UNIVERSIDAD DE ANTIOQUIA

Diseño de sistema de filtración auxiliar de combustible para camionetas Tunland híbridas

Juan Esteban Guarín Jaramillo

Trabajo de grado para optar al título de Ingeniero Mecánico

Modalidad de Práctica:
Semestre de Industria

Asesor:
César Augusto Isaza Merino, Doctor (PhD)

Universidad de Antioquia
Facultad de Ingeniería
Ingeniería Mecánica
Medellín, Antioquia
2025

Cita	Guarín Jaramillo [1]
Referencia Estilo IEEE (2020)	[1] Guarín Jaramillo, “Diseño de sistema de filtración auxiliar de combustible para camionetas Tunland híbridas”, Trabajo de grado profesional, Ingeniería Mecánica, Universidad de Antioquia, Medellín, Antioquia, Colombia, 2025.

Centro de Documentación Ingeniería (CENDOI)

Repositorio Institucional: http://bibliotecadigital.udea.edu.co

Universidad de Antioquia - www.udea.edu.co

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Antioquia ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN 9
ABSTRACT 10
I. INTRODUCCIÓN 11
II. OBJETIVOS 13
A. Objetivo general 13
B. Objetivos específicos 13
III. MARCO TEÓRICO 14
A. Vehículos híbridos 14
1. Configuraciones de vehículos híbridos 14
2. Tipos de hibridación 15
3. Camionetas Tunland 16
B. Motores Diesel 18
1. Sistemas de inyección 20
a) Tipos de sistemas de inyección 21
b) Sistema Common rail 22
C. Fundamentos de filtración de combustible 23
1. Tipos de contaminantes 24
a) Contaminantes sólidos 24
b) Contaminación por agua 24
c) Contaminación química 25
2. Tipos de filtración 25
a) Según el tipo de elemento filtrante 25
b) Según la ubicación en el circuito de combustible 27
c) Según la función especifica 29
D. Contextos operativos adversos para la filtración 30
1. Presencia de polvo y partículas sólidas 31
2. Humedad en el combustible 32
E. Criterios de selección de filtros para sistemas auxiliares 32
IV. METODOLOGÍA 34
A. Diagnóstico y análisis 34

B. Identificación y selección de alternativas....35
C. Diseño del sistema....36
D. Fabricación e instalación de prototipo....37
E. Validación del sistema....38
V. RESULTADOS....40
A. Diagnóstico y análisis del problema....40
B. Identificación y selección de alternativas....46
1. Definición de tecnología a usar....46
2. Alternativas disponibles en el mercado....47
3. Ponderación y selección....48
C. Diseño del sistema....51
1. Identificación de componentes necesarios....51
2. Partes no comerciales....57
D. Instalación del prototipo....63
E. Pruebas y validación del sistema....67
1. Arranque en frio....67
2. Recorrido y consumo....68
3. Arranque en pendiente....71
4. Rutina de inspección del sistema....73
5. Costos de las partes....73
VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES....75
REFERENCIAS....76
ANEXOS....79

LISTA DE TABLAS

TABLA I CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS MOTOR DIÉSEL AF20TC.....17
TABLA II CÓDIGOS SUGERIDOS DE CONTAMINACIÓN ACEPTABLE.....31
TABLA III REFERENCIA DE PARTES SISTEMA DE COMBUSTIBLE.....44
TABLA IV CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO.....44
TABLA V RESUMEN DE NOVEDADES EN LAS CAMIONETAS. 45
TABLA VI ALTERNATIVAS DE TIPOS DE FILTRACIÓN DISPONIBLES.....46
TABLA VII REFERENCIAS DE FILTROS IDENTIFICADAS. 48
TABLA VIII CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LOS FILTROS. 49
TABLA IX. ESCALA DE PUNTUACIÓN PARA LOS CRITERIOS. 50
TABLA X EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS. 50
TABLA XI LISTA DE PARTES Y HERRAMIENTAS. 63
TABLA XII CHEQUEO DE LA PRIMERA PRUEBA DE ARRANQUE. 67
TABLA XIII CHEQUEO DE LA SEGUNDA PRUEBA DE ARRANQUE. 68
TABLA XIV SEGUIMIENTO VEHÍCULO ANTES DE FILTRO AUXILIAR. 69
TABLA XV SEGUIMIENTO VEHÍCULO DESPUÉS DE FILTRO AUXILIAR. 71
TABLA XVI DATOS ARRANQUE EN PENDIENTE 72
TABLA XVII PRESUPUESTO DEL MONTAJE REALIZADO. 74

LISTA DE FIGURAS

Fig. 1. Configuraciones de sistemas híbridos. 15
Fig. 2. Camionetas de la línea Tunland. 16
Fig. 3. Ejemplo de un motor diésel. 18
Fig. 4. Diagramas de cambios de estado en el ciclo Diésel 19
Fig. 5. Esquema general de un sistema de inyección. 20
Fig. 6. Diagrama de un sistema de inyección Common rail. 22
Fig. 7. Vista interna de un filtro de combustible. 25
Fig. 8. Filtro de papel celulósico. 26
Fig. 9. Filtro con fibras sintéticas. 26
Fig. 10. Filtro de malla metálica. 27
Fig. 11. Diferentes ubicaciones de filtros en un sistema de combustible de un vehículo. ..28
Fig. 12. Sección interna de un filtro separador. 30
Fig. 13. Sección interna de un filtro de partículas. 30
Fig. 14. División por etapas del proyecto. 34
Fig. 15. Diagrama de flujo de la etapa 1. 35
Fig. 16. Diagrama de flujo de la etapa 2. 36
Fig. 17. Diagrama de flujo de la etapa 3. 37
Fig. 18. Diagrama de flujo de la etapa 4. 38
Fig. 19. Diagrama de flujo de la etapa 5. 39
Fig. 20. Tipo de fluidos y cantidad. 40
Fig. 21. Intervalos de mantenimiento recomendados. 41
Fig. 22. Instrucciones de remoción e instalación del filtro. 42
Fig. 23. Filtro de combustible de las camionetas Tunland. 42
Fig. 24. Esquema del sistema y sus partes. 43
Fig. 25. Esquema de diagnóstico de causa de averías. 45
Fig. 26. Filtro seleccionado para el sistema auxiliar. 51
Fig. 27. Sistema de filtración original. 52
Fig. 28. Esquema de conexiones del sistema de filtración. 53
Fig. 29. Ubicación para el sistema auxiliar. 54
Fig. 30. Puntos de sujeción para la base del filtro auxiliar 55

