. Contenido de azufre del diésel premium ecuatoriano	24
Tabla 7. Nivel de afectación del diésel en los Sistemas CRDi.....	26
Tabla 8. Modelo BNL (Contaminación del Combustible)	40
Tabla 9. Modelo BNL (Tipo de Mantenimiento)	41
Tabla 10. Modelo BNL (Tipo de Mantenimiento)	41

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1. Circuito de alimentación	5
Fig. 2. Sistemas CRDi	6
Fig. 3. Ubicación geográfica del área de estudio.....	13
Fig. 4. Flujograma del procedimiento de investigación.	14
Fig. 5. Gráficos estadísticos tipo barras verticales y horizontales.....	17
Fig. 6. Producción, importación y consumo nacional de diésel	20
Fig. 7. Demanda diaria mundial de combustibles petrolíferos 2025-2045.....	21
Fig. 8. Afectación del contenido de agua en el combustible.	22
Fig. 9. Cambios tecnológicos en los motores diésel.....	25
Fig. 10. Cronología de las Normas Euro aplicadas en Sudamérica.....	26
Fig. 11. Género.....	28
Fig. 12. Edad.....	28
Fig. 13. Cantón y/o provincia de circulación.....	29
Fig. 14. Marca vehicular.....	30
Fig. 15. Modelo vehicular.....	30
Fig. 16. Tipo de vehículo.....	31
Fig. 17. Año de fabricación vehicular.	31
Fig. 18. Cilindraje vehicular.....	32
Fig. 19. Tipo de peso vehicular.	33
Fig. 20. Peso vehicular.	33
Fig. 21. Tipo de Operación Vehicular.	33
Fig. 22. Kilometraje actual.	34
Fig. 23. Tiempo último de mantenimiento del Sistema CRDi.	35
Fig. 24. Tiempo último de escaneo de la computadora.	35
Fig. 25. Síntomas o fallas previas al mantenimiento.	36
Fig. 26. Partes defectuosas del Sistema CRDi.....	37
Fig. 27. Contaminación en el combustible.	37
Fig. 28. Tipo de Mantenimiento Realizado	38
Fig. 29. Partes/piezas reemplazadas.	38
Fig. 30. Costos de mantenimiento.	39

ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación. 1. Utilidad Sistemática de un Modelo de Elección Discreta	18
Ecuación. 2. Probabilidad de Elección de un Modelo de Elección Discreta.....	19

GLOSARIO

- CRDI/CRDi:** Common Rail Direct Injection (Inyección Directa Common Rail)
- UCE:** Universidad Central del Ecuador
- EPN:** Escuela Politécnica Nacional del Ecuador
- LACBAL:** Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes - EPN
- DPEC:** Departamento de Petróleos de Energía y Contaminación - UCE
- UIS:** Injector Unit System (Sistema de Unidad Inyectora)
- UPS:** Unit Pump System (Sistema de Bomba Unitaria)
- EDC:** Electronic Diesel Control (Control Electrónico Diésel)
- CRS:** Common Riel System (Sistema Common Rail)
- CO:** Monóxido de Carbono
- CO₂:** Dióxido de Carbono
- NO:** Monóxido de Nitrógeno
- NO₂:** Dióxido de Nitrógeno
- NO_x:** Óxidos de Nitrógeno
- SO:** Óxido de Azufre
- SO₂:** Dióxido de Azufre
- SO₃:** Trióxido de Azufre
- HC:** Hidrocarburos
- HF:** Hidrógeno de Fluoruro
- H₂SO₄:** Ácido Sulfúrico
- NDC:** Nationally Determined Contributions (Contribución Determinada a Nivel Nacional)
- GEI:** Gas de Efecto Invernadero
- ANT:** Agencia Nacional de Tránsito
- NTE:** Norma Técnica Ecuatoriana
- INEN:** Instituto Ecuatoriano de Normalización
- NAMA:** Nationally Appropriate Mitigation Actions (Acciones Nacionales Apropriadas de Mitigación)
- ECE:** Urban Driving Cycle (Ciclo de Conducción Urbano)
- EUDC:** Extra Urban Driving Cycle (Ciclo de Conducción Extra Urbano)
- ESC:** European Stationary Cycle (Ciclo estacionario europeo)
- ELR:** European Low Response (Prueba Europea de Respuesta Bajo Carga)
- ASTM:** Asociación Americana de Ensayo de Materiales
- EPA:** Environmental Protection Agency (Agencia de Protección Ambiental)
- AEADE:** Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador
- BNL:** Modelo de Elección Discreta Logit Binomial

UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE POSGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

**DESARROLLO DE UN MODELO DE MANTENIMIENTO PREDICTIVO
PARA SISTEMAS DE INYECCIÓN ELECTRÓNICA CRDi**

Autor: Ing. William Javier Jácome Collaguazo

Director: Ing. Zamir Andrés Mera Rosero, PhD

Año: 2025

RESUMEN

El sistema de inyección es uno de los sistemas del vehículo con mayor importancia; desde su implementación, ha sido objeto de cambios y desarrollo tecnológico a fin de mejorar su eficiencia en consumo de combustible y emisiones de gases de escape. La presente investigación tiene como objetivo desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo para sistemas de inyección electrónica CRDi a fin de evitar su desgaste y reparación a futuro. Se utilizó datos cuantitativos y cualitativos a través de 50 encuestas, las cuales permitieron capturar información relevante con respecto a las características vehiculares y todo lo relacionado con los mantenimientos del Sistema de Inyección CRDi de tercera y cuarta generación con inyectores solenoides, realizados en la Empresa “J&J LABORATORIO”. El método experimental y la revisión bibliográfica determinó que el combustible diésel del Ecuador cumple con los parámetros establecidos con respecto al contenido de azufre, agua y sedimentos, y no es un factor mayormente determinante en el desgaste de los sistemas CRDi, sin embargo, de acuerdo con las Normas Euro 5 y 6, se califica al diésel ecuatoriano como un combustible de mala calidad. El análisis estadístico identificó que la pérdida de potencia, el consumo de combustible, el exceso de humo negro, la demora de encendido, el cascabeleo y el recalentamiento, son las principales fallas que conllevan a las reparaciones de los sistemas de inyección. A su vez, los inyectores, la bomba de alta presión, la bomba de inyección, y válvulas son sus principales componentes que presentan fallas constantemente. En base a modelos de elección discreta tipo Logit Binomial se determinó que el kilometraje y el tipo de operación vehicular influyen en el mantenimiento y contaminación del combustible, así como el momento óptimo de un mantenimiento predictivo en los Sistemas CRDi. Finalmente, es recomendable realizar el mantenimiento predictivo del Sistema CRDi cada 5 meses aproximadamente. Esta propuesta puede aplicarse de manera general a otros talleres/laboratorios automotrices.

Palabras clave: Motor Diésel, Sistemas de Inyección, CRDi, Mantenimiento Predictivo, Modelos de Elección Discreta.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
FACULTAD DE POSGRADO
PROGRAMA DE MAESTRÍA EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

**DEVELOPMENT OF A PREDICTIVE MAINTENANCE MODEL FOR CRDi
ELECTRONIC INJECTION SYSTEMS**

Author: Ing. William Javier Jácome Collaguazo

Director: Ing. Zamir Andrés Mera Rosero, PhD

Year: 2024

ABSTRACT

The injection system is one of the most important systems in a vehicle. It has undergone changes and technological developments in order to improve its fuel consumption and exhaust emissions efficiency. This research aims to develop a predictive maintenance model for CRDi electronic injection systems, to prevent wear and anticipate future repairs. Quantitative and qualitative data were collected through surveys, which provided information regarding vehicle characteristics, and parameters related to the third and fourth generation CRDi Injection System with solenoid injectors maintenance, performed at the "J&J LABORATORY" company. The experimental method and literature review determined that diesel fuel in Ecuador meets the established parameters concerning sulfur content, water, and sediments, and is not a major factor in the wearing of CRDi systems. However, according to Euro 5 and 6 standards, Ecuadorian diesel is classified as low-quality fuel. The statistical analysis identified that power loss, fuel consumption, excessive black smoke, delayed ignition, knocking, and overheating are the main symptoms that lead to repairs of the injection systems. The injectors, high-pressure pump, injection pump, and valves are the main components that constantly experience failures. Based on discrete choice models, such as the Binomial Logit, it was determined that mileage and vehicle operation influence maintenance and fuel contamination, as well as the optimal time for predictive maintenance in CRDi systems. Finally, a predictive maintenance of the CRDi system is recommended every 5 months. This predictive maintenance can be generally applied by automotive workshops and laboratories.

Keywords: Diesel Engine, Injection Systems, CRDi, Predictive Maintenance, Discrete Choice Model.

CAPÍTULO I

EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Planteamiento del problema

Los vehículos son indispensables en la movilidad moderna, especialmente en actividades y trabajos de transporte de carga pesada, debido a que prestan un servicio fiable y económico. El sistema de inyección es uno de los sistemas de un vehículo a diésel con mayor importancia. Es crucial para reducir el consumo de combustible y, por ende, la cantidad de gases contaminantes generados por la combustión. También optimiza la eficiencia en la conversión de combustible a energía, lo que se traduce en un alto rendimiento energético [1].

Si bien el principio de funcionamiento del motor de combustión interna ciclo diésel ha sido el mismo, no obstante, el sistema de inyección ha sido totalmente lo contrario, desde su implementación, ha sido objeto de cambios y desarrollo tecnológico a fin de mejorar su eficiencia en consumo de combustible y principalmente emisiones de gases de escape luego de la combustión. Para el caso de los Sistemas de Inyección Electrónica CRDi, estos han venido evolucionando varias generaciones desde el año 1995, aumentando sus presiones de trabajo, mejorando la pulverización del combustible y su control electrónico por medio de sensores cada vez más precisos con el fin de aumentar considerablemente el torque y la potencia [2].

Dentro de las innovaciones y cambios por lograr un sistema de inyección con mayor eficiencia, se ha dejado de lado establecer un modelo de mantenimiento predictivo que se debe hacer periódicamente al sistema de inyección a fin de evitar su desgaste que disminuye su eficiencia o peor aún a futuro presenta un fallo total del sistema que requiera una reparación. El presente trabajo busca desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo para los sistemas de inyección electrónica CRDi, haciendo un análisis de aquellos factores que desgasta estos sistemas.

1.2. Antecedentes

La primera bomba de inyección de combustible diésel se fabricó en línea de producción en noviembre de 1927 [3] y a partir de este año, las demandas en cuanto a emisiones, ruido, eficiencia y rendimiento de los motores diésel han aumentado, lo que requiere que los fabricantes desarrollen sistemas, motores y vehículos de mejor calidad.

En el contexto del desarrollo de un sistema de inyección, los fabricantes han tenido que enfrentar diversos factores para asegurar que sus sistemas en desarrollo sean de calidad, confiables y duraderos. La referencia [4] afirma que un factor principal que afecta el desempeño de estos sistemas es la calidad de combustible diésel.

Es de conocimiento general que el combustible diésel en el Ecuador no es el idóneo para el desarrollo eficiente de los sistemas de inyección por lo que los fabricantes han optado por implementar una serie de partes que protegen al sistema. En [5], los filtros de combustible y los microfiltros de inyectores son componentes protectores que tienen la función de asegurar la pureza del combustible, previniendo daños en el sistema de inyección.

El diseño de los filtros depende del tipo de sistema de inyección y de las condiciones de operación, es más exigente para sistemas que trabajen a presiones más elevadas [6]. Este tipo de filtros protegen al sistema, pero no es suficiente, la mala composición del combustible hace que a medida que pase el tiempo deteriore el sistema hasta que se presenta una falla grave que requiera ser reparado o reemplazado.

Pese al factor combustible y las medidas de protección que han optado los fabricantes, en la actualidad no existen estudios de desarrollo de un modelo de mantenimiento predictivo en base al tiempo óptimo en meses y el desgaste que ocasiona el combustible para prevenir fallos graves en el sistema de inyección electrónico CRDi.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo General

Desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo para sistemas de inyección electrónica CRDi.

1.3.2. Objetivos Específicos

- Determinar la composición del combustible diésel del Ecuador.
- Determinar el nivel de afectación que tiene el combustible sobre los sistemas de inyección electrónica CRDi.
- Elaborar un modelo estadístico de las fallas que presentan los sistemas de inyección electrónico CRDi por el desgaste ocasionado por el combustible diésel.
- Desarrollar un modelo predictivo de mantenimiento del sistema de inyección electrónica en base al kilometraje recorrido del vehículo.

1.4. Justificación

La calidad, eficiencia y durabilidad de un sistema de inyección electrónico CRDi, depende del tipo de mantenimiento del vehículo. Sin embargo, este tipo de sistema no tiene establecido planes o manuales que establezcan el kilometraje o tiempo al que se debe realizar un mantenimiento predictivo del sistema de inyección en un vehículo. Es evidente que el cambio de filtro de combustible en cada cambio de aceite no es suficiente para prevenir fallos de gravedad en el sistema, por lo que establecer planes de mantenimiento predictivo es indispensable.

J & J Laboratorio, con más de 10 años de experiencia, es una empresa dedicada al diagnóstico, mantenimiento y reparación de Sistemas de Inyección a Diésel Convencional y Electrónico CRDi. En la empresa, un alto porcentaje de casos atendidos tienen un diagnóstico que refiere a fallos en el sistema por la ausencia de un mantenimiento predictivo, por lo que se debe realizar un mantenimiento correctivo que implica la reparación o reemplazo total de la parte afectada del sistema e incurre un costo económico mayor para el propietario del vehículo que el costo de haber hecho un debido mantenimiento predictivo del sistema.

A fin de evitar que la falla en el sistema se haga presente, es imperante desarrollar planes de mantenimiento predictivo ya que con el mismo se garantiza el funcionamiento óptimo con una corrección a tiempo a un costo económico menor.

1.5. Alcance

El objetivo principal de la presente memoria de investigación fue desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo para Sistemas de Inyección Electrónica CRDi. Para alcanzar este objetivo se emplearon instrumentos de recolección de datos con la finalidad de obtener las tendencias de comportamiento de estos sistemas.

Por otro lado, en el Laboratorio Químico DPEC de la Universidad Central del Ecuador, se realizaron análisis con respecto a la composición del combustible en el Ecuador, de modo que permita comprender la relación del desgaste de los Sistemas de Inyección Electrónica CRDi en función de la calidad del combustible.

Con la información recopilada se desarrolló un modelo estadístico y de mantenimiento predictivo para Sistemas de Inyección Electrónica CRDi de tercera y cuarta generación con inyectores solenoides, en función del desgaste que provoca el combustible en el Ecuador, así como del kilometraje del vehículo.

CAPÍTULO II

MARCO REFERENCIAL

2.1. Marco Teórico

2.1.1. Introducción

La tecnología de los motores de combustión interna ha sido fundamental en diversas aplicaciones, desde la propulsión de vehículos hasta la generación de energía en instalaciones industriales, por lo cual se han destacado por su eficiencia y versatilidad [7]. El motor diésel es un motor autoencendido, que se caracteriza por su capacidad de comprimir el aire antes de la inyección de combustible, lo que genera un proceso de combustión muy eficiente [8].

En la revisión bibliográfica [3], el rendimiento fiable y económico de los motores diésel requiere sistemas de inyección que funcionen con alta precisión, debido a su capacidad de alimentación eficiente, donde el combustible es inyectado en los cilindros del motor bajo alta presión y en el momento adecuado para alcanzar la mayor potencia de rendimiento. Los Sistemas de Inyección Diésel Common Rail (CRDI) han encabezado el renacimiento tecnológico, que ha venido a anunciar los motores diésel del presente y a germinar sus futuras generaciones [9]. Se ha observado que los sistemas CRDI reducen significativamente el consumo específico de combustible [10] y los precursores de las emisiones [11] en comparación con el funcionamiento diésel convencional.

Las fallas del motor diésel se origina por diversos factores, siendo uno de ellos el sistema de inyección, que puede presentar deficiencia por distintas razones y afectar el rendimiento dinámico del motor; las posibles causas de fallas en el sistema de inyección incluyen la inyección prematura de combustible, el retraso en la inyección, baja presión de inyección, sobreinyección, obstrucción del inyector y fallos en la bomba de inyección [12]. Para que el Sistema de Inyección Diésel ofrezca todos los beneficios y ventajas, precisa pasar por revisiones periódicas, estar bien regulado [3]. Hoy en día se pueden encontrar diferentes investigaciones para determinar el análisis periódico del sistema CRDI, sin embargo, en la actualidad no existe la modelación de un mantenimiento predictivo en base al momento óptimo en meses. Por lo antes expuesto, la presente investigación busca plantear un modelo estadístico de mantenimiento predictivo para los sistemas de inyección electrónico CRDi en función del kilometraje, tiempo óptimo o demás factores que ocasionan desgaste en estos sistemas.

2.1.2. Circuito de Alimentación Motor Diésel

En la Fig. 1, se detalla el circuito de alimentación, donde el combustible diésel sale del tanque (1) aspirado por la bomba alimentadora (2), pasa a través del filtro (3), entra en la bomba de inyección (4) y por medio del elemento se bombea, generando alta presión. A través de cada porta inyector (5) es inyectado en los diferentes cilindros del motor.

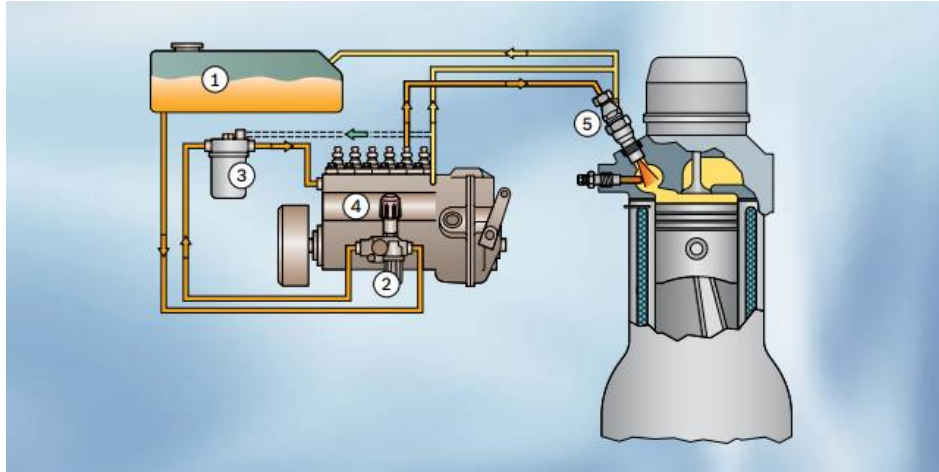


Fig. 1. Circuito de alimentación [3].