Fig. 31. Esquema de componentes necesarios para adaptar el filtro auxiliar. 56
Fig. 32. Ensamble completo del filtro y carcasa. 56
Fig. 33. Otras partes comerciales para la instalación, ...57
Fig. 34. Ubicación y forma de la platina de sujeción. 57
Fig. 35. Diseño de la platina de sujeción. 58
Fig. 36. Resultados de la simulación. 59
Fig. 37. Prototipo de la platina de sujeción. 60
Fig. 38. Diseño de los acoples macho en L. 61
Fig. 39. Fabricación del acople. 62
Fig. 40. Ajuste de los acoples fabricados. 62
Fig. 41. Instalación del soporte. 63
Fig. 42. Montaje del filtro auxiliar. 64
Fig. 43. Sistema montado y acoplado. 65
Fig. 44. Bomba manual. 65
Fig. 45. Indicador de saturación. 66
Fig. 46. Trayectos y altimetría de algunas rutas de prueba. 70
Fig. 47. Estado del indicador de saturación. 73

SIGLAS, ACRÓNIMOS Y ABREVIATURAS

CAD	Computer-Aided Design
CAM	Computer-Aided Manufacturing
CNC	Computer Numerical Control
DMS	Distribution Management System
ECU	Engine Control Unit
FEA	Finite Element Analysis
Gal	Galón
km	Kilómetro
L	Litro
ppm	Partes por millón
rpm	Revoluciones por minuto

RESUMEN

El presente trabajo tiene como objetivo diseñar un sistema auxiliar de filtración de combustible para camionetas hibridas de la marca Foton Tunland, con el fin de mejorar su funcionamiento en condiciones de operación severas, tales como alta presencia de contaminantes de partículas sólidas y humedad. La metodología se estructura en cinco fases: diagnóstico y análisis del problema, identificación y selección de alternativas, diseño del sistema, fabricación e instalación del prototipo, y validación mediante pruebas de campo. El diagnóstico permitió caracterizar las deficiencias del sistema de filtración original y establecer los requisitos técnicos para el sistema auxiliar. A partir de la evaluación de opciones disponibles, se seleccionaron los componentes comerciales, además se diseñaron las piezas a medida, se fabricaron y ensamblaron específicamente para la aplicación.

Las pruebas iniciales confirmaron la correcta integración y operación del sistema, aunque la medición de su impacto en la reducción de fallas producidas por baja calidad del combustible aún continúa en recopilación de información para su validación. Finalmente, se define que la solución propuesta es técnica y económicamente viable, incrementando la protección del sistema de inyección, además de mostrar ser adaptable a otras aplicaciones.

Palabras clave — Filtración de combustible, sistema auxiliar, sistema de inyección, camionetas, contaminación de combustible, motores diésel.

ABSTRACT

The present work aims to design an auxiliary fuel filtration system for Foton Tunland hybrid pickup trucks, with the purpose of improving their performance under severe operating conditions, such as those with a high presence of contaminants including solid particles and moisture. The methodology is structured into five phases: diagnosis and problem analysis, identification and selection of alternatives, system design, prototype manufacturing and installation, and validation through field testing. The diagnostic phase made it possible to characterize the deficiencies of the original filtration system and establish the technical requirements for the auxiliary system. Based on the evaluation of available options, commercial components were selected, and custom-made parts were designed, manufactured, and assembled specifically for the application.

Initial tests confirmed the proper integration and operation of the system; however, the measurement of its impact on reducing failures caused by poor fuel quality is still in progress, pending the collection of sufficient data for its validation. Finally, it is concluded that the proposed solution is both technically and economically feasible, enhancing the protection of the injection system while demonstrating adaptability to other applications.

Keywords — Fuel filtration, auxiliary system, injection system, pickup tricks, fuel contamination, diesel engines.

I. INTRODUCCIÓN

El motor es el corazón de cualquier vehículo, este es el responsable de convertir la energía almacenada en el combustible de forma química, en movimiento mecánico. Su cuidado para asegurar el correcto funcionamiento no solo garantiza un rendimiento óptimo, sino que también influye directamente en la eficiencia, la durabilidad y los costos operativos del vehículo [1]. En la actualidad, incluso con el auge de los vehículos eléctricos, los motores de combustión interna, especialmente los motores diésel, siguen siendo esenciales en aplicaciones que demandan alta potencia y autonomía, como el transporte pesado, la maquinaria industrial y, cada vez más, en sistemas híbridos que combinan motores diésel con tecnología eléctrica para reducir emisiones sin sacrificar capacidad [2].

En este contexto, la integridad del sistema de filtración de combustible adquiere gran relevancia, ya que componentes como bombas de inyección e inyectores, claves en motores diésel modernos, son altamente sensibles a contaminantes como partículas sólidas, agua y residuos orgánicos. Estudios en sistemas *common-rail* [1] demuestran que la presencia de agua, incluso en concentraciones mínimas (500 ppm o 0.05%), induce cavitación y corrosión en piezas críticas como pistones, válvulas, agujas de inyectores y asientos, acelerando fallas prematuras y reduciendo la eficiencia [3]. Además, material particulado superior a 15 mg/L obstruye boquillas, altera la atomización del combustible y daña mecanismos internos, incrementando el consumo de combustible, disminuyendo la potencia y elevando emisiones contaminantes [4].