La regulación diésel hace posible dosificar el caudal de inyección correcto para cada momento de servicio del motor y ajustar el comienzo exacto de la inyección [3]. Existen dos tipos de sistemas de inyección diésel:

a. Sistemas Mecánicos

Son sistemas de inyección en los que la velocidad del motor, el volumen y la presión del combustible se controlan de manera mecánica mediante un regulador puramente mecánico, que incluye dispositivos como resortes, palancas, ejes, entre otros [13].

b. Sistemas Electrónicos

Para satisfacer las estrictas normativas sobre emisiones de gases de escape, los motores diésel requieren un control preciso del volumen de combustible inyectado [14]. Los sistemas mecánicos ya no son capaces de cumplir con estos estándares, lo que llevó al desarrollo de sistemas de inyección con control electrónico, como el UIS (Sistema de Unidad Inyectora), el UPS (Sistema de Bomba Unitaria) y el Common Rail, entre otros. Estos sistemas son más eficientes, seguros, potentes y económicos [15].

2.1.3. Tipos de Sistemas de Inyección Electrónicos

a. Electronic Diesel Control (EDC)

El control electrónico en motores diésel permite una configuración precisa y personalizada de los volúmenes de inyección mejorando la reducción del consumo de

combustible y en su efecto el aumento de potencia/torque del motor. De acuerdo con [16], la regulación mecánica tradicional se limita a un circuito de regulación simple que no puede reaccionar rápidamente a diversos factores, por lo cual, se desarrolló la Regulación Electrónica Diésel (EDC - Electronic Diesel Control), que responde a las crecientes demandas mediante un sistema con un actuador eléctrico que gestiona un comando electrónico del motor, capaz de recopilar y procesar una gran cantidad de datos en tiempo real.

A diferencia de los vehículos diésel equipados con bombas inyectoras en línea o sistemas convencionales, en el sistema EDC, el conductor no tiene control directo sobre el volumen de combustible inyectado, como sucedía con el pedal del acelerador y un cable. En su lugar, este volumen se determina por varios factores, incluyendo la demanda del conductor (posición del pedal del acelerador), el régimen de funcionamiento, la temperatura del motor y el impacto en las emisiones contaminantes [17].

b. Common Rail System (CRS)

El control electrónico del sistema de inyección marca un avance significativo en el desarrollo de motores diésel; no obstante, el moderno Sistema Common Rail (CRS) es la tecnología más reciente utilizada en sistemas de inyección electrónica. De acuerdo con la literatura, [18] afirma que, en este sistema, la generación de presión y la inyección de combustible son independientes; esto implica que la bomba produce la alta presión que se distribuye a todos los inyectores a través de una galería común, la cual se puede controlar sin depender de la velocidad del motor.



Fig. 2. Sistemas CRDi [3].

La presión del combustible, así como el inicio y el final de la inyección, son calculados con precisión por la unidad de control, utilizando datos de diversos sensores instalados en el motor con la finalidad de asegurar un excelente rendimiento, bajo nivel de ruido y mínimas emisiones de gases contaminantes [3].

2.1.4. Tipos de Mantenimiento

a. Mantenimiento correctivo

Es el conjunto de actividades orientadas a reparar los fallos, disfunciones o daños detectados a través de la supervisión remota o inspecciones rutinarias, que surgen en los diferentes equipos y que son reportados al departamento de mantenimiento por sus usuarios [19]. El mantenimiento correctivo consiste en un proceso no planificado que tiene como objetivo solucionar problemas y restaurar el funcionamiento normal [20]. Sin embargo, puede resultar costoso y generar una disminución en la producción de energía, así como provocar daños a componentes críticos [21].

b. Mantenimiento preventivo

Es el tipo de mantenimiento cuyo objetivo es mantener un nivel específico de servicio en los equipos, programando intervenciones en sus puntos vulnerables en el momento adecuado; tiene un enfoque sistemático, lo que significa que se realizan acciones incluso si el equipo no presenta señales de problemas [22]. La preparación para llevar a cabo las actividades de mantenimiento dentro del plazo previsto puede evitar accidentes y fallos en cierta medida [23].

c. Mantenimiento predictivo

Es el que persigue conocer e informar permanentemente del estado y operatividad de las instalaciones mediante el conocimiento de los valores de determinadas variables, representativas de tal estado y operatividad [24]. Para llevar a cabo este tipo de mantenimiento, es fundamental identificar variables físicas (como temperatura, vibración, consumo de energía, entre otras) cuya variación pueda indicar la aparición de problemas en el equipo; se considera como el más avanzado tecnológicamente, ya que demanda el uso de herramientas técnicas sofisticadas y, en ocasiones, un sólido conocimiento en matemáticas, física y técnicas especializadas [25].

2.1.5. Emisiones Contaminantes en los Motores Diésel

Los motores diésel son unas máquinas que transforman la energía química en energía mecánica y energía térmica, con un rendimiento en el mejor de los casos del 35-40% (sin tener en cuenta rozamientos ni resistencias aerodinámicas) por lo que un 60-65 % de esa energía química se transforma en calor [5]. En el interior de la cámara del pistón de un

motor diésel, realmente ocurre una combustión, que es una reacción química de óxido-reducción en la que ciertos compuestos se oxidan mientras que otros se reducen [26]. Para que se produzca una combustión, se requieren tres elementos esenciales: un combustible, un comburente (u oxidante) y una fuente de energía de activación [27]. La energía de activación corresponde con la altísima presión y temperatura que se consiguen con la compresión de la mezcla de combustible y comburente en el interior de la cámara de compresión lo que hace que literalmente explote (óxido-reducción violenta) [5].

a. El combustible

El diésel es un combustible empelado para el funcionamiento de los motores diésel. El diésel o gasóleo es una mezcla de hidrocarburos que contienen de 13 a 25 átomos de carbono, que se saca del petróleo; este hidrocarburo de estado líquido tiene una densidad 832 kg/m³, y está formado principalmente por parafinas, es utilizado también como combustible para calefacciones [28].

La fórmula química general del gasóleo común es C₁₂H₂₆, variando entre C₁₀H₂₂ a C₁₅H₃₂. C₁₂H₂₆, aproximadamente el 86,1% del diésel está compuesto de carbono, y al quemarlo se obtiene un poder calorífico de 43,10 MJ/kg [29]. El combustible en un motor diésel es un derivado del petróleo que está compuesto aproximadamente por un 75% de hidrocarburos saturados (principalmente parafinas incluyendo isoparafinas y cicloparafinas) y un 25% de hidrocarburos aromáticos (incluyendo naftalenos y alcalobencenos) [30].

Las principales propiedades que se abarcan en el diésel son: el cetanaje, la densidad, la volatilidad, el poder calorífico y la viscosidad; desde hace 4 años, la industria automotriz en el Ecuador se encuentra abastecida del Diésel Premium de un buen cetanaje [31]. A menor número de cetano, mayor es la resistencia a la ignición [32].

b. El comburente

El comburente en un motor diésel es el oxígeno y en una combustión ideal, el combustible y el comburente reaccionan dando lugar únicamente a dióxido de carbono y agua; en esta reacción, el carbono se oxida (pierde electrones) que se los cede al oxígeno (que los gana), por eso es una reacción de óxido-reducción [5]. Esta reacción puede presentar ciertos inconvenientes por la falta de oxidante (mezcla no estequiométrica), lo que puede dar lugar a la formación de otros productos, como el monóxido de carbono (CO), carbono en forma de hollín, e incluso hidrocarburos parcialmente quemados (oxidantes). Además, debido a las impurezas, se genera dióxido de azufre en pequeñas cantidades [29].

La problemática de los motores diésel radica en la composición del comburente que ingresa a la cámara de combustión. En lugar de solo oxígeno, entra aire, que consiste en un 79 % de nitrógeno y un 21 % de oxígeno; cuando el nitrógeno ingresa a la cámara de combustión y se alcanzan temperaturas cercanas a 1600 °C y presiones muy altas, reacciona con el exceso de oxígeno, generando los denominados óxidos de nitrógeno (NOx) [33].

c. La combustión

Contiene cientos de compuestos químicos emitidos en fase gaseosa o fase particulada; los principales productos gaseosos son dióxido de carbono (CO₂), oxígeno, nitrógeno y vapor de agua [34]. También están presentes el monóxido de carbono (CO), el dióxido de azufre, los óxidos de nitrógeno (NOx), los hidrocarburos y sus derivados; el benceno, el tolueno, el benzopireno y otros hidrocarburos poli-cíclicos aromáticos también están presentes en la parte gaseosa [5].

2.1.6. Los gases de escape

Los componentes principales de la fase gaseosa de las emisiones diésel son nitrógeno, dióxido de carbono (CO₂), oxígeno, vapor de agua, óxidos de nitrógeno (NOx) y monóxido de carbono (CO) [35]. Es importante señalar que estas sustancias representan solo una pequeña fracción del total de los gases de escape. En base a [36], algunos de estos gases no son peligrosos, como el dióxido de carbono, el nitrógeno, el agua y el oxígeno; sin embargo, otros son nocivos y es necesario eliminarlos o reducir su proporción en los gases de combustión.

El monóxido de nitrógeno (NO) al combinarse con el oxígeno del aire, se convierte en dióxido de nitrógeno (NO₂), un gas de color pardo rojizo y olor muy fuerte, que irrita las vías respiratorias y es tóxico [37]. El dióxido de azufre es un gas incoloro, tiene un olor penetrante y no es combustible, sin embargo, puede causar enfermedades respiratorias [38]; además, la combustión incompleta del combustible produce otro gas tóxico: el monóxido de carbono (CO) que es incoloro, inodoro, explosivo y altamente tóxico, ya que impide el transporte de oxígeno en la sangre al unirse al hierro de la hemoglobina [39]. Finalmente, las partículas de hollín y los hidrocarburos son residuos no quemados del combustible que aparecen en los gases de escape tras una combustión incompleta.

2.2. Marco Legal

2.2.1. Constitución de la República del Ecuador

- a. **Art. 15.-** “El Estado promoverá, en el sector público y privado, el uso de tecnologías ambientalmente limpias y de energías alternativas no contaminantes y de bajo impacto (...)” [40].
- b. **Art. 66.27-** “Se reconoce y garantizará a las personas, el derecho a vivir en un ambiente sano, ecológicamente equilibrado, libre de contaminación y en armonía con la naturaleza” [40].
- c. **Art. 414.-** “El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica (...)” [40].

2.2.2. Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional (NDC) para el Acuerdo de París bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático

- a. “En términos generales, se ha acordado que los países deben llegar a un pico de emisiones de gases de efecto invernadero “lo más pronto posible”, reconociendo que el pico de emisiones tomará más tiempo para países en desarrollo, sin establecer años o periodos en específico. Ecuador realizará, a través de esta primera NDC, sus esfuerzos iniciales hacia este fin (...). Ecuador a través de la Estrategia Nacional de Cambio Climático, ha planteado crear las condiciones favorables para la adopción de medidas que reduzcan emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar los sumideros de carbono en los sectores estratégicos.” [41].
- b. “La NDC del Ecuador presenta el compromiso del país en líneas de acción por sector, cuyo aporte de mitigación ha sido incluido en una estimación agregada para los sectores: Energía, Agricultura, Procesos Industriales y Residuos” [41].
- c. “Dentro de las líneas de acción del sector energía para cumplir con la primera NDC, Ecuador plantea como iniciativa el “NAMA de Transporte de Carga y Pasajeros” que conlleva a Acciones de reducción de emisiones de GEI en transporte de carga y acciones de reducción de emisiones de GEI en transporte de pasajeros en Quito, Guayaquil y Cuenca” [41].
- d. “Con respecto al sector USCUS y las líneas de acción establecidas a partir de los esfuerzos nacionales, se ha identificado un potencial de reducción de emisiones

de GEI 23 del 4% en comparación a nivel de referencia al año 2025. Sin embargo, en el caso de contar con apoyo de la cooperación internacional para desarrollar las líneas de acción del escenario condicional de este sector, se contaría con un potencial adicional de mitigación de 16%, es decir, una reducción total de emisiones de GEI del 20% en comparación al nivel de referencia para el año 2025” [41].

2.2.3. Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial

- a. **Art. 88.-** “En materia de tránsito y seguridad vial, la presente Ley tiene por objetivo, entre otros, los siguientes: (...) h) La reducción de la contaminación ambiental, producida por ruidos y emisiones de gases emanados de los vehículos a motor (...)” [42].
- b. **Art. 211.-** “Todos los automotores que circulen dentro del territorio ecuatoriano deberán estar provistos de partes, componentes y equipos que aseguren que no rebasen los límites máximos permisibles de emisión de gases y ruidos contaminantes establecidos en el Reglamento” [42].
- c. **Art. 212.-** “Los importadores y ensambladores de automotores son responsables de que los vehículos tengan dispositivos anticontaminantes” [42].

2.2.4. Reglamento a la LOTTTSV (Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial).

- a. **Art. 40.-** “El transporte terrestre de personas y bienes es un servicio esencial que responde a las condiciones de: (...) MEDIO AMBIENTE. - El estado garantizará que los vehículos que ingresan al parque automotor a nivel nacional cumplan con normas ambientales y promoverá la aplicación de nuevas tecnologías que permitan disminuir la emisión de gases contaminantes de los vehículos” [43].
- b. **Art. 326.-** “Todos los motores de los vehículos que circulan por el territorio ecuatoriano, no deberán sobrepasar los niveles máximos permitidos de emisión de gases contaminantes, exigidos en la normativa correspondiente” [43].

2.2.5. Resolución Nro. 046-DIR-2012-ANT. Reglamento Relativo a los Procesos de la Revisión Técnica de Vehículos a Motor

- a. **Art. 2.-** “La Revisión Técnica Vehicular, previa a la matriculación u otorgamiento de los permisos anuales de circulación, es de carácter obligatoria, a la que se someten todos los vehículos a motor que circulen en el territorio de la República del Ecuador (...)” [44].

- b. Art. 3.-** “Los objetivos fundamentales de la revisión técnica vehicular son: (...) 2. Controlar el nivel de emisiones contaminantes que no superen los límites máximos establecidos en la normativa vigente; (...)” [44].
- c. Art. 11.-** “Los vehículos de uso particular y los vehículos por cuenta propia que circulen en la República del Ecuador deberán ser sometidos al proceso de Revisión Técnica una vez al año, (...). Los vehículos de servicio público o comercial deberán ser sometidos al proceso de Revisión Técnica de manera semestral (...)” [44].
- d. Art. 27.-** “Se incorporan las normas del Capítulo VIII “Del Ambiente y de la Contaminación de Fuentes Móviles”, (...), Sección II “De la Contaminación por Emisión de Gases de Combustión” del Reglamento para la Aplicación de la Ley de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial” [44].

2.2.6. Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 2207. “Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites Permitidos de Emisiones Producidas por Fuentes Móviles Terrestres de Diésel”

- a. 6.2.1.-** “Toda fuente móvil con motor diésel no debe emitir el aire monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC), óxidos de nitrógeno (NOx) y partículas, en cantidades superiores a las indicadas en la Tabla 1” [45].

Tabla 1. Límites máximos de emisiones para fuentes móviles con motor diésel (prueba dinámica)* (ciclos europeos) [45].

Categoría	Peso bruto del vehículo kg	CO g/km	HC g/km	NOx g/km	HF+NOx g/km	Partículas g/km	Ciclos de prueba
M1		0,64	-	0,50	0,56	0,05	ECE -15 + EUDC
N1	CL1 ≤ 1305	0,64	-	0,50	0,56	0,05	ECE -15 + EUDC
	CL2 1305 - 1760	0,80	-	0,65	0,72	0,07	
	CL3 > 1760	0,95	-	0,78	0,86	0,10	
N2, N3, M2, M3 (a)	> 3500	2,10	0,66	5,00	-	0,10 0,13 (b)	ESC & ELR

* Prueba realizada al nivel del mar

(a) Unidades en g/kWh

(b) Para motores <0,75 dm³ de cilindrada por cilindro y una potencia nominal a velocidad >3000 rpm

CAPÍTULO III

MARCO METODOLÓGICO

3.1. Descripción del área de estudio

El presente trabajo se desarrolló en el Laboratorio de Sistemas de Inyección “J&J LABORATORIO”, una empresa que se encuentra ubicada en la ciudad de Ibarra, provincia de Imbabura, específicamente en la parroquia San Francisco, Calle Darío Egas Grijalva y Dr. Cristóbal Gómez Jurado, Sector del Terminal Terrestre. Su ubicación geográfica se detalla en la Fig. 3.

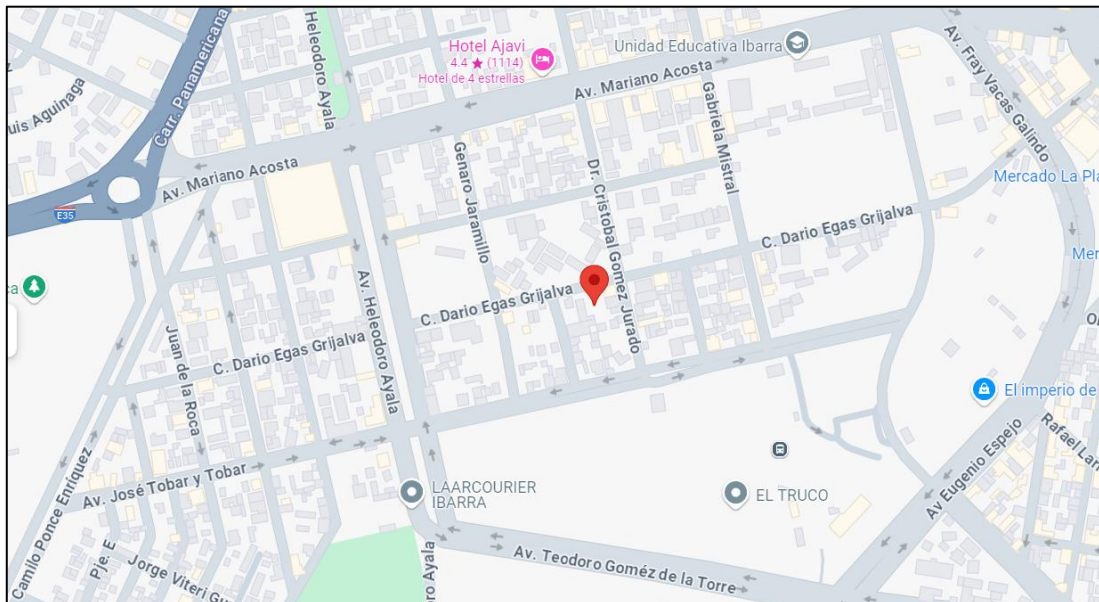


Fig. 3. Ubicación geográfica del área de estudio [46].