La acumulación de agua también genera riesgos graves como el *hydrolock*[2], anomalía que puede fracturar componentes internos y requerir reconstrucciones completas del motor. Asimismo, los contaminantes degradan los aceites y lubricantes, desgastan prematuramente la bomba de combustible y aumentan los costos de mantenimiento. Filtros saturados fuerzan al motor a operar con mezclas empobrecidas, reduciendo su rendimiento y exigiendo intervenciones frecuentes. En equipos pesados y vehículos híbridos diésel, estas impurezas son causantes directas de bloqueos de inyectores, fallas en válvulas y daños estructurales, comprometiendo la confiabilidad del sistema y anulando parte de los beneficios de la hibridación [5].

[1] Sistema de inyección directa de combustible en motores diésel que, utiliza un “riel común” o acumulador manteniendo combustible a alta presión y distribuirlo a cada inyector de forma independiente, mejorando eficiencia, reduciendo emisiones y mejorando el control del proceso de combustión.

[2] Fenómeno que ocurre cuando entra líquido, generalmente agua, en uno o más cilindros, impidiendo el movimiento del pistón debido a la incomprensibilidad del líquido, lo que puede causar daños severos en el motor.

Conociendo la importancia del cuidado del motor y sus partes por medio de una buena filtración de los fluidos empleados para su operación, se entiende el marco en el cual se desarrolla el presente trabajo. La práctica se desarrollada en el Grupo Colombiana de Comercio S. A. – Corbeta, específicamente en la empresa Corautos Andino, unidad del grupo especializada en el segmento automotriz. Esta entidad presta servicios de comercialización, soporte técnico y desarrollo de producto para marcas como FOTON, LOVOL y DONGFENG [6]. En este escenario, el área de Investigación y Desarrollo (I+D) ha identificado deficiencias en el sistema de filtrado primario de combustible de las camionetas *Tunland* de la marca FOTON cuando son sometidas a ambientes severos como minas, campos petroleros o zonas con alta concentración de material particulado, donde la operación constante en estas condiciones compromete el rendimiento, durabilidad y eficiencia del motor.

El problema abordado surge de la necesidad de garantizar la continuidad operativa de la flota de camionetas en contextos que exceden las condiciones estándar para las que fueron diseñadas. Se identifica que los filtros primarios instalados de fábrica no ofrecen una protección suficiente frente a contaminantes finos ni a la humedad presente en el combustible, lo que conlleva fallas mecánicas recurrentes y afectación en el sistema de inyección. Ante esta problemática, se plantea la necesidad de definir las características que debe tener un sistema de filtración auxiliar que permita a las camionetas Tunland mantener un funcionamiento eficiente y confiable en condiciones ambientales adversas.

En varios antecedentes técnicos, se ha abordado la necesidad de mejorar los sistemas de filtrado en vehículos de carga y trabajo pesado, especialmente mediante la mejora de los sistemas principales y/o la implementación de filtros secundarios o auxiliares. Sin embargo, en el caso específico de las camionetas híbridas *Tunland*, no se contaba con un sistema complementario de filtración validado y adaptado a su configuración. En este sentido, justifica el desarrollo del trabajo como una contribución directa al mejoramiento del desempeño vehicular en sectores productivos, además de constituir una oportunidad para integrar conocimientos en diseño mecánico, selección de componentes y pruebas funcionales, dentro de un entorno real de aplicación.

II. OBJETIVOS

A. Objetivo general

Diseñar un sistema de filtración auxiliar que permita el correcto funcionamiento de las camionetas Tunland híbridas en condiciones de operación exigentes.

B. Objetivos específicos

- Diseñar el sistema de filtración auxiliar, considerando cada uno de los componentes necesarios para su adaptación al vehículo
- Crear la metodología para la fabricación y/o adquisición de las piezas necesarias, y su montaje en el vehículo
- Validar el funcionamiento del sistema de filtración diseñado e instalado, mediante pruebas de campo

III. MARCO TEÓRICO

A. Vehículos híbridos

Los vehículos híbridos son automóviles que combinan dos fuentes principales de energía para su propulsión: un motor de combustión interna y uno o más motores eléctricos. Esta configuración busca aprovechar las ventajas de ambos sistemas para mejorar la eficiencia energética al reducir las emisiones contaminantes y mantener la autonomía operativa. Una característica distintiva de estos vehículos es la incorporación de una batería de tracción, que puede ser recargada mediante recuperación de energía durante el frenado (regeneración) o, en algunos casos, a través de la red eléctrica como ocurre en los híbridos enchufables [7].

El funcionamiento de un vehículo híbrido se basa en la gestión de los flujos de energía dependiendo de las condiciones de manejo como velocidad, carga, aceleración o nivel de carga de la batería. En bajas velocidades y condiciones de baja demanda, el motor eléctrico puede aportar al vehículo una mayor porción de la potencia, lo que reduce el consumo de combustible y las emisiones locales. En situaciones de mayor exigencia, ambos motores pueden operar de manera conjunta, sumando su potencia para mejorar la respuesta del vehículo. Además, en algunas configuraciones, que utilizan regeneración durante el frenado o desaceleración, la recuperación de parte de la energía cinética aumenta la eficiencia global del sistema.

1. Configuraciones de vehículos híbridos

Desde el punto de vista técnico, existen diferentes configuraciones de propulsión híbrida, destacándose las configuraciones en paralelo, en serie y mixta. En la configuración paralela, tanto el motor de combustión como el motor eléctrico están conectados mecánicamente al tren motriz, como se observa en la *configuración A* de la Fig. 1, lo que les permite impulsar las ruedas de manera conjunta o individual. Esta arquitectura es eficiente en rutas mixtas y permite una buena recuperación de energía sin requerir grandes baterías. Por otro lado, la *configuración B* mostrada en la *figura 1* corresponde a un sistema híbrido en serie, el cual utiliza únicamente el motor eléctrico para la tracción, mientras que el motor térmico se emplea exclusivamente para generar electricidad, bien sea para cargar la batería o alimentar directamente el motor eléctrico. Esta disposición simplifica el tren motriz y es común en vehículos urbanos o de servicio, como autobuses [8].

Una tercera configuración, conocida como serie-paralelo o *power-split*, ilustrada en la configuración *C* de la *figura 1*, combina ambas arquitecturas anteriores. Permite operar en modo eléctrico, térmico o combinado, utilizando un divisor de potencia que gestiona el flujo de energía

de forma dinámica [8]. Esta configuración se considera una de las más eficientes al adaptarse a distintas condiciones de manejo.

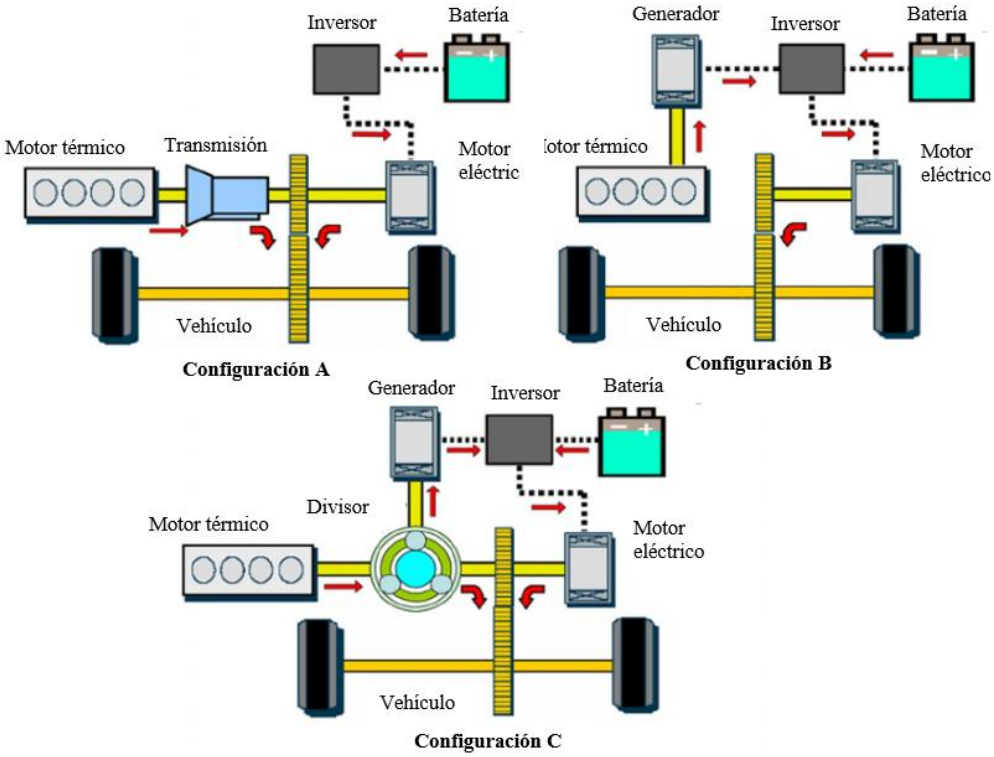


Fig. 1. Configuraciones de sistemas híbridos.

NOTA: Esquematización de distintos tipos de configuraciones para el tren motriz de vehículos híbridos. Fuente: Imagen adaptada [9].

2. Tipos de hibridación

En cuanto a los tipos de vehículos híbridos, estos se clasifican según el nivel de hibridación. Los semi-híbridos o *mild hybrids* cuentan con un motor eléctrico de baja potencia que no propulsa el vehículo por sí solo, sino que asiste al motor térmico en funciones específicas como el arranque, la aceleración inicial o la recuperación de energía, logrando una mejora modesta en el consumo de combustible [10]. Los vehículos completamente híbridos o *full hybrids* permiten una propulsión puramente eléctrica en condiciones específicas, además de operar en modos mixtos o solo térmicos. Estos vehículos cuentan con baterías de mayor capacidad y una unidad de control más sofisticada que gestiona continuamente el sistema [11].

Por otro lado, los vehículos híbridos enchufables o *PHEV* por sus siglas en inglés (*Plug-in Hybrid Electric Vehicles*) integran baterías de gran capacidad que pueden recargarse externamente mediante una toma de corriente. Esto les permite recorrer mayores distancias en modo totalmente eléctrico, antes de que se active el motor térmico como respaldo. Finalmente, los vehículos de

autonomía extendida o *REEV* (*Range-Extended Electric Vehicles*) son esencialmente eléctricos, pero incorporan un pequeño motor térmico que actúa como generador para recargar la batería cuando esta se agota, sin conectar mecánicamente el motor térmico al eje de tracción [12].

Los vehículos híbridos, en sus distintas variantes, han representado un gran aporte a la transición hacia una movilidad más sostenible. Ofrecen un equilibrio entre eficiencia energética, rendimiento y autonomía, especialmente en aplicaciones donde la electrificación total aún presenta limitaciones, como el transporte pesado, las zonas rurales o los vehículos de servicio mixto [11]. Su adopción global ha ido en aumento, y su evolución tecnológica continúa orientada hacia una mayor eficiencia, menores emisiones y mayor integración con fuentes de energía renovable.

3. Camionetas Tunland

Las camionetas Foton Tunland, en sus modelos híbridos, corresponden a una configuración en paralelo con una tipología de vehículo semi-hibrido, en donde el motor diésel es el encargado de la propulsión primaria del equipo, mientras el motor eléctrico es un respaldo que permite reducir el consumo de combustible. Este tipo de camionetas representan un segmento emergente dentro del mercado de vehículos comerciales ligeros y utilitarios, combinando la robustez y capacidad de carga inherentes a una pick-up con la eficiencia y las ventajas ambientales de la tecnología híbrida. Estos vehículos están diseñados para tratar de equilibrar rendimiento asociado al consumo de combustible y reducción de emisiones, adaptándose a entornos urbanos, así como a exigencias de trabajo más demandantes en entornos rurales.