“J&J LABORATORIO” es un laboratorio con más de 10 años de experiencia en el área de diagnóstico, mantenimiento y reparación de sistemas de inyección a diésel convencional y electrónico. Para realizar la presente investigación se utilizó como grupo de estudio, una muestra de 50 clientes de vehículos que funcionen con Sistema de Inyección Electrónico CRDi de tercera y cuarta generación con inyectores solenoides.

3.2. Enfoque y tipo de investigación

El desarrollo del presente estudio tuvo un enfoque mixto, es decir la combinación de los métodos cuantitativos y cualitativos [47].

Por un lado, se utilizó el **enfoque cuantitativo**, donde mediante encuestas se realizó el levantamiento de datos que permitió definir un análisis estadístico descriptivo y en función de variables nominales ordinarias se planteó un modelo de mantenimiento predictivo que definió las tendencias de comportamiento, funcionamiento y desgaste del Sistema de Inyección CRDi. Esto tiene como objetivo prever el momento ideal para

realizar un mantenimiento preventivo del sistema, con el fin de evitar fallas, desgastes y correcciones a futuro. Por otro lado, se aplicó el **enfoque cualitativo** que permitió recolectar información con respecto a los mantenimientos y diagnósticos realizados en el laboratorio de estudio; esto con la finalidad de identificar las causas de las fallas del Sistema CRDi en función de la composición y desgaste que ocasiona el combustible diésel.

En cuanto al tipo de investigación, en primera instancia se empleó una **investigación científica**, debido a que se realizó una revisión bibliográfica enfocada en la descripción, origen, fallas, mantenimiento y posibles soluciones del Sistema de Inyección CRDi. Asimismo, se empleó una **investigación aplicada**, debido a que se solucionó un problema de la industria automotriz relacionado con el momento óptimo del mantenimiento predictivo de Sistemas de Inyección CRDi. Esta propuesta puede aplicarse de manera general a otros talleres/laboratorios automotrices. Finalmente, se desarrolló una **investigación explicativa**, dado que se planteó un modelo matemático que permitió comprender y determinar el momento óptimo de un mantenimiento predictivo de los Sistemas CRDi.

3.3. Procedimientos de investigación

El siguiente trabajo consistió en desarrollar un modelo de mantenimiento predictivo para sistemas de inyección electrónica CRDi; para lo cual se empleó el siguiente flujograma que indica el proceso de su ejecución:

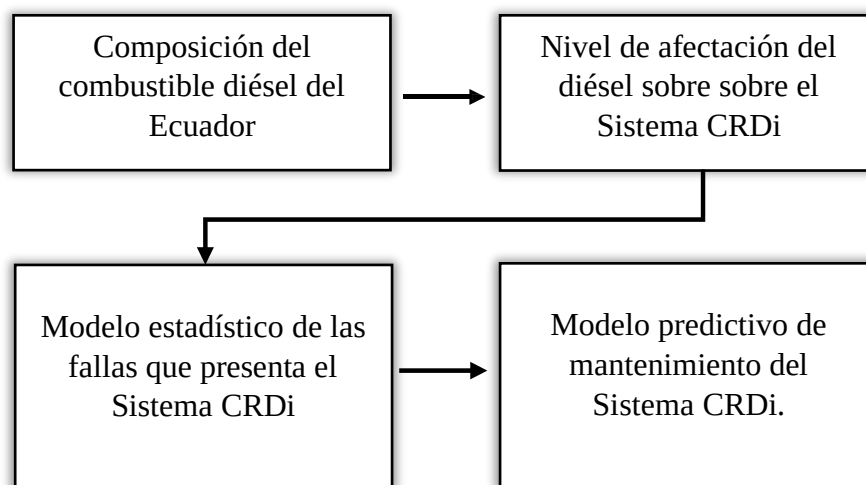


Fig. 4. Flujograma del procedimiento de investigación.

Este trabajo se conformó de 4 etapas, así como se observa en la Fig. 4 con la finalidad de cumplir los objetivos propuestos de una manera ordenada y eficiente. A continuación, se describe cada una de las etapas.

3.3.1. Fase 1: Composición del combustible diésel del Ecuador

a. Actividad 1: Caracterización del combustible diésel

Uno de los factores más importantes que contribuyen al deterioro de los Sistemas de Inyección CRDi es la calidad del combustible diésel que se vende en Ecuador, ya que este es esencial para el funcionamiento del sistema. Por ello, fue fundamental realizar un estudio sobre la composición del combustible diésel en el país para evaluar su impacto en el rendimiento y la vida útil de los sistemas. Para ello en primera instancia se investigó y definió las siguientes consideraciones:

- Participación del combustible diésel, con la finalidad de determinar su producción, importación y consumo en el Ecuador.
- Definición de las propiedades de estudio físico - químicas del combustible diésel, a fin de analizar el cumplimiento de contenido de azufre, agua y sedimentos.

b. Actividad 2: Definición de las regulaciones ambientales

A partir de la investigación realizada sobre la normativa ambiental aplicada en base a las propiedades de estudio del combustible diésel, se definieron los estándares a utilizar en la presente memoria, con respecto al contenido de azufre, agua y sedimentos del diésel. A continuación, se detalla la normativa que se aplicó para el presente apartado:

- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2021. Productos Derivados de Petróleo. Diésel. Requisitos
- Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2012. Productos Derivados de Petróleo. Diésel. Requisitos

c. Actividad 3: Análisis de ensayos químicos experimentales y científicos para determinar la composición del combustible diésel en el Ecuador

Durante el mes de marzo de 2022, en base a una muestra propia recolectada en la Empresa “J&J LABORATORIO”; se determinó de manera experimental en el Laboratorio DPEC del Área de Petróleos de la UCE, el contenido de agua y sedimentos en el Combustible Diésel Premium del Ecuador; cuyas características técnicas del ensayo se detallan a continuación:

- **Número de informe:** 22-059.1
- **Condiciones de la muestra:** Muestra en envase de vidrio ámbar, con tapa
- **Método/Técnica:** ASTM D-1796 (Centrifugación – derivados)
- **Condiciones ambientales:** **Presión:** 544,7 mm Hg. **Temperatura:** 18,2 °C

Por otro lado, y de acuerdo con la información aportada en la revisión bibliográfica, se investigó científicamente el contenido de azufre en el combustible diésel del Ecuador. Varios estudios utilizaron la norma ASTM D4294, método estándar para medir el contenido total de azufre en petróleo y sus derivados en condiciones ambientales; este método puede detectar cantidades de azufre que oscilan entre 17 ppm y 46,000 ppm [48].

3.3.2. Fase 2: Nivel de afectación del diésel sobre el Sistema CRDi

a. Actividad 1: Análisis Evolutivo: Sistema CRDi vs Calidad del Diésel

La presente actividad buscó determinar la evolución de los Sistemas CRDi en función de la calidad del combustible, donde se realizó una investigación y análisis inicial sobre los valores estándar de calidad del combustible diésel en los diferentes países sudamericanos, así como sobre la normativa ambiental (EURO) que están en vigor actualmente.

b. Actividad 2: Análisis de afectación del diésel en los Sistemas CRDi.

Con la finalidad de analizar y definir el nivel de afectación del combustible diésel, se partió de la composición química determinada en la Fase 1 correspondiente al contenido de azufre, agua y sedimentos del diésel ecuatoriano. Se determinó mediante una tabla de valores el nivel de afectación del diésel en los Sistemas CRDi.

3.3.3. Fase 3: Modelo estadístico de las fallas que presenta el Sistema CRDi

a. Actividad 1: Instrumento de recolección de información

Para el desarrollo del presente trabajo se aplicó una encuesta comprendida por tres secciones. La primera sección recolectó información general del individuo. Se preguntó el género, edad y cantón de circulación. En la segunda sección se capturó información correspondiente a los datos del vehículo como placa, marca, modelo, tipo, año de fabricación, cilindraje, tipo de peso en toneladas (si es pesado o liviano), tipo de operación (público, comercial o particular) y kilometraje actual. Finalmente, la tercera y última sección abarcó información sobre el mantenimiento del Sistema CRDi de tercera y cuarta generación con inyectores solenoides; con respecto a los tiempos últimos de mantenimiento y escaneo de computadora, los síntomas previos al mantenimiento, el diagnóstico, la presencia o no de contaminación en el combustible, las piezas o partes defectuosas, el mantenimiento realizado, el reemplazo de piezas y su respectivo costo. En el Anexo 1, se aprecia con mayor detalle el formato y cuestionario de la encuesta aplicada.

b. Actividad 2: Levantamiento de información

Las encuestas se recolectaron en la Empresa “J&J LABORATORIO” y estaban direccionadas a clientes que han realizado al menos un mantenimiento del Sistema de

Inyección CRDi de tercera y cuarta generación con inyectores solenoides. El levantamiento de información se realizó entre los meses de enero y marzo del 2025. La duración de aplicación de la encuesta estaba alrededor de 10 y 15 minutos. Los encuestados fueron reclutados de manera presencial, obteniendo una muestra total de 50 observaciones.

c. Actividad 3: Análisis estadístico de datos

A partir de la información recopilada del cuestionario, se llevó a cabo la tabulación y la creación de gráficos estadísticos. Estos gráficos facilitaron el análisis estadístico de los resultados en términos absolutos y porcentuales. La ilustración y el desglose de estos datos se encuentran en el Capítulo IV, como parte de los resultados de este estudio.

Los gráficos estadísticos empleados para presentar y analizar la información son del tipo de barras verticales y horizontales, como se muestra en el ejemplo de la Fig. 5, y se corresponden con cada una de las preguntas planteadas en el cuestionario.

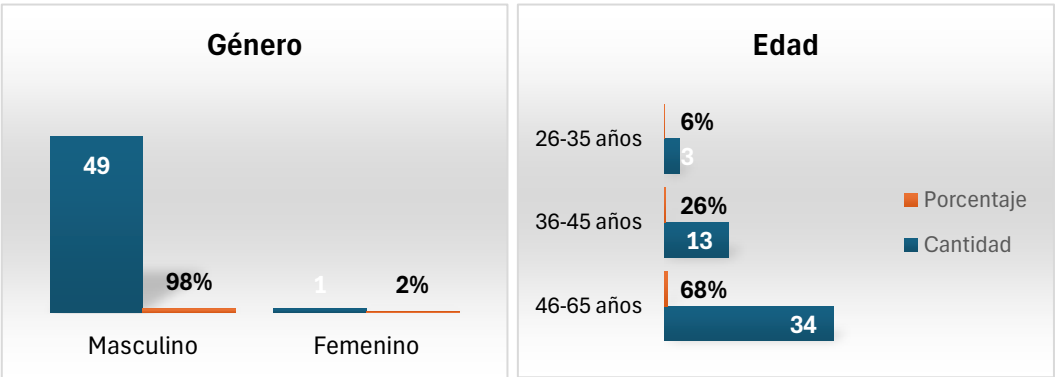


Fig. 5. Gráficos estadísticos tipo barras verticales y horizontales.

3.3.4. Fase 4: Modelo predictivo de mantenimiento del Sistema CRDi

a. Actividad 1: Descripción de variables de estudio

En base a la información obtenida a partir de las encuestas, se obtuvo una base de datos compuesta de variables cualitativas y cuantitativas de modo que facilitó el análisis estadístico y la modelación matemática empleada en la presente investigación. La Tabla 2 resume la descripción de las variables empleadas en el presente trabajo.

Tabla 2. Descripción de las variables empleadas en el estudio

Variable	Descripción	Tipo
ID	Código del encuestado (número de encuesta)	Cuantitativa
Fecha	Fecha cuando se aplicó la encuesta	Cualitativa
Género	Género del encuestado	Cualitativa
Edad	Edad del encuestado	Cuantitativa
Circulación	Cantón o provincia donde circula el encuestado	Cualitativa

Placa	Placa del vehículo	Cualitativa
Marca	Marca del vehículo	Cualitativa
Modelo	Modelo del vehículo	Cualitativa
Tipo	Tipo del vehículo	Cualitativa
Año	Año de fabricación del vehículo	Cuantitativa
Cilindraje	Cilindraje del vehículo	Cuantitativa
Km	Kilometraje actual del vehículo	Cuantitativa
T_Operación	Tipo de operación del vehículo (Público, Comercial o Particular)	Cualitativa
T_Peso	Tipo de peso del vehículo (Liviano o Pesado)	Cualitativa
Peso	Peso del vehículo en toneladas	Cuantitativa
TUM	Tiempo último de mantenimiento del Sistema CRDi	Cuantitativa
TUEC	Tiempo último de escaneo de la computadora	Cuantitativa
Síntomas	Síntomas o molestias previo al mantenimiento del Sistema CRDi	Cualitativa
Diagnóstico	Diagnóstico realizado	Cualitativa
C_Combustible	Si existe o no presencia de óxido/contaminación en el combustible	Cualitativa
P_Defectuosas	Piezas o partes defectuosas	Cualitativa
M_Realizado	Mantenimiento realizado	Cualitativa
P_Corrección	Pieza o partes de cambio	Cualitativa
Costo	Costo del mantenimiento del Sistema CRDi	Cuantitativa

b. Actividad 2: Procesamiento y modelación de datos

Para esta sección se formularon y estimaron Modelos de Elección Discreta. Estos modelos permitieron identificar los factores demográficos del cliente, mecánicos del vehículo y químicos del combustible que influyen en las fallas del Sistemas de Inyección Diésel CRDi. Se evaluaron diversas especificaciones, incorporando casi toda la información de la encuesta como covariables (ver Tabla 2). La probabilidad de elección en los modelos se basa en la estructura de las Ecuaciones (1) y (2) que se detallan a continuación. Todos los modelos fueron estimados en R, utilizando el paquete de modelos de elección Apollo [49].

Los modelos de elección discreta son enfoques desagregados. En términos generales, plantean que *"la probabilidad de elección de una persona está determinada por sus características socioeconómicas y por la atraktividad relativa de las diferentes opciones"* [50]. Estos modelos han sido utilizados de manera extensiva en econometría [51], [52], [53] y en la ingeniería del transporte [54], [55]. La atraktividad es una cantidad latente, llamada utilidad que se modela como variable aleatoria en función de los atributos de la alternativa y características socioeconómicas del tomador de decisiones [56]. La utilidad observable o sistemática V_{jq} se define como una combinación lineal de variables que sigue la estructura de la Ecuación (1).

$$V_{jq} = ASC_j + \sum_k \beta_{jk} X_{jkq}, \quad \forall j \quad (1)$$

Donde cada variable X_{jq} representa un atributo de la alternativa j para el individuo q . Los parámetros β_j son estimadores y representan el impacto del atributo cualitativo X_{jq} sobre el nivel de utilidad sistemática V_{jq} [57]. La constante específica ASC_j de la alternativa j , representa la influencia neta de todas las características no observadas o no incluidas explícitamente del individuo y de la alternativa en su función de utilidad [50]. A la utilidad sistemática, se adiciona un término de error aditivo ε_{jq} , que refleja la ignorancia del modelador tal y como se observa en la Ecuación (2). Dependiendo de la distribución del término de error, se dará origen a distintos modelos probabilísticos de elección discreta basados en la teoría de la utilidad aleatoria [57].

$$U_{jq} = V_{jq} + \varepsilon_{jq}, \quad \forall j \quad (2)$$

Las alternativas son mutuamente excluyentes entre sí (es decir, si se selecciona una alternativa quiere decir que no se escoge la otra, o lo que es lo mismo, consumo x de la alternativa elegida y consumo 0 del resto de alternativas); a esto se le conoce como “discrecionalidad única”, donde la gente evalúa el atractivo de cada alternativa y luego elige la opción que proporciona el mayor nivel de utilidad [57].

3.4. Consideraciones Bioéticas

Para el presente estudio, el levantamiento de información conllevó a la manipulación de combustibles, piezas y equipos/máquinas automotrices, por lo cual se utilizó equipos de protección individual que la empresa “J&J Laboratorio” proporciona a sus empleados. [58]. Adicionalmente se cumplió con el correcto almacenamiento de residuos combustibles en base a la Ley del Medio Ambiente del Ecuador [59].

Finalmente, se solicitó de manera comedida a los clientes su participación en la encuesta, donde se les informó el objetivo y alcance de esta, sin comprometer su identidad.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Composición del combustible diésel en el Ecuador

4.1.1. Caracterización del combustible diésel

El diésel es fundamental para el funcionamiento de varios sectores en Ecuador, abarcando desde el transporte hasta la agricultura. Es el principal combustible que se demanda en el país. Con referencia a la Fig. 6; la producción de diésel en Ecuador ha tenido cambios significativos a lo largo de los años. En 1972, se mantuvo estable en 2,2 millones de barriles por año, pero luego experimentó fluctuaciones, alcanzando un mínimo de 8,9 millones y un máximo de 13,1 millones en 2017; desde entonces, ha mostrado algunas variaciones, llegando a 10,9 millones de barriles en 2023; por otro lado, las importaciones han aumentado de manera constante, pasando de 5,5 millones de barriles en 2000 a 32,2 en 2023, lo que refleja una creciente dependencia del país de recursos externo; en cuanto al consumo nacional, ha crecido de manera constante, con un aumento porcentual del 80,95% desde el año 2000, alcanzando los 38 millones de barriles en 2023, lo que indica una mayor demanda interna en línea con el desarrollo económico del país [60].