Fig. 2. Camionetas de la línea Tunland.

NOTA: La imagen es una referencia de la línea de camionetas tipo Tunland [13], esta representación puede variar en función de las diferentes configuraciones ofrecidas en el portafolio de vehículos de la línea.

La Tunland se posiciona como un vehículo utilitario deportivo (SUV[3]) de tamaño mediano con capacidades de pickup, dirigido principalmente a usuarios comerciales, constructores, agricultores y empresas que requieren un vehículo versátil para el transporte de personal y carga. El corazón del sistema de propulsión de las camionetas híbridas Tunland es un motor diésel de cuatro cilindros en línea, turboalimentado, con una cilindrada aproximada de 2.0 litros. Este motor está diseñado para cumplir con normativas de emisiones Euro 6, incorporando tecnologías avanzadas de control de emisiones y eficiencia energética [13]. En la *tabla I* se muestran las características técnicas del motor de la camioneta híbrida Tunland.

TABLA I
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS MOTOR DIÉSEL AF20TC.

Concepto	**Parámetro**
Motor	AUCAN AF20TC
Configuración	Motor de 4 cilindros en línea vertical
Cámara de combustión	Inyección directa
Orden de ignición	1-3-4-2
Potencia nominal /velocidad [kW/rpm]	120/4000
Más. Par/velocidad [Nm/rpm]	390/ 1800-2600
Diámetro x carrera [mm]	81 x 95,5
Desplazamiento [L]	1.968
Índice de compresión	16.2:1
Velocidad de ralentí [rpm]	750 ± 50
Sistema de inyección	Carril común de alta presión
Método de lubricación	Tipo combinado de presión y salpicadura
Aspiración	Turbo e intercooler
Nivel de emisiones	Euro 6
Dimensiones [mm]	609 x 672 x 826

NOTA: Datos técnicos de los motores diésel Aucan 4F20TC17 equipados en las camionetas Tunland [14].

Al ser vehículos híbridos, las camionetas Tunland están equipadas con un motor eléctrico de la marca Valeo que aportan hasta 13 hp de potencia adicionales al vehículo [13].

[3] La denominación *SUV* (*Sport Utility Vehicle*) hace referencia a vehículos caracterizados por combinar aspectos de automóviles todoterreno — como mayor altura al suelo y tracción en las cuatro ruedas — con el confort y diseño de un vehículo de pasajeros.

B. Motores Diesel

Los motores diésel, como el mostrado en la Fig. 3, son un tipo de motor de combustión interna que funciona mediante ignición generada por compresión, mecanismo que difiere de los motores a gasolina de ciclo Otto al no requerir un elemento externo que inicie la combustión como las bujías.



Fig. 3. Ejemplo de un motor diésel.

NOTA: Imagen de un motor diésel modelo AF20TC17 de la marca Aucan, los cuales son empleados en las camionetas de la línea Tunland. Fuente: *Semoto* [14].

Durante el ciclo de combustión con el cual operan los motores diésel, se introduce aire en el cilindro, el cual es comprimido hasta alcanzar presiones con relaciones entre 15:1 y 25:1, al tiempo que se genera un aumento de la temperatura al interior de la cámara de combustión [15], cómo se observa en la Fig. 4, donde se ilustran las fases del ciclo, en la transición de estados 1-2, cuyas condiciones son suficientes para que el combustible diésel se encienda por autoignición al ser inyectado en la cámara de combustión.

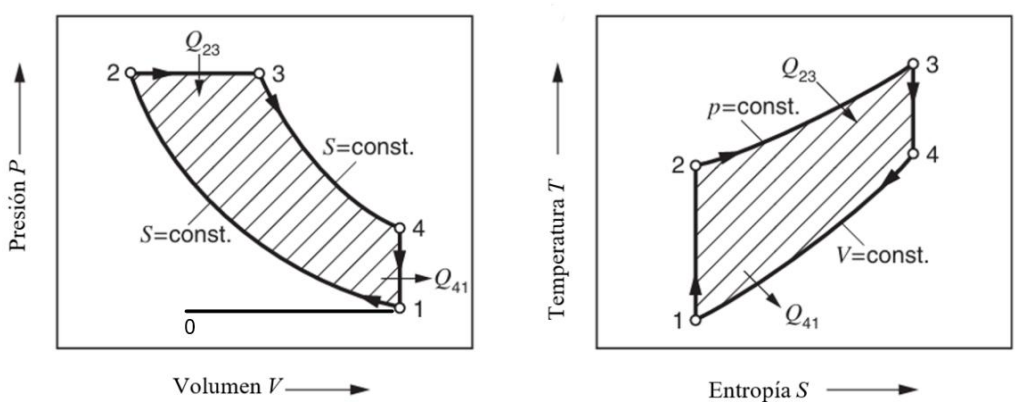


Fig. 4. Diagramas de cambios de estado en el ciclo Diésel

NOTA: Diagramas volumen vs presión y entropía vs temperatura para el ciclo diésel de combustión. Fuente: *Automotive Handbook* [1]

El ciclo completo de combustión desarrollado por los motores diésel que se ilustra en la *figura 4*, muestra el desarrollo termodinámico de las 4 etapas que componen el proceso: Admisión, compresión, trabajo de combustión y expansión y finalmente el escape.

- **Admisión**: con la válvula de admisión abierta, el pistón desciende desde punto muerto superior hasta el punto muerto inferior, de esta manera se introduce aire atmosférico en el cilindro (0→1).
- **Compresión**: en el trayecto 1→2 ambas válvulas se cierran, el pistón asciende y comprime el aire adiabáticamente, reduciéndose su volumen y aumentando su presión y temperatura.
- **Combustión y expansión (trabajo)**: al alcanzar el punto muerto superior, se inyecta diésel finamente atomizado. La mezcla se inflama por la alta temperatura, manteniéndose a presión casi constante (2→3), mientras empuja el pistón hacia abajo (3→4), convirtiendo energía térmica en trabajo mecánico.
- **Escape**: el pistón asciende, la válvula de escape se abre y expulsa los gases quemados (4→0), culminando el ciclo antes de repetirse.

Debido a la capacidad de los motores diésel para operar sin mezcla de combustible en la fase de compresión, se evita el fenómeno de "knock"[4]. Además, al inyectarse el combustible justo antes del punto muerto superior, se garantiza una combustión controlada, más eficiente en comparación con otros sistemas y que permite alta durabilidad y potencia continua.

[4] Fenómeno en motores de combustión interna que ocurre cuando la mezcla aire-combustible se inflama de forma prematura o irregular, generando ondas de choque que pueden dañar componentes del motor y reducir su eficiencia.

1. Sistemas de inyección

Los sistemas de inyección de combustible son una parte importante en los motores de combustión interna, ya que son los responsables de suministrar la cantidad necesaria de combustible y en el momento definido del ciclo, según condiciones de combustión que garanticen el rendimiento del motor y la eficiencia energética, al tiempo que se reducen las emisiones producidas. La evolución de los sistemas de inyección ha sido impulsada principalmente con el objetivo de cumplir las regulaciones ambientales que avanzan con miras a reducir los niveles de emisión producidos por el consumo de combustibles fósiles en este tipo de motores.

El sistema de inyección tiene como función atomizar el combustible diésel previo a su ingreso en la cámara de combustión, de manera que la lluvia fina formada se mezcle de forma homogénea con el aire comprimido que se encuentra a altas temperaturas, produciendo la combustión del diésel. Esta función requiere precisión en el tiempo, cantidad y presión de inyección, por lo que las partes que componen el sistema deben operar de forma precisa y coordinada. En la Fig. 5 se observan el esquema general de componentes de un sistema de inyección para motores diésel.

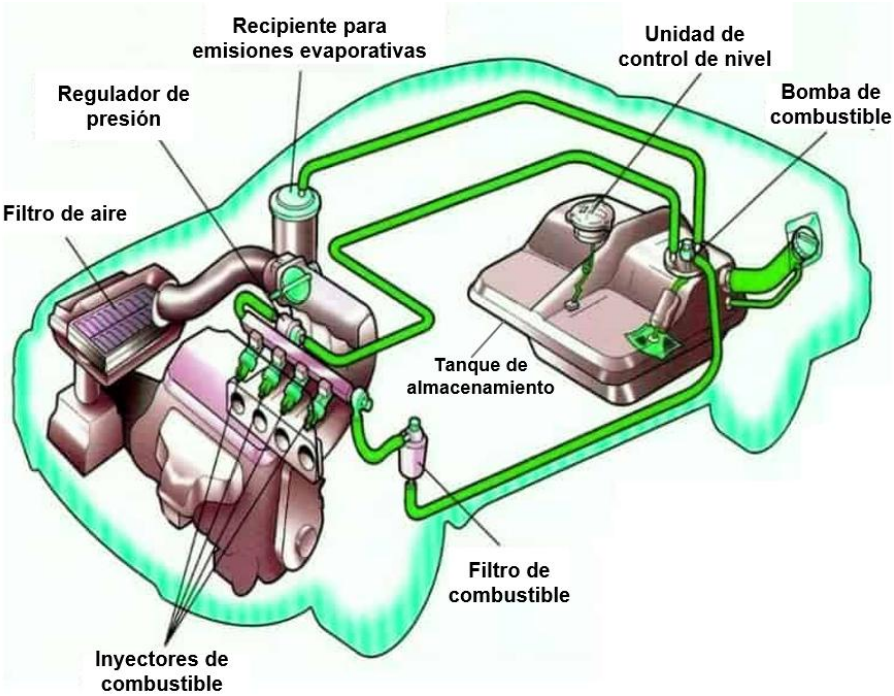


Fig. 5. Esquema general de un sistema de inyección.

NOTA: El esquema representa los componentes más comunes de un sistema de inyección, sin embargo, su distribución y elementos depende del tipo de configuración especifica usada por la tecnología propia de cada fabricante. Fuente: *Engineers post* [16].

Dado que los sistemas más modernos cuentan con una alta automatización por medio del uso de sensores y control electrónico, dentro de los componentes principales podemos destacar la bomba de inyección, los propios inyectores, la unidad de control, los sensores y las válvulas de control.

a) Tipos de sistemas de inyección

La tecnología de inyección en motores diésel ha experimentado una evolución constante desde los primeros sistemas mecánicos hasta los sofisticados sistemas electrónicos actuales. Los principales factores que han impulsado su evolución incluyen la búsqueda de una mayor eficiencia, aumento de la potencia obtenida, disminuir el uso de combustible, reducir el ruido, las vibraciones y las emisiones contaminantes. Cada nueva tecnología ha representado una mejoría cualitativa en factores como la presión de trabajo, precisión y capacidad de control de múltiples parámetros de forma simultánea.