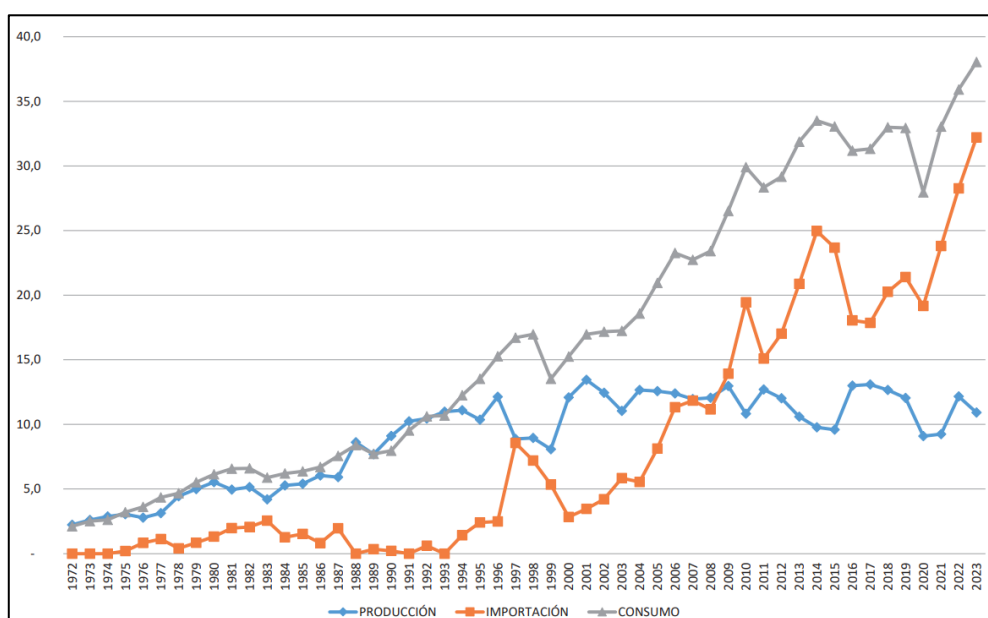


Fig. 6. Producción, importación y consumo nacional de diésel [60].

A nivel mundial, según la Fig. 7, se estima que la mayor parte de la demanda de petróleo se orientará hacia productos como la gasolina y el diésel en las próximas dos décadas. Para 2045, se proyecta que la demanda de gasolina llegará a 28,8 millones de barriles diarios, mientras que la de diésel y gasoil alcanzará los 31,7 millones de barriles, siendo esta última la más alta entre todos los productos petrolíferos mencionados [61].

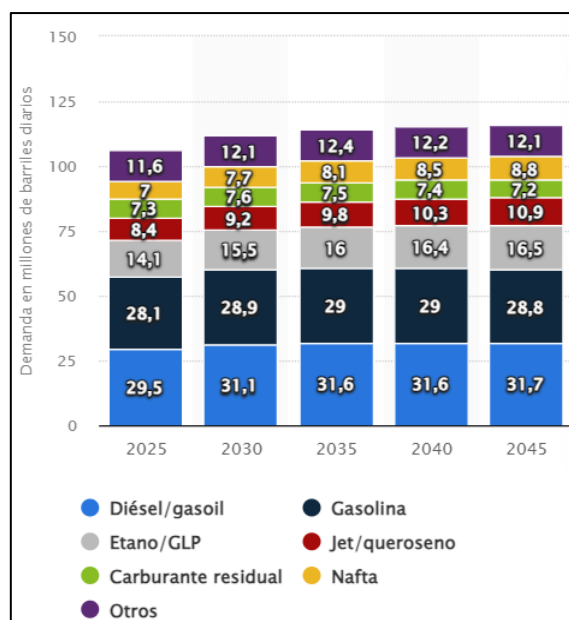


Fig. 7. Demanda diaria mundial de combustibles petrolíferos 2025-2045 [61].

Propiedades físico - químicas de estudio del combustible diésel

El combustible diésel está compuesto principalmente por: Hidrocarburos alifáticos, los cuales constituyen la mayor parte del diésel (75%), incluyendo alcanos y cicloalcanos, cuya estructura permiten una buena combustión y rendimiento energético; hidrocarburos aromáticos, aunque en menor cantidad (25%), su presencia puede influir en las propiedades del combustible, como su estabilidad y emisiones [62]. Además, se compone de otros aditivos que se añaden para mejorar la calidad del combustible, incluyendo mejoradores del índice de cetano y aditivos antienviejecimiento [63].

Su estructura química y propiedades físicas son vitales para el desempeño y fiabilidad de los motores diésel y su efecto en el medio ambiente. Existen propiedades físicas y químicas; por un lado, las físicas son medibles sin afectar la composición química de la sustancia y mientras que las características químicas requieren una reacción química para poder establecer el valor de su propiedad [64]. Las propiedades del combustible diésel más significativas son: retardo al encendido, poder calorífico, volatilidad, punto de inflamabilidad, residuo carbonoso, viscosidad, contenido de azufre, contenido de agua y sedimentos, contenido de cenizas y la densidad [65].

Para el presente trabajo, se consideró como propiedades de estudio: El contenido de azufre y el contenido de agua y sedimentos, con la finalidad de comprobar su incidencia en las fallas del Sistema de Inyección Electrónica CRDi, ya que de acuerdo con la literatura son los componentes que afectan mayormente al Sistema CRDi, tal y como se detalla en la Tabla 3.

Tabla 3. Propiedades de estudio del combustible diésel

Propiedad de Estudio	Descripción
Contenido de agua y sedimentos	Son factores que provocan la corrosión, el desgaste y la obstrucción de los filtros del sistema de inyección, además de generar una combustión irregular y disminuir la lubricidad [64]. Aparecen como resultado de la contaminación del combustible durante el intervalo de tiempo entre el almacenamiento y transporte desde la refinería, hasta depositar el combustible en el tanque del vehículo [66].
Contenido de azufre	Es perjudicial para los componentes de los sistemas de los motores, ya que genera gases tóxicos para el medio ambiente y la salud humana. En los motores diésel, el azufre es una de las principales fuentes del material particulado [66]. Causa desgaste y corrosión en los sistemas de inyección, dañan los inyectores y corroen los anillos, pistones y cilindros, causando deficiencias de inyección de diésel en la cámara de combustión [67]. La acumulación de azufre en los inyectores impone la necesidad de efectuar cambios frecuentes del aceite lubricante del motor para reducir el impacto del dióxido (SO_2) y trióxido de azufre (SO_3), representando mayores costos de mantenimiento y menor tiempo de vida útil [68].

Adicional a lo anterior, se estudia estas propiedades y de manera especial el contenido de agua en el combustible, ya que de manera experimental se presume que el agua en el combustible ocasiona óxido y una coloración amarillenta que incluso puede llegar hasta ocasionar rotura en las partes del sistema de inyección, por ejemplo, la bomba de alta presión (Ver Fig. 8).

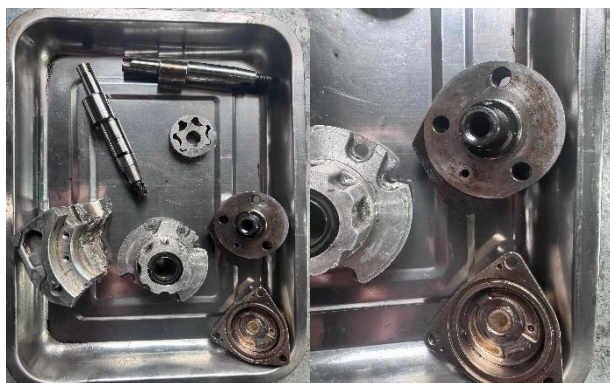


Fig. 8. Afectación del contenido de agua en el combustible.

4.1.2. Regulaciones ambientales

La calidad del combustible diésel está determinada por su origen y la calidad de destilación, lo que a su vez depende de las propiedades físicas y químicas del diésel. En Ecuador, la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2021 establece los requisitos para el Diésel Premium. De manera especial, las regulaciones sobre el **contenido de azufre, agua y sedimentos** representan un avance significativo hacia la sostenibilidad. Ecuador ha establecido regulaciones que restringen el contenido de azufre, agua y sedimentos en el diésel. En la actualidad, se pretende mantener un límite de 0,05 % en

ambas ocasiones de acuerdo con el método de ensayo correspondiente, tal y como se detalla en la Tabla 4. Estas acciones son esenciales para disminuir la contaminación y salvaguardar la salud pública.

Tabla 4. Requisitos del Diésel Premium [69].

Requisito	Unidad	Mínimo	Máximo	Método de Ensayo ^a
Contenido de agua y sedimento	% ^b	--	0,05	ASTM D2709
Contenido de azufre	% ^c ppm ^d	--	0,0450 500	ASTM D2622 ASTM D4294 ASTM D5453

a: Para determinar los requisitos del Diésel Premium, se pueden utilizar cualesquiera de los métodos de ensayo establecido.
b: Corresponde a fracción de volumen expresada en porcentaje.
c: Corresponde a fracción de masa expresada en porcentaje.
d: Corresponde al tipo de unidad (partículas por millón) permitida en la NTE INEN 1489:2012

4.1.3. Composición del combustible diésel en el Ecuador

La composición del combustible diésel en Ecuador es un elemento fundamental para su eficiencia operativa y su efecto en el medio ambiente. Con base en las propiedades analizadas, se describe los resultados obtenidos del ensayo químico experimental empleado para medir el contenido de agua y sedimentos, así como el análisis científico del contenido de azufre.

a. Contenido de agua y sedimentos

En base al Informe Nro. 22-059.1, de fecha 29 de marzo de 2022, suscrito por los responsables técnicos y de calidad del Laboratorio DPEC del Área de Petróleos de la Universidad Central del Ecuador, se determinó el contenido de agua y sedimento básico del combustible diésel premium (muestra propia de “J&J LABORATORIO”), así como se detalla en la Tabla 5.

Tabla 5. Contenido de agua y sedimento básico del diésel premium ecuatoriano [70].

Cliente^a:		William Javier Jácome Collaguazo				
Dirección^a:		Ibarra, La Esperanza				
Tipo de muestra^a:		Diésel Premium				
Descripción de la muestra^a:		Diésel Premium PETROECUADOR 22/03/2022				
Condiciones de la muestra:		Muestra en envase de vidrio ámbar, con tapa				
Fecha de ingreso de muestra:		23 de marzo de 2022				
Código de la muestra:		22-059.1				
Fecha de realización de ensayos:		24 de marzo de 2022				
Condiciones ambientales:		Presión: 544,7 mm Hh; Temperatura: 18,2 °C				
Lugar donde se realizaron los ensayos:		Laboratorio DPEC - Área de Petróleos - Ingeniería Química UCE				
Determinación	Unidad	Método/ Técnica	Resultado	Incertidumbre (k=2)	**Límite Máximo Permisible	Declaración de conformidad ^b

Sedimento Básico y Agua*	%V	ASTM D1796 (Centrifugación - derivados)	0,00	--	0,05 % (máx)	CUMPLE
--------------------------	----	---	------	----	--------------	--------

Nota: Resultados aplican a la muestra entregada por el cliente al DPEC, tal y como se recibió.
* Ensayos no están incluidos en el alcance de acreditación del SAE.
** Límite máximo permisible de acuerdo con la NTE INEN 1489:2021 (Ver Tabla 4).
a: Información proporcionada por el cliente, el laboratorio DPEC no se responsabiliza por esta información.
b: Declaración de conformidad aplicada con base a la normativa.

b. Contenido de azufre

A partir de la revisión bibliográfica y científica, en el Laboratorio de Petróleos de Ingeniería Química de la EPN, se determinó el contenido de azufre en el diésel. Los autores [66], [64], [71], [72], [73] desarrollaron y fundamentaron su análisis experimental en base a las normas ASTM D4294 y sus adecuadas adaptaciones a las normas INEN. En la Tabla 6, se detalla los valores de la propiedad establecida.

Se apreció que en base a la Norma Técnica Ecuatoriana 1489 (Ver Tabla 4), el contenido de azufre del Diésel Premium en Ecuador se encuentra por debajo del límite indicado, sin embargo, es importante detallar que Ecuador es un país donde el contenido de azufre varía de una ciudad a otra [71]. El Diésel que se vende en Guayaquil es de mejor calidad, seguramente porque llega directamente del poliducto Pascuales-Cuenca; mientras que Coca y Quito tienen el peor diésel del país ya que en la literatura se demuestra que se produce en la Refinería de Esmeraldas.

Tabla 6. Contenido de azufre del diésel premium ecuatoriano [64].

Tipo de muestra: Método/Técnica		Diésel Premium ASTM D4294		
Autor o Responsable del Ensayo	Año	Resultado	*Límite Máx Permisible	Declaración de conformidad ^a
Coordinación General Petroecuador	2013	150 ppm ^{Nacional}	500 ppm	CUMPLE
Laboratorio de Petróleos – EPN	2017	180 ppm ^{Nacional}	500 ppm	CUMPLE
AEADE ^b	2020	104,8 ppm ^{Nacional}	500 ppm	CUMPLE
		165 ppm ^{Quito}		
		20 ppm ^{Guayaquil}		
		5079 ppm ^{Coca}		
		158 ppm ^{S.Domingo}		
PETROECUADOR	2022	52 ppm ^{Cuenca}		
LACBAL ^c – EPN	2022	42 ppm ^{Nacional}	500 ppm	CUMPLE
		31,1 ppm ^{Nacional}	500 ppm	CUMPLE
		43,9 ppm ^{Quito}		
		18,4 ppm ^{Guayaquil}		

* Límite máximo permisible de acuerdo con la NTE INEN 1489:2012 (Ver Tabla 4).
a: Declaración de conformidad aplicada con base a la normativa.
b: Asociación de Empresas Automotrices del Ecuador.
c: Laboratorio de Combustibles, Biocombustibles y Aceites Lubricantes

4.2. Nivel de afectación del diésel sobre el Sistema CRDi

4.2.1. Evolución del Sistema CRDi en función de la calidad del combustible

El sistema Common Rail ha evolucionado a lo largo de varias generaciones desde 1995 hasta la actualidad, aumentando las presiones de trabajo, mejorando la atomización del combustible y su control electrónico a través de sensores más precisos [2]. Uno de los objetivos principales de su evolución ha sido dar cumplimiento estricto a las Normativas Internacionales sobre emisiones contaminantes vigentes en Sudamérica [74], [75]. Los motores diésel actuales, necesitan operar con combustibles de buena calidad, otro de los factores que se toma en cuenta para realizar el estudio de la evolución de los sistemas CRDi [75], ya que la calidad de combustible afecta directamente en el funcionamiento del motor y por consecuencia en su desempeño [64].

En la Fig. 9, se detalla la evolución de los motores diésel de acuerdo con sus cambios tecnológicos en el control de emisiones, esto con la finalidad de obedecer a la normativa internacional ambiental. El Sistema de Inyección Directa y Electrónica CRDi de tercera y cuarta generación, conforman la última tecnología de los motores diésel en el control de emisiones.



Fig. 9. Cambios tecnológicos en los motores diésel [76].

En Sudamérica, la calidad del combustible diésel varía según el país, así como las regulaciones ambientales, por lo que en cada nación la generación del sistema de inyección Common Rail será diferente para garantizar un funcionamiento óptimo considerando estos factores.

Grupo	Región	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
Otros mercados	Estados Unidos y Canadá	EPA 2010						
	UE	Euro VI						
	Japón	PNLTES						
	Corea del Sur	Euro V	Euro VI					
	Australia	Euro V/EPA 2007/JE05						
	Rusia	Euro IV		Euro V				
	China	China IV						
	India	Bharata III						
América Latina	México	EPA 2004/Euro IV				EPA 2010/Euro VI		
	Brasil	P-7						
	Argentina	Euro IV		Euro V				
	Chile	Euro IV		Euro V				
	Colombia	Euro II	Euro IV					
	Perú	Euro III						
	Uruguay	Euro III						
	Ecuador	EPA 94/Euro II						
	Costa Rica	Euro I						
	Venezuela	EPA 88/Euro I						
Equivalencia Euro								
Pre-Euro II		II	III	IV	V	VI		

Fig. 10. Cronología de las Normas Euro aplicadas en Sudamérica [77].

En la Fig. 10, se puede apreciar que los países más desarrollados como Estados Unidos, Canadá, Unión Europea, Japón y Corea del Sur, se encuentran en la aplicación de normas internacionales de mejor calidad; mientras que Ecuador, Perú, Uruguay y Venezuela, aún continúan rigiéndose con la Norma Euro III, implementada en el año 2000.

4.2.2. Análisis de afectación del diésel en los Sistemas CRDi.

Con la finalidad de analizar y definir el nivel de afectación del combustible diésel, se partió de la composición química determinada en la Fase 1 y su nivel de afectación correspondiente al contenido de azufre, agua y sedimentos del diésel ecuatoriano.

Tabla 7. Nivel de afectación del diésel en los Sistemas CRDi.

Propiedad de Estudio	Efectos Negativos	Contenido	Calidad Nacional	Principal Afectación Sistema CRDi
Contenido de agua y sedimentos	- Corrosión y desgaste en el sistema de inyección. - Obstrucción de los filtros del sistema de inyección. - Disminuye lubricidad. - Combustión irregular.	0,05 %V	CUMPLE	NO
Contenido de azufre	- Corrosión y desgaste en el sistema de inyección. - Desgaste en el sistema de control de emisiones. - Pérdida de compresión y potencia - Contaminación ambiental. - Principal generador de PM, SO₂ y SO₃. - Afectación a la salud humana.	42 PPM	CUMPLE	NO

Con respecto al contenido de azufre, agua y sedimentos; de acuerdo con los índices de calidad nacional, el diésel ecuatoriano CUMPLE con la normativa legal vigente. Esto posibilita su uso en motores modernos y NO AFECTA su uso en tecnologías sofisticadas como los Sistemas de Inyección Electrónicos CRDi [78]. Sin embargo, es importante considerar la desulfuración debido a que su presencia con el agua, los SO_3 conllevan a la generación de ácido sulfúrico (H_2SO_4), elemento indeseable debido a su alta corrosión de sus compuestos [79]. Por otro lado, en comparación con la Norma Euro 5 y Euro 6, donde se establece el nivel máximo de contenido de azufre (15 ppm y 10 ppm respectivamente), se califica al diésel ecuatoriano como un combustible de MALA CALIDAD, impidiendo el uso de nuevas tecnologías para el tratamiento y reducción de los gases de escape [66], quedando en una posición desfavorable en comparación con países más avanzados en la protección del medio ambiente.