La clasificación de los sistemas de inyección diésel se basa principalmente en el método empleado para la generación y control de la presión de inyección, así como el tipo de control utilizado. Algunos de los sistemas conocidos son:

- **Sistema de inyección mecánica:** sistema completamente mecánico, utiliza bombas de embolo y reguladores centrífugos para controlar la cantidad de combustible y el momento de inyección. Son robustos y por tanto menos sensibles a la calidad del combustible y ofrecen un control limitado de los distintos parámetros del proceso de dosificación e inyección [17].
- **Sistema de inyección electrónica:** evolución natural del sistema de inyección mecánica el cual incorpora un control electrónico por medio de sensores y actuadores controlador por una Unidad de Control del Motor (ECU por sus siglas en ingles “Engine Control Unit”) para mejorar la eficiencia y precisión por medio de una mejor respuesta al cambio en las condiciones operativas del sistema [18].
- **Sistema de inyector bomba:** conocido como el sistema “Unit injector”, en este modelo cada cilindro cuenta con su propia bomba de inyección integrada al inyector, permitiendo trabajar con presiones de inyección muy elevadas de hasta 2200 bares, al tiempo que se tiene un control individual del cilindro [18]. Sin embargo, también añade mayor complejidad y costos de operación y mantenimiento.

- **Sistema Common rail:** es el sistema con la tecnología más difundida en la actualidad. Este sistema emplea una bomba de alta presión que alimenta un conducto común para los inyectores ("rail"), manteniendo el combustible a presión constante [19]. Esta configuración también permite múltiples inyecciones por ciclo y un control más preciso de los tiempos de inyección.

b) Sistema Common rail

El sistema de inyección "Common rail" es una tecnología de alimentación e inyección de combustible utilizada en los motores diésel de inyección directa, cuyo principio de operación se basa en la separación de la generación de presión y el proceso de inyección del combustible. En este sistema la presión se mantiene constante en un ducto común, de ahí el nombre "common rail", mediante una bomba de alta presión, el cual se encarga de alimentar todos los inyectores [1].

En la Fig. 6 puede verse un esquema de los principales componentes que hacen parte de los sistemas de inyección "common rail".

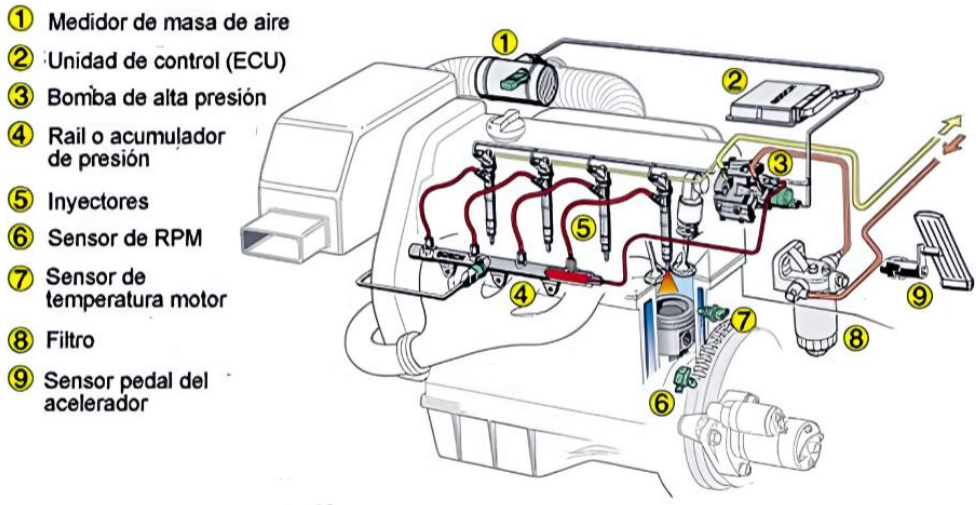


Fig. 6. Diagrama de un sistema de inyección Common rail.

NOTA: El diagrama representa los componentes del sistema de inyección *common rail* diseñado e implementado por el fabricante automotriz alemán Bosch. Fuente: [20].

- **Bomba de alta presión:** Su función es elevar la presión, por compresión (alrededor de 2000 bares [18]), del combustible diésel que viene del tanque de combustible. Esta bomba puede ser de tipo pistón radial o axial, e incluso en algunos modelos se desacopla del árbol de levas para mejorar su operación [21]. La bomba debe ser capaz de suministrar suficiente combustible para mantener la presión del sistema incluso durante múltiples inyecciones simultaneas.

- **Riel común:** Es un tubo o conducto acumulador que almacena el combustible a late presión y lo distribuye a cada uno de los inyectores. Su diseño debe permitir que la presión se mantenga constante y disponible independientemente de los tiempos de inyección de cada cilindro.
- **Inyectores:** Son elementos tipo válelas controladas electrónicamente por la unidad de control electrónico. Su función es abrirse y cerrarse permitiendo los pulsos de inyección en los ciclos de combustión, garantizando la atomización del combustible. Por medio de los inyectores se controla el momento y duración del ingreso de combustible, así como la cantidad de diésel en cada cilindro.
- **Unidad de control electrónico (ECU):** Es la unidad encargada de recibir y coordinar las diversas señales de los sensores del motor como temperatura, presión, posición del cigüeñal, etc., para posteriormente procesar dicha información y regular los parámetros de inyección como el tiempo, duración y cantidad de combustible, en función de mantener el rendimiento requerido del motor en cada momento de operación.
- **Sensores y actuadores:** Puede incluir sensores de presión, temperatura, posición del árbol y el cigüeñal, masa de aire y posición del acelerador, de manera que recopilan la información necesaria para gestionar la inyección del combustible en el motor.

El sistema “Common rail” permite tener una mayor precisión en la dosificación de los múltiples inyectores en cada ciclo, mejorando a su vez el control de la combustión y llevando a la reducción de emisiones producto de procesos ineficientes de combustión.

C. Fundamentos de filtración de combustible

Los sistemas de filtración de combustible en motores diésel tienen dos objetivos principales, los cuales se encuentra ligados y son esenciales para preservar el rendimiento y durabilidad de sus distintos componentes [22]. En primer lugar, los filtros están diseñados para eliminar partículas u otros fluidos que podrían dañar partes como la bomba o los inyectores, los cuales trabajan a altas presiones y para propiedades específicas del combustible empleado.