4.3. Modelo estadístico de fallas del Sistema CRDi

Una vez aplicado el levantamiento de información, se procede a detallar el análisis estadístico que arrojó el instrumento de recolección de datos (encuestas). El formato de encuesta se detalla en el Anexo 1.

4.3.1. Descripción general de la muestra

a) Género

El gráfico de barras (Fig. 11), representa la distribución por género de los individuos que realizan mantenimientos del Sistema CRDi en la empresa “J&J LABORATORIO”. Se observa que, del total de 50 encuestas, casi todos, es decir el 98% estuvo caracterizado por el género masculino y tan solo el 2% por el femenino. Esto indica una presencia muy significativa de hombres en el mantenimiento automotriz a lo largo de los últimos años. Aunque la diferencia entre géneros es notable, se espera que con el tiempo la brecha disminuya e indique una mayor atracción por las mujeres hacia la industria automotriz, sobre todo en la responsabilidad del mantenimiento de sus vehículos.

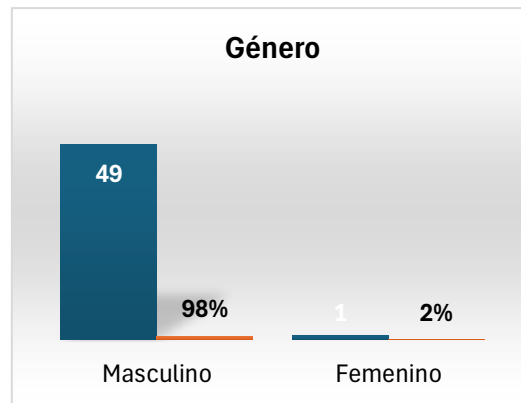


Fig. 11. Género.

b) Edad

Por otro lado, la Fig. 12, muestra la distribución de la población por rangos de edad en el área de estudio. El grupo de 46 a 65 años es el más predominante durante los mantenimientos del Sistema CRDi, con un total de 34 personas, lo que representa aproximadamente el 68% de la población total. Le sigue el grupo de 36 a 45 años (26%) y finalmente el grupo de 26 a 35 años (6%). Los rangos de edades menores a 26 años no muestran presencia en el mantenimiento de sistemas de inyección CRDi dentro del área de estudio. Este patrón sugiere que la edad promedio de participación de los encuestados está entre 49 años. Esto podría reflejar una población experimentada en la industria automotriz.

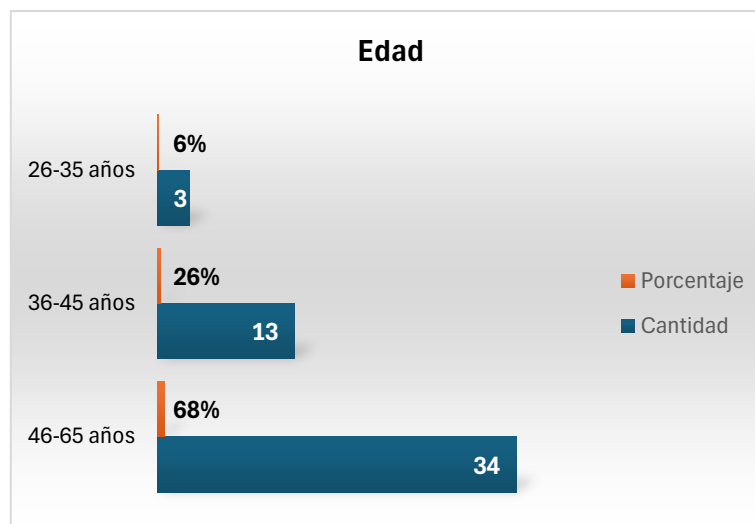


Fig. 12. Edad.

a) Cantón/Provincia de circulación

Respecto al entorno de movilización y área de estudio. De acuerdo con la Fig. 13, el cantón más demandado para la circulación vehicular de automotores con Sistema CRDi

es Ibarra (52%), el 22% representa a cantones que conectan las provincias de Carchi, Imbabura y Pichincha, el 20% indica a cantones de la provincia de Imbabura y finalmente con el 6% se tiene la presencia de cantones de la provincia de Carchi y Pichincha, respectivamente. Esto sugiere que Ibarra tiene el mayor número de vehículos con sistemas de inyección electrónica debido a que pertenece al área de estudio y por ser una de las ciudades más grandes del Norte del Ecuador.

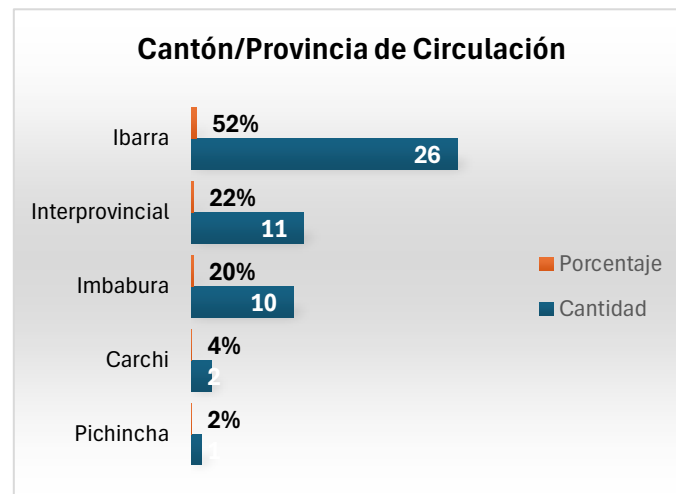


Fig. 13. Cantón y/o provincia de circulación.

4.3.2. Caracterización vehicular de la muestra

a) Marca

La caracterización de acuerdo con la marca de fabricación de los vehículos permitió determinar la marca que mayormente demanda en la flota de automotores durante los mantenimientos del Sistema CRDi en la Empresa “J&J LABORATORIO”. La Fig. 14 indica que la marca de vehículos que mayormente acude al laboratorio es Hino con el 94%, el 6% restante corresponde a Mazda, Sinotruck y Toyota.

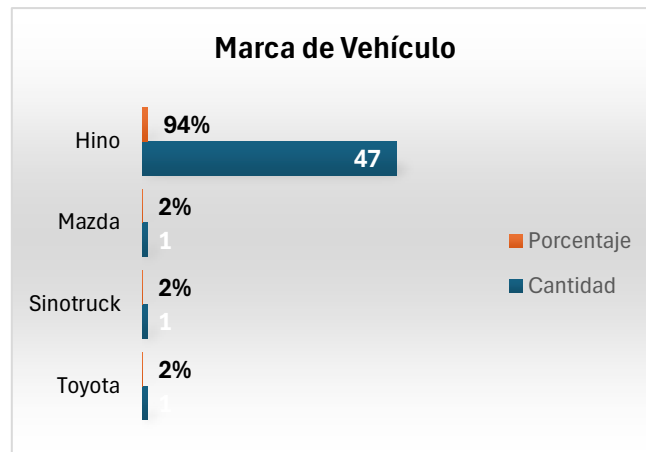


Fig. 14. Marca vehicular.

b) Modelo

Con respecto al modelo vehicular, en la Fig. 15, se puede apreciar que los que mayor influencia tuvieron en el área de estudio, durante los mantenimientos de CRDi fueron los vehículos Hino Ak, con el 90 %. El resto (10%) correspondió a modelos como Mazda BT-50, Hino Dutro, Hino FG, Toyota Hilux y Sinotruck Howo.

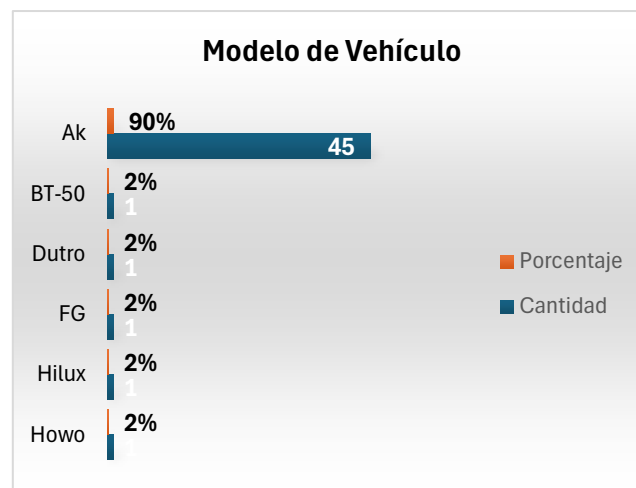


Fig. 15. Modelo vehicular.

c) Tipo

La Fig. 16, determina que en general el Bus con el 92% del total de encuestados, es el tipo de vehículo que mayormente predomina en el área de estudio con respecto al mantenimiento de sistemas CRDi. El resto corresponde a el tipo Camioneta y Camión con el 4% cada uno, respectivamente.

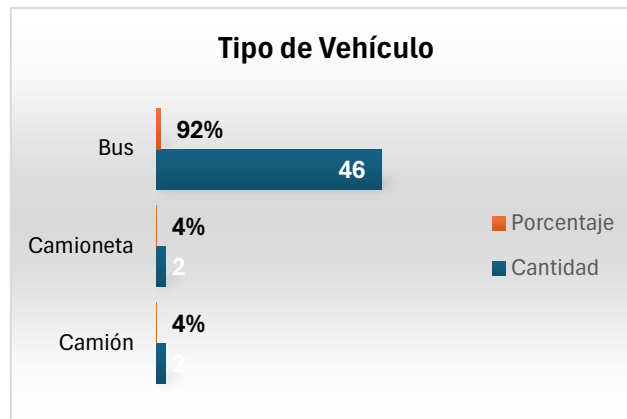


Fig. 16. Tipo de vehículo.

d) Año de fabricación

El análisis de los autobuses según su año de fabricación permitió identificar el año promedio y rangos de años más comunes en la flota de automotores que realizan sus mantenimientos de sistemas CRDi dentro de “J&J LABORATORIO”. Es importante considerar que el año de fabricación de un vehículo afecta el rendimiento del motor, el consumo de combustible y, en consecuencia, el medio ambiente [31]. La Fig. 17, explicaría que dentro del área de estudio existieron vehículos desde el año 2006 hasta el año 2025; sin embargo, la mayor parte de vehículos se encontraron entre los años de 2011 al 2015 (44%) y del 2016 al 2020 (34%). El 16% representa la flota más actual a partir del 2020 y el 6% la flota más antigua entre el 2006 y 2010. A partir de esta información se determinó que el valor promedio del año de fabricación de los automotores fue de 2016.

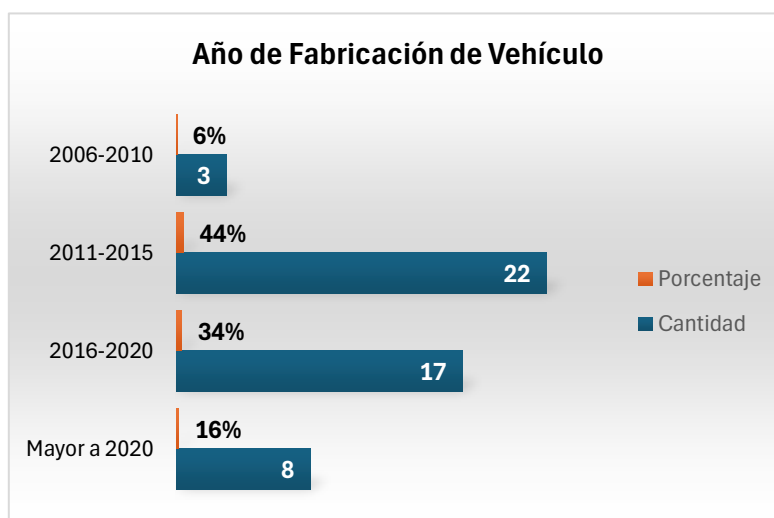


Fig. 17. Año de fabricación vehicular.

e) Cilindraje

La Fig. 18, es un tipo de gráfico útil para visualizar y analizar cómo se distribuyen los vehículos en diferentes categorías de cilindraje, lo que puede ayudar a entender tendencias en el área de estudio con respecto a la prevalencia de motores pequeños, medianos y de mayor rendimiento. El cilindraje promedio de vehículos es de 708.005 centímetros cúbicos y el rango de cilindraje que mayor presencia tiene en los vehículos durante los mantenimientos del sistema CRDi es de Mayor a 5000 cc (92%).

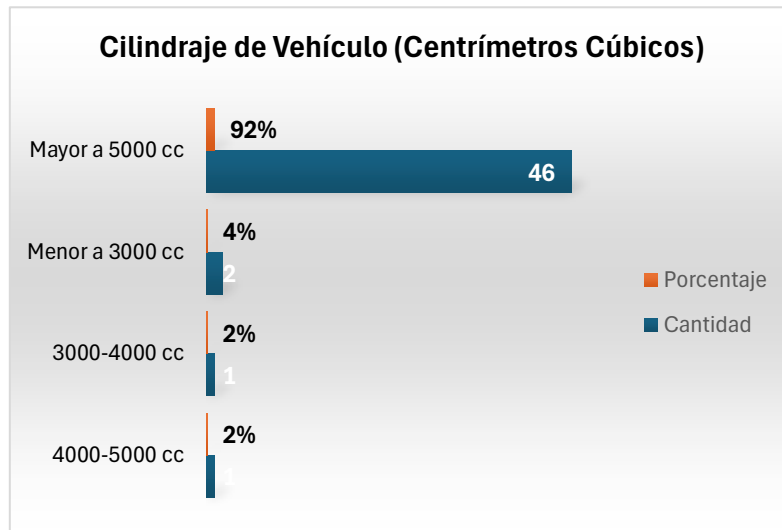


Fig. 18. Cilindraje vehicular.

f) Tipo de peso

Determinar el tipo de peso es fundamental, ya que permite caracterizar el peso y categoría de los vehículos con sistemas CRDi que realizan su mantenimiento en el laboratorio de estudio. Las Fig. 19 y 20, explican que la mayor parte de vehículos que realizan sus mantenimientos del sistema de inyección CRDi son del tipo Pesado (96%) en contraste con la categoría Liviano (4%). Adicional a lo anterior, el peso promedio de los automotores es 8,82 toneladas y el rango de peso con mayor presencia está comprendido entre 7,5 y 10 toneladas.

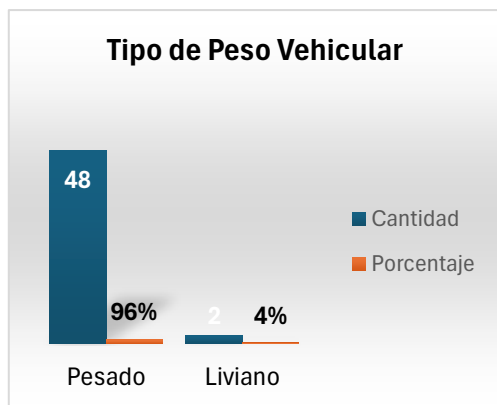


Fig. 19. Tipo de peso vehicular.

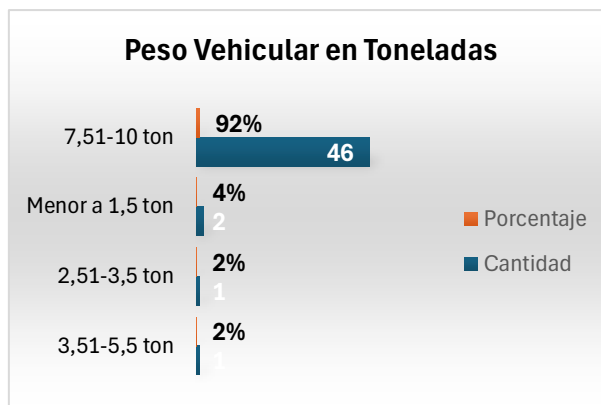


Fig. 20. Peso vehicular.

g) Tipo de operación

El gráfico de barras de la Fig. 21, representa el tipo de operación vehicular o la forma en que se distribuyen los vehículos de acuerdo con el uso o función para el cual están destinados. La mayor parte de vehículos con sistemas de inyección CRDi son de servicio público (82%), seguido a ello el tipo comercial (14%), finalmente los vehículos particulares (4%). Esto define que los buses de servicio público mayormente acuden a realizar los mantenimientos de sistemas de inyección electrónica CRDi en la ciudad de Ibarra.

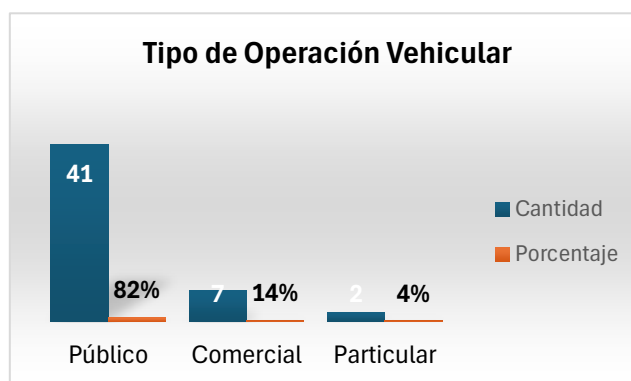


Fig. 21. Tipo de Operación Vehicular.

h) Kilometraje actual

La Fig. 22, presenta el kilometraje actual de los vehículos que han participado en el mantenimiento de su sistema CRDi dentro del área de estudio. El kilometraje actual promedio de la flota es de 708005 km. Del total de encuestado, los mayores rangos de kilometraje recorridos se encuentran entre 700001 y 2000000 Km. En general, el gráfico muestra una distribución variada del kilometraje entre los vehículos, siendo alguno de ellos mucho más utilizados que otros.

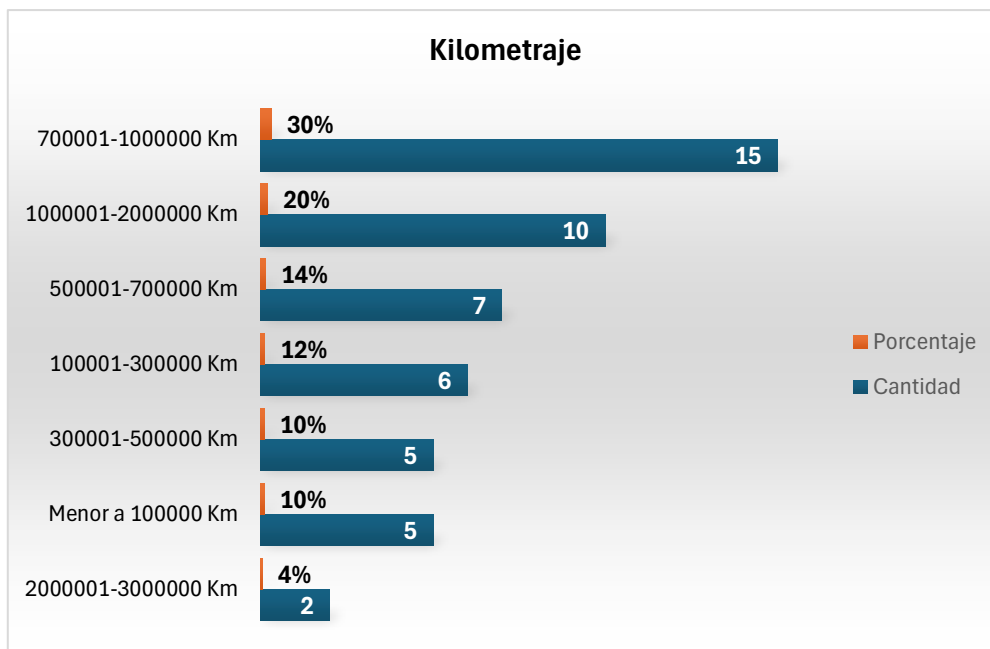


Fig. 22. Kilometraje actual.

4.3.3. Mantenimiento del Sistema CRDi

a) Tiempo último de mantenimiento

El tiempo último de mantenimiento del sistema CRDi es una variable que nos permite determinar el momento óptimo promedio de recorrido al cual los vehículos acuden a realizar sus mantenimientos en la empresa “J&J LABORATORIO”. La Fig. 23, explica que generalmente los vehículos realizan sus mantenimientos del sistema CRDi cada 4 a 6 meses de recorrido (36%). Esto explica la importancia de definir un tiempo moderado para realizar un mantenimiento preventivo y evitar correcciones inesperadas del Sistema de Inyección CRDi.

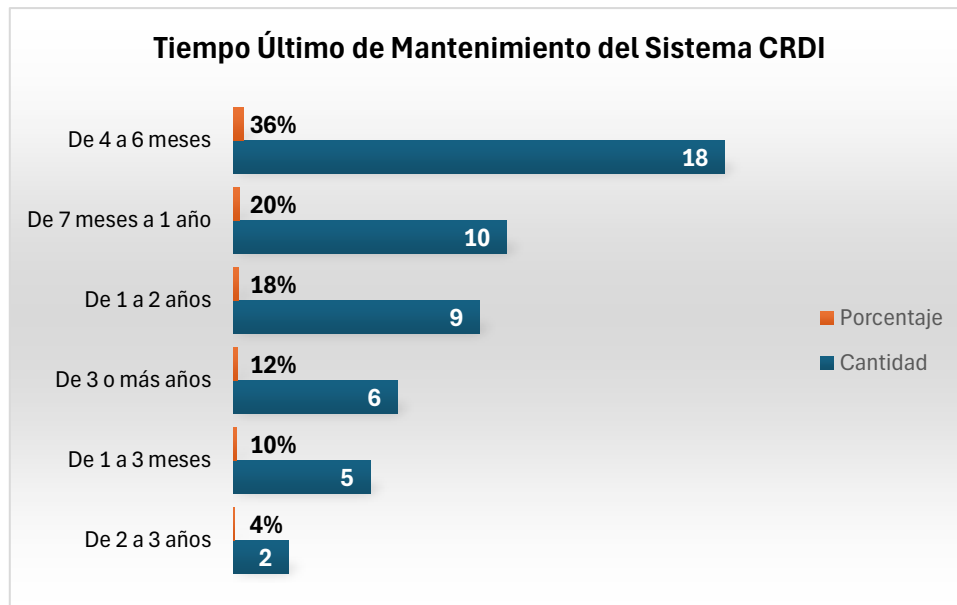


Fig. 23. Tiempo último de mantenimiento del Sistema CRDi.

b) Tiempo último de escaneo de la computadora

Esta variable permite identificar el tiempo promedio de recorrido, en el cual los vehículos que acuden al área de estudio pasan por un chequeo de escáner a sus computadoras. La Fig. 24, explica que generalmente en el laboratorio de estudio, las fallas de los vehículos son tratadas mediante escáner cada 4 meses de recorrido aproximadamente.

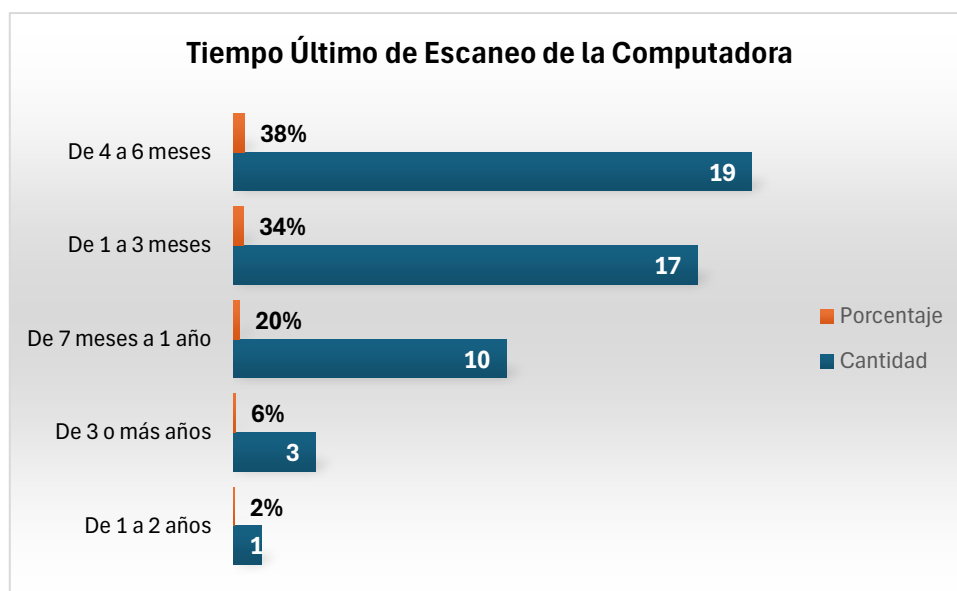


Fig. 24. Tiempo último de escaneo de la computadora.

c) Síntomas previos al mantenimiento

El gráfico de barras correspondiente a la Fig. 25 muestra los síntomas de fallas más comunes de los vehículos previos al mantenimiento del sistema de inyección CRDi.

Generalmente el 67% acude al Laboratorio por algún síntoma o falla en su vehículo, donde, la pérdida de potencia, el exceso de humo negro y el consumo de combustible son las fallas mayormente reportadas (17%). “El motor no enciende” también es un síntoma muy frecuente (12%). Por otro lado, el cascabeleo, recalentamiento, demoras en el encendido y chequeos por algún tipo de reparación en el motor o inyectores solenoides son síntomas menos comunes, pero muy significativos. Por otro lado, solamente el 33% acude al Laboratorio para un mantenimiento preventivo. En general, el gráfico destaca las fallas que requieren mayor atención y preocupación para el mantenimiento preventivo y las reparaciones correctivas de los vehículos.

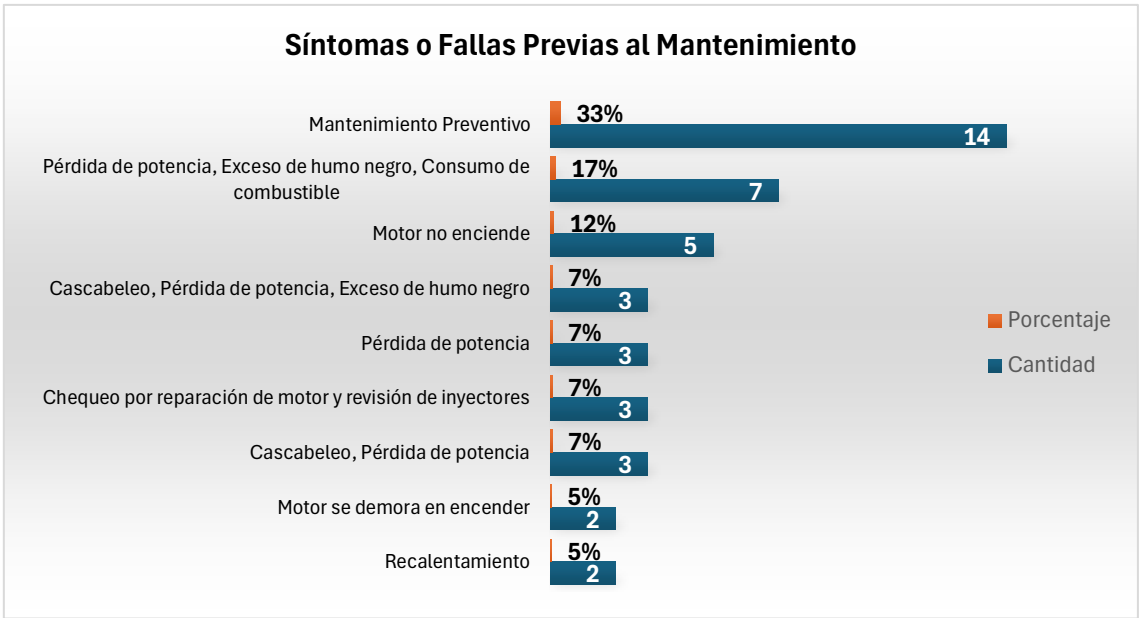


Fig. 25. Síntomas o fallas previas al mantenimiento.

d) Diagnóstico y partes defectuosas

El gráfico de barras correspondiente a la Fig. 26, indica las partes o piezas defectuosas reportadas en los vehículos durante los mantenimientos del sistema CRDi. Con respecto a lo anterior, con el 78%, el inyector resulta ser la pieza que mayormente se encuentra defectuosa durante los mantenimientos, seguido están la bomba de inyección y la válvula sev (8% cada una) y finalmente la bomba de alta presión con el 3% del total de la muestra vehicular. El combinado de todas estas partes defectuosas corresponde al 9%. De manera específica las piezas más afectadas dentro de los inyectores solenoides son: Toberas, microfiltros y válvulas, empaques, etc.

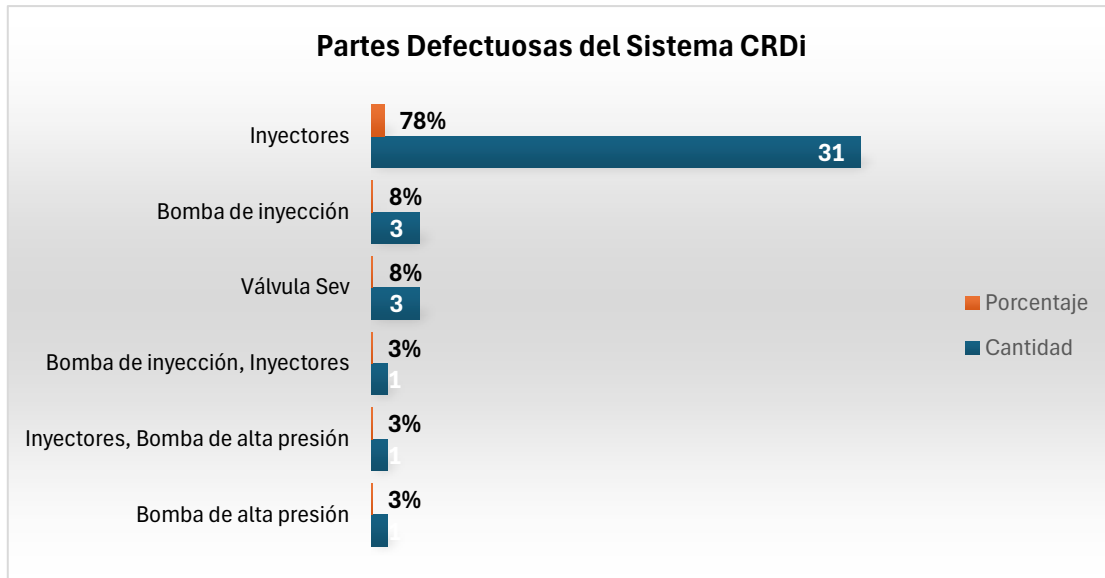


Fig. 26. Partes defectuosas del Sistema CRDi.

e) Contaminación de combustible

La Fig. 27, indica que, del total de la flota vehicular que acude a “J&J LABORATORIO”, con respecto al diagnóstico y mantenimiento realizado, el 44% corresponde a vehículos con presenta contaminación en el combustible, esto en contraste con el 56% que no presenta contaminación. Esto explica, que la contaminación del combustible es significativa, pero no afecta en parte al Sistema de Inyección Electrónica CRDi.

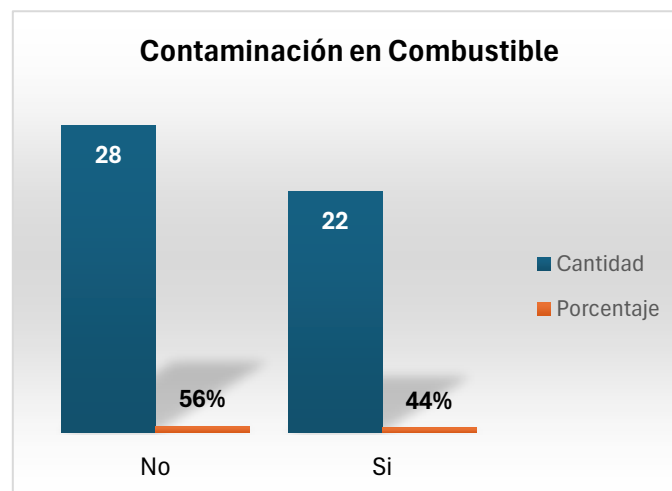


Fig. 27. Contaminación en el combustible.

f) Mantenimiento realizado

Este enfoque permite identificar y destacar de manera detallada, los aspectos claves del mantenimiento realizado en los vehículos. La Fig. 28, afirma que el tipo de mantenimiento más común que se aplica al Sistema CRDi es el correctivo (68%), en contraste con el 32% que corresponde al mantenimiento preventivo.

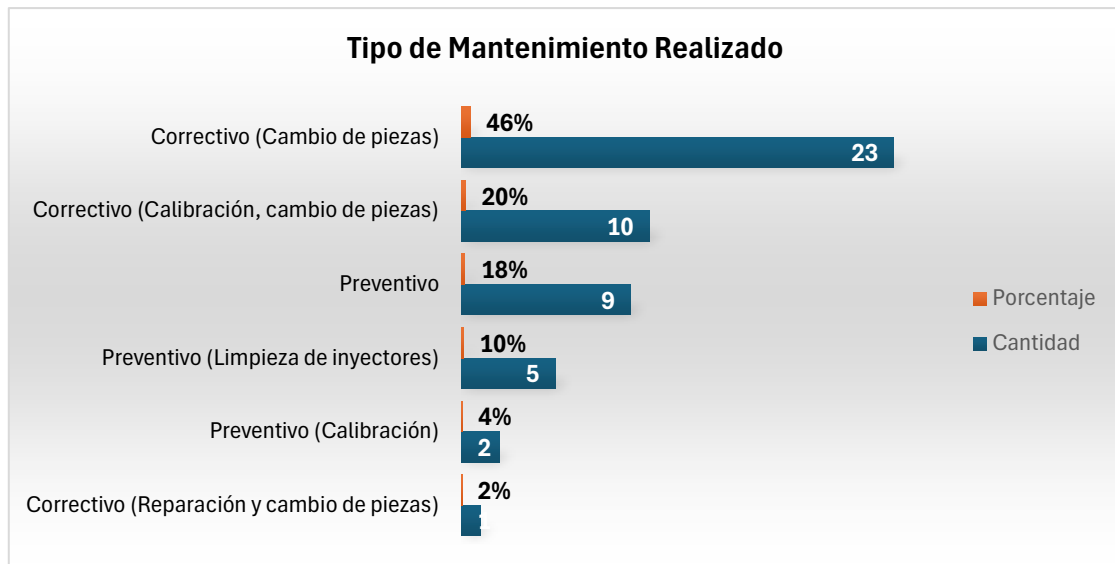


Fig. 28. Tipo de Mantenimiento Realizado

g) Reemplazo de partes o piezas afectadas

Una vez determinado el diagnóstico y mantenimiento de los vehículos en “J&J LABORATORIO”, es importante determinar las partes o piezas que se reemplazan con mayor frecuencia. La Fig. 29, identifica que la parte del sistema CRDi que se reemplaza con mayor frecuencia es el inyector, específicamente los microfiltros, válvulas y toberas (83%), esto en contraste con el 17% que corresponde a otras piezas como la bomba de inyección/alta presión/transferencia, ejes, empaques, chaquetas, válvulas de retorno, entre otras.

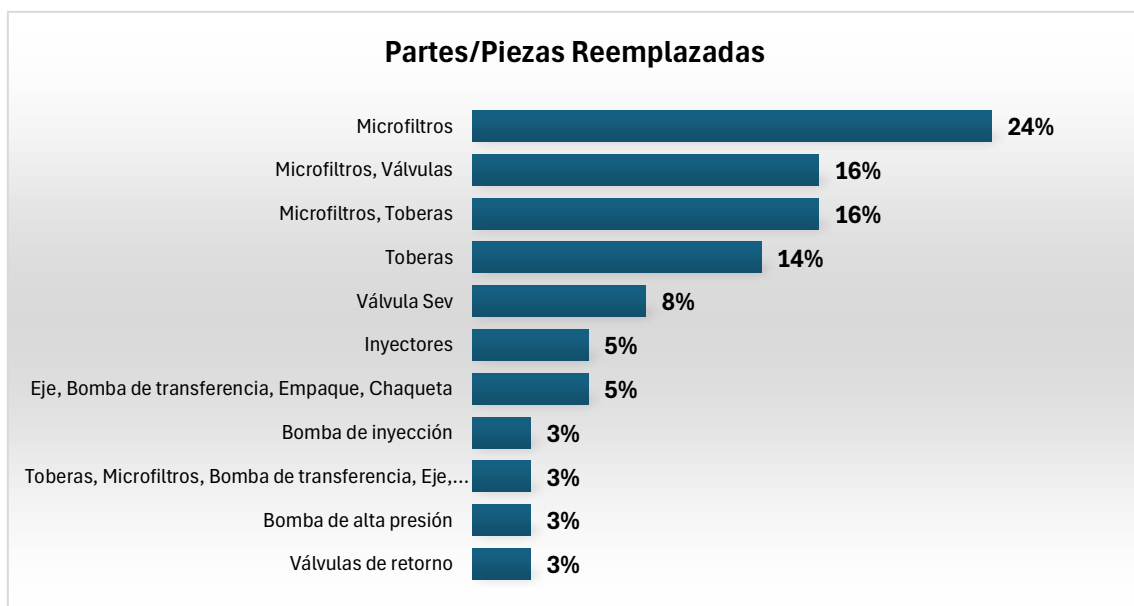


Fig. 29. Partes/piezas reemplazadas.

h) Costo de mantenimiento

El costo de mantenimiento de los vehículos es de gran importancia tanto para los propietarios como para las empresas que gestionan este tipo de trabajo. Realizar un mantenimiento adecuado puede generar ahorros importantes a largo plazo, minimizar riesgos y garantizar un rendimiento óptimo del vehículo. El mayor rango de costos de mantenimientos realizados en “L&L LABORATORIO” está comprendido entre 401 y 700 dólares americanos, lo cual representa el 24% del total de la flota vehicular. Para mayor detalle revisar los costos establecidos en la Fig. 30.

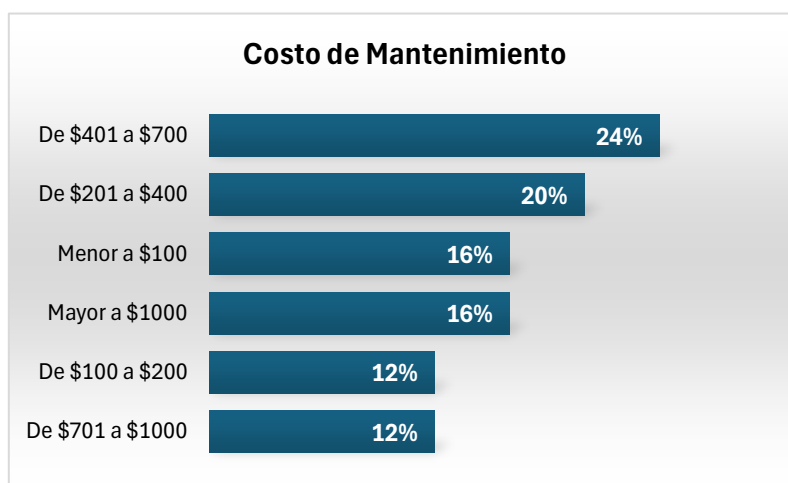


Fig. 30. Costos de mantenimiento.

4.4. Modelo predictivo de mantenimiento del Sistema CRDi

En esta sección, se desarrollaron y estimaron modelos de elección discreta de tipo Logit Binomial - BNL [50]. Estos modelos permitieron identificar las características vehiculares que influyen en la decisión del tipo de mantenimiento y contaminación del combustible para los Sistemas de Inyección CRDi. Se probaron diversas especificaciones, incorporando todas las variables de la encuesta (ver Tabla 1). La estimación se realizó en R utilizando el paquete de modelos de elección Apollo [49] y la probabilidad de elección en los modelos BNL se ajusta a las Ecuaciones (1) y (2), respectivamente, detalladas en la Sección 3.3.4. (literal b) de este documento.

4.4.1. Modelo BNL - Contaminación del Combustible

Se planteó un modelo de elección discreta BNL, donde se define como variable dependiente la contaminación o no del combustible diésel. La Tabla 8 muestra los resultados de la estimación de este modelo. En igualdad de condiciones o considerando que todo permanece constante (*Ceteris Paribus*), durante los diagnósticos realizados en la Empresa “J&J LABORATORIO” las fallas encontradas en el Sistema de Inyección

CRDi, no necesariamente son producto de la contaminación del combustible. Sin embargo, existen marcadas diferencias de la contaminación del combustible diésel en función del kilometraje actual y el tipo de operación que realizan los vehículos. Los signos negativos influyen en la contaminación del combustible. Por un lado, los vehículos con kilometraje mayor a 500000 km son más propensos a tener fallas en el Sistema CRDi debido a la contaminación del combustible, esto en contraste con los de menor kilometraje. De igual manera, aquellos vehículos de transporte comercial o particular presentan mayor probabilidad de que su combustible se encuentre contaminado, a diferencia del transporte público. Esto explica la importancia del control de las entidades gubernamentales al transporte público en la realización de mantenimientos preventivos.

Tabla 8. Modelo BNL (Contaminación del Combustible)

Coefficiente	Estimación	Test t robusto
ASC_Contaminado	Fija	Fija
ASC_No Contaminado	2.675	2.359***
Km actual < 500000 (D)	Fija	Fija
Km actual > 500000 (D)	-2.714	-2.385***
Transporte Público (D)	Fija	Fija
Transporte Comercial (D)	-2.507	-2.286***
# Observaciones = 50		
R-cuadrado ajustado = 0.13		

ASC: Constante específica de la alternativa de elección. D: Variable Dummy.

*** p-valor < 0.01 (+ significativo); ** p-valor < 0.05; * p-valor < 0.10

4.4.2. Modelo BNL - Tipo de Mantenimiento en función del Km

Para esta sección, se planteó un modelo de elección discreta BNL, que busca encontrar las variables vehiculares que influyen en la elección del transportista sobre el tipo de mantenimiento a realizar, ya sea preventivo o correctivo. De acuerdo con la Tabla 9, Ceteris Paribus, los conductores están conscientes de que para evitar fallas en el Sistema de Inyección CRDi, acuden al laboratorio para chequeos preventivos, aunque no es significativo, es decir que también esperan a tener fallas para acudir de manera correctiva. Con respecto a las covariables que influyen para realizar los tipos de mantenimientos, el signo positivo explica la inclinación por el mantenimiento correctivo. Por lo general, aquellos que han recorrido más de 500000 km, acuden al taller por mantenimiento correctivo, de igual manera lo hacen aquellos que su tipo de operación es comercial o particular. Esto explica la importancia de realizar mantenimientos preventivos constantemente para evitar complicaciones a futuros, tal y como se refleja en el transporte público, o aún más significativo en aquellos que no han alcanzado los 500000 km de recorrido.

Tabla 9. Modelo BNL (Tipo de Mantenimiento)

Coefficiente	Estimación	Test t robusto
ASC_Preventivo	Fija	Fija
ASC_Correctivo	-0.6192	-1.001*
Km actual < 500000 (D)	Fija	Fija
Km actual > 500000 (D)	1.6566	-2.281***
Transporte Público (D)	Fija	Fija
Transporte Comercial (D)	2.2053	1.914**
# Observaciones = 50		
R-cuadrado ajustado = 0.12		
ASC: Constante específica de la alternativa de elección. D: Variable Dummy.		
*** p-valor < 0.01 (+ significativo); ** p-valor < 0.05; * p-valor < 0.10		

4.4.3. Modelo BNL - Tipo de Mantenimiento en Función del TUM

Finalmente, se planteó un modelo de elección discreta BNL, que busca encontrar la influencia que tiene el tiempo último de mantenimiento (TUM) en la elección del tipo de mantenimiento. De acuerdo con los detalles del modelo en la Tabla 10, el tiempo último de mantenimiento realizado no tiene significancia en la elección del tipo de mantenimiento, sin embargo, se determinó que los transportistas vienen realizando sus mantenimientos preventivos pasado los 5 meses y esto explica la existencia de fallas en el Sistema de Inyección CRDi. En tal sentido, para reducir y evitar gastos mayores a futuro, se recomienda que el momento óptimo para realizar un mantenimiento predictivo es cada 5 meses aproximadamente.

Tabla 10. Modelo BNL (Tipo de Mantenimiento)

Coefficiente	Estimación	Test t robusto
ASC_Preventivo	Fija	Fija
ASC_Correctivo	-0.4055	-0.4397*
TUM < 3 meses (D)	Fija	Fija
TUM entre 3 y 5 meses (D)	1.2164	1.1018*
TUM > 5 meses (D)	1.3437	1.3383*
# Observaciones = 50		
R-cuadrado ajustado = 0.03		
ASC: Constante específica de la alternativa de elección. D: Variable Dummy.		
*** p-valor < 0.01 (+ significativo); ** p-valor < 0.05; * p-valor < 0.10		

CONCLUSIONES

La presente investigación contribuye a comprender la importancia de definir el momento óptimo para realizar un mantenimiento predictivo en los Sistemas de Inyección Electrónica, a fin de evitar su desgaste y reparación a futuro. Esto debido a que es uno de los sistemas del vehículo con mayor importancia; su cuidado ayuda a mejorar la eficiencia del vehículo en consumo de combustible y emisiones de gases de escape luego de la combustión.

De manera experimental y mediante investigación científica, el combustible diésel del Ecuador CUMPLE con los parámetros establecidos en la Normativa Legal Vigente con respecto al contenido de azufre, agua y sedimentos, por lo cual, no es un factor mayormente determinante en el desgaste de los sistemas CRDi, sin embargo, en comparación con la Norma Euro 5 y Euro 6, se califica al diésel ecuatoriano como un combustible de MALA CALIDAD, quedando en una posición desfavorable en comparación con países más avanzados en la protección del medio ambiente.

La Empresa “J&J LABORATORIO” atiende vehículos con Sistema CRDi de tercera y cuarta generación con inyectores solenoides, que circulan principalmente en las provincias de Imbabura, Carchi y Pichincha. En general, acuden al taller vehículos pesados de más de 7 toneladas, con años de fabricación principalmente entre 2010 y 2020 y el tipo de vehículo más demandado es el Bus Hino Ak de servicio público con cilindraje mayor a 5000 cc. El kilometraje actual promedio de la flota es de 700000 km.

La pérdida de potencia, el consumo de combustible, el exceso de humo negro, la demora de encendido, el cascabeleo y el recalentamiento, son las principales fallas que conllevan a las reparaciones de los sistemas de inyección. A su vez, los inyectores solenoides, la bomba de alta presión, la bomba de inyección, y válvulas son sus principales componentes que presentan fallas constantemente.

En promedio los vehículos realizaron su último mantenimiento vehicular y escaneo de la computadora hace 16 y 10 meses, respectivamente y el tipo de mantenimiento más común que se aplica al Sistema CRDi dentro del área de estudio es el correctivo. Esto sugiere la necesidad de incentivar a los conductores para que sus vehículos sean atendidos de

manera preventiva, lo que ayudaría a reducir la necesidad de reparaciones correctivas, prevenir fallas mayores y optimizar los costos de mantenimiento.

Los vehículos con kilometraje mayor a 500000 km son más propensos a tener fallas en el Sistema CRDi debido a la contaminación del combustible y a su vez son aquellos que acuden al taller cuando se presentan fallas en sus vehículos. Por otro lado, a diferencia del transporte comercial y particular, el transporte público es aquel que acude mayormente al taller con el fin de realizar un mantenimiento preventivo y en su efecto este tipo de vehículo presenta menos probabilidad de que su combustible se encuentre contaminado.

RECOMENDACIONES

El tiempo último de mantenimiento realizado no tiene significancia en la elección del tipo de mantenimiento, sin embargo, se determinó que los transportistas vienen realizando sus mantenimientos preventivos pasado los 5 meses y esto explica la existencia de fallas en el Sistema de Inyección CRDi. En tal sentido, para reducir y evitar gastos mayores a futuro, se recomienda que el momento óptimo para realizar un mantenimiento predictivo es cada 5 meses aproximadamente, propuesta que puede aplicarse de manera general a otros talleres/laboratorios automotrices.

Se recomienda comercializar en el país un diésel premium de bajo contenido de azufre, menor a 50 ppm, lo cual es factible para la implementación de nuevas tecnologías enfocadas en la reducción emisiones contaminantes y material particulado. Adicional a esto es importante analizar otros componentes del combustible para determinar su nivel de afectación en los Sistemas de Inyección CRDi.

Se recomienda para futuras investigaciones añadir nuevos conocimientos no sólo sobre los determinantes que influyen en la contaminación del combustible o en el tiempo de mantenimiento, sino también sobre ciertas percepciones o factores latentes que sean útiles en los tiempos y kilometrajes de mantenimiento que realizan los conductores referentes al Sistema de Inyección CRDi.

Finalmente, este trabajo de titulación ofrece una visión general que puede servir como base para futuras investigaciones en el campo de los Sistemas de Inyección Electrónica CRDi y sus planes de mantenimiento predictivo.

REFERENCIAS

- [1] C. Mata, V. Rojas-Reinoso y J. A. Soriano, «Experimental determination and modelling of fuel rate of injection: A review,» *Fuel*, vol. 343, p. 127895, 2023.
- [2] D. A. Garrido y V. H. Alvarez, «Estudio de la Evolución de los CRDI (Common Rail Direct Injection) en Función del Combustible en Sudamérica,» *Universidad Internacional del Ecuador*, p. 68, 2016.
- [3] Bosch, «Sistemas de Inyección Diésel,» 2022. [En línea]. Available: https://www.superprofesionalesbosch.com/plataforma/pluginfile.php/21065/mod_resource/content/12/Sistemas%20de%20Inyecci%C3%B3n%20Diesel.pdf.
- [4] L. Navarrete , M. Román , E. Llanes, N. Barreno, S. Mena y J. Rocha, «Estudio de rugosidad por análisis de Fourier de las toberas de inyectores en sistemas de riel común CRDI,» *Revista chilena de Ingeniería* , 2017.
- [5] D. Almarza, Descripción y Mantenimiento del Sistema Common Rail Montado en el Motor Hyundai D4EA, Rey Balduino de Bélgica: Universidad Técnica Federico Santa Maria, 2018.
- [6] K. Cai, Wang, Y. y S. Lu, «Research on Optimization Design of Injection Mold for Automobile Filter Shell Model Based on BP Neural Network,» *IOP Conference Series Materials Science and Engineering*, vol. 3, n° 612, p. 032014, 2019.
- [7] C. Mafla-Yépez, C. Castejón, H. Rubio y C. Morales, «A Vibration Analysis for the Evaluation of Fuel Rail Pressure and Mass Air Flow Sensors on a Diesel Engine: Strategies for Predictive Maintenance,» *Sensors*, vol. 24, n° 5, p. 1551, 2024.
- [8] L. Xu, S. Xu, X.-S. Bai, J. Repo, S. Hautala y J. Hyvönen, «Performance and emission characteristics of an ammonia/diesel dual-fuel marine engine,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 185, p. 113631, 2023.
- [9] M. Badami, P. Nuccio y G. Trucco, «Influence of injection pressure on the performance of a DI diesel engine with a common rail fuel injection system,» *SAE 1999-01-0193*, pp. 1-13, 1999.
- [10] T. Balusamy y M. Marappan, «Effect of Injection Time and Injection Pressure on CI Engine Fuelled with Methyl Ester of Thevetia Peruviana Seed Oil,» *International Journal of Green Energy*, vol. 7, pp. 397-409, 2010.
- [11] A. Minato, T. Tanaka y T. Nishimura, «Investigation of premixed lean diesel combustion with ultra high pressure injection,» *SAE 2005-01-0914*, pp. 1-11, 2005.
- [12] J. I. Villanueva, C. Ponce y J. Zahr, Detección de fallas en sistema de inyección de un motor diésel, a través del análisis de vibraciones torsionales en el eje cigüeñal, Valparaíso: Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, 2020, pp. 128-133.

- [13] T. B. Nadeem, «Mechanical Injection Systems,» Ned University Of Engineering & Technology, 2024.
- [14] F. I. Arizaga y P. F. Torres, Diseño de un Simulador para Diagnóstico de Bombas CRDI e Implementación en un Banco de Pruebas HARTRIDGE de Bombas Convencionales, Cuenca: Universidad Politécnica Salesiana, 2014.
- [15] A. Norman y J. Corinchock, Diesel Technology, Seventh ed., The Goodheart-Wilcox Company, 2007.
- [16] M. Bielecki, Z. Kryszewski, J. Sawicki y Z. Moczulski, «Electrohydraulic Injector for a Diesel Engine Control System,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. 13, nº 2, pp. 157-162, 1980.
- [17] A. Castillejo, Sistemas de Inyección en Motores Diesel, Sevilla: Universidad de Sevilla, 2014.
- [18] R. Payri, G. Hardy, J. Gimeneo y A. Bautista, «Analysis of counterbore effect in five diesel common rail injectors,» *Experimental Thermal and Fluid Science*, vol. 107, pp. 69-78, 2019.
- [19] A. Fernández, Gestión de Mantenimiento: Lean Maintenance y TPM, Oviedo: Universidad de Oviedo, 2018.
- [20] H. Abdulla, A. Sleptchenko y A. Nayfeh, «Photovoltaic systems operation and maintenance: A review and future directions,» *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 195, p. 114342, 2024.
- [21] A. P. Talayero, M. J. J. L. A. y A. Casado, «Operation and maintenance in solar plants: Eight study cases,» *Renewable Energy and Power Quality Journal*, vol. 1, nº 16, pp. 499-504, 2018.
- [22] C. P. Alarcón, Mantenimiento de Maquinaria, Cuenca: Conagopare, 2020.
- [23] L. Dong, Q. Xiao, Y. Jia y T. Fang, «Review of research on intelligent diagnosis of oil transfer pump malfunction,» *Petroleum*, vol. 9, nº 2, pp. 135-142, 2023.
- [24] A. F. Vallejo, Sistemas de Inyección Diésel Electrónico, para Servicio Automotriz Pesado. Principio de Funcionamiento, Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2013.
- [25] G. Sharma, A. Kumar y S. Singh-Gill, «Chapter 4 - Applications of blockchain in automated heavy vehicles: Yesterday, today, and tomorrow,» *Autonomous and Connected Heavy Vehicle Technology*, pp. 81-93, 2022.
- [26] M. Rafael y A. Hernández, Caracterización de un motor de combustión interna con dos tipos de combustible, Sanfandila: Instituto Mexicano del Transporte, 2014.

- [27] S. Turns, *An Introduction to Combustion*, Third ed., The Pennsylvania State University, 1996.
- [28] P. Luna y J. Mier, *Medición y Evaluación de los Niveles de Opacidad Generados por los Vehículos con Motor de Combustible Diésel*, Quito: Universidad Internacional de Ecuador, 2014.
- [29] M. A. Betiha, A. M. Rabie, H. S. Ahmed, A. A. Abdelrahman y M. F. El-Shahat, «Oxidative desulfurization using graphene and its composites for fuel containing thiophene and its derivatives: An update review,» *Egyptian Journal of Petroleum*, vol. 27, nº 4, pp. 715-730, 2018.
- [30] E. Kates y W. Luck, *Motores diésel y de gas de alta compresión*, España: Reverté, S.A., 2003.
- [31] J. A. Ramírez, *Análisis de las características cinemáticas de las rutas de autobuses urbanos de Ibarra*, Ibarra: Universidad Técnica del Norte, 2018.
- [32] J. G. Speight, «Fuels | Oil-Based,» *Encyclopedia of Analytical Science (Third Edition)*, pp. 97-106, 2019.
- [33] U. Zanusso, J. Fabro, I. Luzzo y F. Cirilli, «Special Issue on ‘Overview, state of the art, recent developments and future trends regarding Hydrogen route for a green steel making process’, edited by Ismael Matino and Valentina Colla,» *Matériaux & Techniques*, vol. 109, nº 4, pp. 1-11, 2021.
- [34] C. Erazo, *Diagnóstico de motores diésel mediante análisis de emisiones de gases*, Guayaquil: Universidad Politécnica Salesiana, 2022.
- [35] Insst, *Emisiones de Motores Diésel*, España: Insituto Nacional de Seguridad y Salud en el Trabajo, 2023.
- [36] C. García, J. Molina, J. Segnini, M. Vergara y N. Rivera, *Análisis de la contaminación por fallas de un motor diésel utilizando termigrafía*, Ibarra: Pontificia Universidad Católica de Ecuador, 2018.
- [37] U. Ackermann-Liebrich, «Respiratory and Cardiovascular Effects of NO₂ in Epidemiological Studies,» *Encyclopedia of Environmental Health*, pp. 840-844, 2011.
- [38] X. Pan, «Sulfur Oxides: Sources, Exposures and Health Effects,» *Encyclopedia of Environmental Health*, pp. 290-296, 2011.
- [39] S. Henningsen, «Chapter 14 - Air Pollution from Large Two-Stroke Diesel Engines and Technologies to Control It,» *Handbook of Air Pollution From Internal Combustion Engines*, pp. 477-534, 1998.
- [40] CRE, *Constitución de la República del Ecuador*, Quito: Gobierno de la República del Ecuador, 2008.

- [41] NDC-Ecuador, Primera Contribución Determinada a Nivel Nacional para el Acuerdo de París bajo la Convención Marco de Naciones Unidas sobre Cambio Climático, Naciones Unidas, 2019.
- [42] LOTTTSV, Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial, Quito: Gobierno de la República del Ecuador, 2021.
- [43] RLOTTTSV, Reglamento a la Ley Orgánica de Transporte Terrestre, Tránsito y Seguridad Vial, Quito: Gobierno de la República del Ecuador, 2012.
- [44] ANT, Reglamento Relativo a los Procesos de la Revisión Técnica de Vehículos a Motor, Quito: Agencia Nacional de Tránsito, 2012.
- [45] INEN, NTE INEN 2207. Gestión Ambiental. Aire. Vehículos Automotores. Límites Permitidos de Emisiones Producidas por Fuentes Móviles Terrestres que Utilizan Diésel, Quito: Servicio Ecuatoriano de Normalización INEN, 2016.
- [46] «Google Maps: Ubicación Geográfica "J&J LABORATORIO",» Octubre 2024. [En línea]. Available: https://www.google.com/maps/place/0%C2%B020'45.7%22N+78%C2%B007'40.5%22W/@0.3457747,-78.1305951,17z/data=!4m4!3m3!8m2!3d0.3460278!4d-78.1279167?hl=es&entry=tту&g_ep=EgoyMDI0MTAwMS4wIKXMDS0ASAFQAw%3D%3D.
- [47] R. Hernández, C. Fernández y P. Baptista, Metodología de la Investigación, McGRAW-HILL / Interamericana Editores S.A. DE C.V., 2014.
- [48] American society for testing and materials, «ASTM D4294: Standad Test Method for Sulfur in Petroleum and Petroleum Products by Energy-Dispersive X-Ray Fluorescence Spectrometry,» 1998.
- [49] S. Hess y D. Palma, «Apollo: A flexible, powerful and customisable freeware package for choice model estimation and application.,» *Journal of Choice Modelling*, vol. 32, 2019.
- [50] J. d. D. Ortúzar y L. G. Willumsen, «Modelling Transport, Fourt Edition.,» 2011.
- [51] L. Johnson y D. Hensher, «Application of multinomial probit to a two-period panel data set.,» *Transportation Research Part A: General*, vol. 16, nº 5-6, pp. 457-464, 1982.
- [52] R. D. Luce y P. Suppes, «Preference, Utility, and Subjectiue Probability.,» *Handbook of Mathematical Psychology*, vol. 171, pp. 249-410, 1965.
- [53] C. F. Manski y D. L. McFadden, «Alternative Estimators and Sample Designs for Discrete Choice Analysis.,» *Structural Analysis of Discrete Data and Econometric Applications*, pp. 2-50, 1981.

- [54] Ben-Akiva y M. Bierlaire, «Discrete choice methods and their applications in short term travel decisions.,» *Handbook of Transportation Science*, 1999.
- [55] Ben-Akiva y S. R. Lerman, «Discrete Choice Analysis: Theory and Application to Travel Demand.,» *Journal of the Operational Research Society*, vol. 38, nº 4, pp. 370-371, 1987.
- [56] G. Antoniti, M. Bierlaire y M. Weber, «Discrete choice models of pedestrian walking behavior.,» *Transportation Research Part B: Methodological*, vol. 40, nº 8, pp. 667-687, 2006.
- [57] J. Ramírez, Efectos de las Medidas para Mitigar la Propagación del Covid-19 en las Decisiones de Viaje y Uso del Tiempo en Ecuador., Barranquilla: Universidad del Norte, 2021.
- [58] J. Cañada, I. Díaz, J. Medina, M. Puebla, J. Mata y M. Soriano, Manual para el Profesor de Seguridad y Salud en el Trabajo, Barcelona: Universidad de Córdoba, 2018.
- [59] Ley de Gestión Ambiental, Codificación, Quito: Gobierno de la República del Ecuador, 2004.
- [60] AIHE, El Petróleo en Cifras 2023, Quito: Asociación de la Industria Hidrocarburífera del Ecuador, 2024.
- [61] R. Fernández, «Statista: Volumen de la demanda diaria mundial de gasolina y otros productos petrolíferos de 2025 a 2045,» 19 Julio 2024. [En línea]. Available: <https://es.statista.com/estadisticas/636189/demanda-mundial-de-productos-petroliferos-a-nivel-mundial/>.
- [62] M. Huth y A. Heilos, «14 - Fuel flexibility in gas turbine systems: impact on burner design and performance,» *Modern Gas Turbine Systems*, pp. 635-684, 2013.
- [63] Y. Zvirin, M. Gutman y L. Tartakovski, «Chapter 16 - Fuel Effects on Emissions,» *Handbook of Air Pollution From Internal Combustion Engines*, pp. 547-651, 1998.
- [64] C. R. Gómez y L. M. Vargas, Medición y evaluación de las emisiones de material particulado y opacidad en una flota de vehículos con motor ciclo diésel, utilizando una mezcla de diésel con 20% de queroseno, Quito: Universidad Politécnica Nacional, 2017.
- [65] E. J. Kates y W. E. Luck, Motores Diesel y de gas de alta compresión, Sevilla: Reverté, S. A., 1982.
- [66] C. I. Eugenio y F. J. Montalvo, Evaluación del comportamiento y emisiones en un motor de combustión interna utilizando una mezcla diésel-queroseno, Quito: Universidad Politécnica Nacional, 2016.

- [67] EPA, National air quality and emissions trends report, Environmental Protection Agency, 2007.
- [68] EADIC, Contaminación ambiental por NOx: Influencia de edad de los vehículos, 2015.
- [69] INEN, Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 1489:2021, Quito: Servicio Ecuatoriano de Normalización, 2021.
- [70] DPEC, «Informe Nro. 22-059.1: Determinación del contenido de agua y sedimento básico del diésel premium de Ecuador en base a una muestra propia tomada en la empresa "J&J LABORATORIO",» Laboratorio DPEC - Área de Petróleos de la Universidad Central del Ecuador, Quito, 2022.
- [71] AEADE, «Motor Terra: El diésel en Ecuador contamina cinco veces más que el combustible de otros países,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.motorterra.com/el-diesel-en-ecuador-contamina-cinco-veces-mas-que-el-combustible-de-otros-paises/>.
- [72] W. J. Eras y I. D. Mejía, Incidencia del contenido de azufre en las emisiones contaminantes en un vehículo encendido por compresión con sistema de inyección CRDI, Quito: Universidad Politécnica Nacional, 2022.
- [73] EP PETROECUADOR, «EP PETROECUADOR: Combustibles con menos contenido de azufre de lo que establece la NTE,» 2020. [En línea]. Available: <https://www.eppetroecuador.ec/?p=12484>.
- [74] J. Rueda, Normatividad de Emisiones Euro IV y V del proceso de la combustión de un motor diésel resultan diferentes tipos de gases, algunos de estos son nocivos para el medio ambiente.
- [75] MundoDiario, «Los motores Diesel son muy vulnerables al uso de combustibles de mala calidad,» [En línea]. Available: <http://www.mundidiario.com/articulo/economia/motores-diesel-son-extraordinariamente-vulnerables-uso-combustibles-mala-calidad/20140628182049019726.html>.
- [76] M. Bosque, Tendencias Globales para el Combustible Diesel, Seminario Ccombustible II. DIésel y Tecnología a favor de la Salud, 2009.
- [77] R. Segura, «Revista Transportes y Turismo: El Camino hacia un transporte limpio y eficiente es la regulación de emisiones,» 8 Octubre 2015. [En línea]. Available: <https://www.tyt.com.mx/nota/el-camino-hacia-un-transporte-limpio-y-eficiente-la-regulacion-de-emisiones>.
- [78] K. O. Blumberg, M. P. Walsh y C. Pera, Gasolina y diesel de bajo azufre: La clave para disminuir las emisiones vehiculares, Fundación Hewlett, 2003.

- [79] D. A. Martínez, V. H. Páramo, R. Iniestra, J. A. Aguilar y L. E. Ramos, Impacto ambiental del contenido de azufre en el diésel vehicular comercializado en México, México: INECC, 2019.

ANEXOS

Anexo 1. Encuesta para la recolección de información

REPÚBLICA DEL ECUADOR



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE POSGRADO

MAESTRÍA EN INGENIERÍA AUTOMOTRIZ



ENCUESTA

TRABAJO DE TITULACIÓN

DATOS GENERALES									
Número de Encuesta:					Fecha:				
DATOS CLIENTE									
Género:				Edad:				Cantón de circulación:	
DATOS VEHÍCULO									
Placa:				Marca:				Modelo:	
Año:				Cilindraje:				Tipo:	
Km Actual:		Tipo de Operación:		Público		Tipo de Peso:		Liviano (Toneladas)	
				Comercial					
				Particular					
DATOS MANTENIMIENTO CRDi									
Tiempo último de mantenimiento del Sistema de Inyección CRDi:									
Tiempo último de escaneo de la computadora:									
Síntomas o molestias previo al mantenimiento:									
Diagnóstico:									
Pieza/s o parte/s defectuosa/s:									
Mantenimiento Realizado:						Pieza/a de cambio		Costo (\$):	

Anexo 2. Recolección de información y ensayos experimentales



Anexo 3. Banco de Pruebas de la Empresa “J&J LABORATORIO”



Anexo 4. Modelo BNL - Contaminación del Combustible (Salida de R)

```

Model run by JRAMIREZ76 using Apollo 0.3.4 on R 4.4.2 for windows.
Please acknowledge the use of Apollo by citing Hess & Palma (2019)
DOI 10.1016/j.jocm.2019.100170
www.ApolloChoiceModelling.com

Model name                : MNL_contaminacion_diesel
Model description          : Modelo MNL simple utilizando datos RP para elección de contaminación o no de diesel
Model run at              : 2025-03-20 10:45:54.337194
Estimation method         : bgw
Model diagnosis           : Relative function convergence
Optimisation diagnosis    : Maximum found
    hessian properties    : Negative definite
    maximum eigenvalue   : -0.310536
    reciprocal of condition number : 0.018642
Number of individuals     : 50
Number of rows in database : 50
Number of modelled outcomes : 50

Number of cores used      : 1
Model without mixing

LL(start)                 : -34.66
LL at equal shares, LL(0) : -34.66
LL at observed shares, LL(C) : -34.3
LL(final)                 : -27.91
Rho-squared vs equal shares : 0.1947
Adj.Rho-squared vs equal shares : 0.1081
Rho-squared vs observed shares : 0.1862
Adj.Rho-squared vs observed shares : 0.1279
AIC                      : 61.82
BIC                      : 67.55

Estimated parameters      : 3
Time taken (hh:mm:ss)    : 00:00:0.23
    pre-estimation       : 00:00:0.13
    estimation           : 00:00:0.04
    post-estimation      : 00:00:0.06
Iterations               : 7

Unconstrained optimisation.

Estimates:
      Estimate      s.e.  t.rat.(0)  Rob.s.e.  Rob.t.rat.(0)
asc_contaminado      0.000      NA      NA      NA      NA
asc_no_contaminado    2.675    1.067    2.507    1.134    2.359
b_km_menos500000     0.000      NA      NA      NA      NA
b_km_mas500000       -2.714    1.097   -2.474    1.138   -2.385
b_operacion_publico   0.000      NA      NA      NA      NA
b_operacion_comercial -2.507    1.202   -2.087    1.097   -2.286

```

Anexo 5. Modelo BNL - Tipo de Mantenimiento en función del Km (Salida de R)

```

Model run by JRAMIREZ76 using Apollo 0.3.4 on R 4.4.2 for windows.
Please acknowledge the use of Apollo by citing Hess & Palma (2019)
DOI 10.1016/j.jocm.2019.100170
www.ApolloChoiceModelling.com

Model name                : MNL_mantenimiento
Model description          : Modelo MNL simple utilizando datos RP para elección del tipo de mantenimiento
Model run at              : 2025-03-20 10:09:22.615953
Estimation method         : bgw
Model diagnosis           : Relative function convergence
Optimisation diagnosis    : Maximum found
    hessian properties    : Negative definite
    maximum eigenvalue   : -0.60109
    reciprocal of condition number : 0.0437391
Number of individuals     : 50
Number of rows in database : 50
Number of modelled outcomes : 50

Number of cores used      : 1
Model without mixing

LL(start)                 : -34.66
LL at equal shares, LL(0) : -34.66
LL at observed shares, LL(C) : -31.34
LL(final)                 : -27.28
Rho-squared vs equal shares : 0.2127
Adj.Rho-squared vs equal shares : 0.1262
Rho-squared vs observed shares : 0.1295
Adj.Rho-squared vs observed shares : 0.0657
AIC                      : 60.57
BIC                      : 66.31

Estimated parameters      : 3
Time taken (hh:mm:ss)    : 00:00:0.19
    pre-estimation       : 00:00:0.1
    estimation           : 00:00:0.04
    post-estimation      : 00:00:0.05
Iterations               : 6

Unconstrained optimisation.

Estimates:
      Estimate      s.e.  t.rat.(0)  Rob.s.e.  Rob.t.rat.(0)
asc_preventivo        0.0000      NA      NA      NA      NA
asc_correctivo        -0.6192    0.6178   -1.002    0.6188   -1.001
b_km_menos500000     0.0000      NA      NA      NA      NA
b_km_mas500000       1.6566    0.7317    2.264    0.7263    2.281
b_operacion_publico   0.0000      NA      NA      NA      NA
b_operacion_comercial 2.2053    1.2027    1.834    1.1520    1.914

```

Anexo 6. Modelo BNL - Tipo de Mantenimiento en función del TUM (Salida de R)

```

Model run by JRAMIREZ76 using Apollo 0.3.4 on R 4.4.2 for windows.
Please acknowledge the use of Apollo by citing Hess & Palma (2019)
DOI 10.1016/j.jocm.2019.100170
www.ApolloChoiceModelling.com

Model name                : MNL_mantenimiento
Model description          : Modelo MNL simple utilizando datos RP para elección del tipo de mantenimiento
Model run at              : 2025-03-20 10:46:50.678033
Estimation method         : bgw
Model diagnosis           : X- and relative function convergence
Optimisation diagnosis    : Maximum found
  hessian properties      : Negative definite
  maximum eigenvalue      : -0.373033
  reciprocal of condition number : 0.0238943
Number of individuals      : 50
Number of rows in database : 50
Number of modelled outcomes : 50

Number of cores used      : 1
Model without mixing

LL(start)                 : -34.66
LL at equal shares, LL(0) : -34.66
LL at observed shares, LL(C) : -31.34
LL(final)                 : -30.4
Rho-squared vs equal shares : 0.1228
Adj.Rho-squared vs equal shares : 0.0362
Rho-squared vs observed shares : 0.0301
Adj.Rho-squared vs observed shares : -0.0338
AIC                       : 66.8
BIC                       : 72.54

Estimated parameters      : 3
Time taken (hh:mm:ss)    : 00:00:0.17
  pre-estimation          : 00:00:0.12
  estimation              : 00:00:0.02
  post-estimation         : 00:00:0.03
Iterations                : 5

Unconstrained optimisation.

Estimates:
      Estimate      s.e.  t.rat.(0)  Rob.s.e.  Rob.t.rat.(0)
asc_preventivo      0.0000      NA      NA      NA      NA
asc_correctivo     -0.4055    0.9129    -0.4442    0.9221    -0.4397
b_tum_menos3        0.0000      NA      NA      NA      NA
b_tum_3a5           1.2164    1.0929    1.1130    1.1040    1.1018
b_tum_mas5          1.3437    0.9939    1.3519    1.0040    1.3383

```