En segundo lugar, con la filtración del combustible se busca proteger los cada vez más sofisticados sistemas empleados para el control del proceso de combustión. Mantener una filtración

que proteja los diferentes componentes del motor permite alargar su vida útil de estos, evitando costosos cambios de partes o reparaciones de sistemas completos por deterioro prematuro.

1. Tipos de contaminantes

Los combustibles como el diésel utilizado actualmente en muchos tipos de vehículos comerciales están sujetos a la presencia de diversos tipos de contaminantes que pueden llegar a comprometer el rendimiento del motor y la durabilidad de los componentes que hace parte del sistema de inyección. Por esta razón, para desarrollar sistemas de filtración efectivos, es necesario comprender la naturaleza de los elementos contaminantes que pueden estar presentes en el combustible.

a) Contaminantes sólidos

Dentro de los distintos tipos de contaminantes que suelen estar presentes en el combustible, las partículas sólidas son uno de los principales y que pueden generar grandes afectaciones del sistema por fenómenos como la erosión u obstrucción de distintos componentes del sistema. Dentro de esta categoría de contaminantes se encuentran:

- Partículas metálicas
- Sedimentos (arena, tierra, etc.)
- Partículas atmosféricas (polvo, material particulado)

Todos estos tipos de partículas son dañinos especialmente en sistemas de inyección *Common rail* de alta presión, pues generan un mayor desgaste por efecto abrasivo en inyectores, válvulas de presión e incluso en el pistón mismo.

b) Contaminación por agua

El agua puede estar presente en el combustible diésel por distintos factores como, por ejemplo, el resultado de fenómenos de condensación, ingreso de agua lluvia o adsorción del aire, este último fenómeno es especialmente relevante em casos donde se usa biodiesel, el cual es altamente higroscópico[5]. Algunos de los problemas ocasionados por la contaminación con agua son:

- Corrosión
- Congelamiento
- Reducción de poder calorífico

[5] Capacidad de una sustancia para absorber y retener humedad del ambiente.

c) Contaminación química

Este tipo de contaminación corresponde a la presencia de agentes químicos en el diésel que puede deteriorar la calidad del combustible, así como los diferentes componentes del sistema.

- Productos de oxidación
- Ceras y parafinas
- Productos de degradación
- Compuestos sulfurados

Suelen estar asociados a procesos como la obtención, refinamiento, trasporte y almacenamiento del combustible. Elementos como las ceras, parafinas y compuestos sulfurados pueden ser remanentes del refinamiento inicial del producto. Por su parte, los productos de degradación tienen especial relevancia con el uso actual del biodiesel, el cual por su origen orgánico puede mantener trazas de material propenso a degradación biológica.

2. Tipos de filtración

En los sistemas de filtración existen diferencias basadas en el tipo del medio filtrante, la ubicación del filtro dentro del circuito de combustible, su función específica y las condiciones de operación y mantenimiento. Estas diferencias están dadas para responder a las diferentes condiciones operativas y necesidades específicas según el tipo de sistema y su funcionamiento.

a) Según el tipo de elemento filtrante

El elemento filtrante, como se observa en la Fig. 7, es el componente activo del filtro, encargado de capturar las impurezas presentes en el combustible mediante mecanismos como interceptación directa, difusión o coalescencia. Su selección depende del tipo de contamínate que se dedea eliminar, el nivel de eficiencia en la retención que se requiere y las condiciones operativas del motor.



Fig. 7. Vista interna de un filtro de combustible.
Fuente: Bosch [1].

Dentro de los medios filtrantes más usado en la actualidad están:

- **Papel celulósico:** Es un medio primario muy usado por su bajo costo, así como su capacidad para retener partículas de tamaños hasta entre 10 y 25 µm [23]. Algunos de estos papeles pueden tener incluido un tratamiento hidrofóbico para separar el agua en etapas tempranas. La Fig. 8 muestra un filtro elaborado a partir de dobleces de papel celulósico, el cual atrapa las impurezas a medida que cruza por dichos pliegues.



Fig. 8. Filtro de papel celulósico.
Fuente: Hollingsworth-Vose [24]

- **Fibras sintéticas (microfibra):** Son empleadas generalmente en filtros secundarios debido a su alta eficiencia para capturar partículas con tamaños que rondan las 4-5 µm al 99,9% [25]. Para seleccionar el tipo de fibras se debe considerar la capacidad para fabricar fibras de diámetro uniforme, así como el nivel de porosidad y la compatibilidad química para evitar deterioro prematuro. Entre los materiales más usados están el tereftalato de polietileno, polipropileno, poliamida y fibras de vidrio, entre otras.



Fig. 9. Filtro con fibras sintéticas.

NOTA: La imagen corresponde a un filtro con papel de fibra sintética, el cual tiene la denominación UHE (Ultra Heigh Efficiency), comúnmente asignada a filtros fabricados con dichos materiales. Fuente: Donsson [26].

- **Mallas metálicas:** Son usadas comúnmente como prefiltros o pantallas protectoras, reteniendo partículas de mayor tamaño, generalmente mayores a 50 µm, evitando de esta manera obstrucción prematura de elementos más sensibles. Su principal ventaja es la resistencia y durabilidad, permitiendo que puedan ser limpiados y reutilizados.



Fig. 10. Filtro de malla metálica.
Fuente: Donsson [26].

b) Según la ubicación en el circuito de combustible

La ubicación del filtro dentro del circuito de combustible influye con el tipo y características de contaminante que debe retener, así como en el nivel de exigencia técnica del elemento filtrante y su impacto en la operación en conjunto del sistema. Los sistemas de filtración suelen diseñarse para operar en etapas sucesivas, de forma que se establece una barrera progresiva contra diferentes tipos de contaminantes. En la Fig. 11 por ejemplo, se esquematiza un sistema de inyección de combustible en donde se identifican diferentes tipos de filtros ubicados cada uno en una sección especifica de la línea de combustible, con el fin de cumplir una tarea determinada según el requerimiento de calidad para cada uno de los componentes en las secciones donde se ubican.

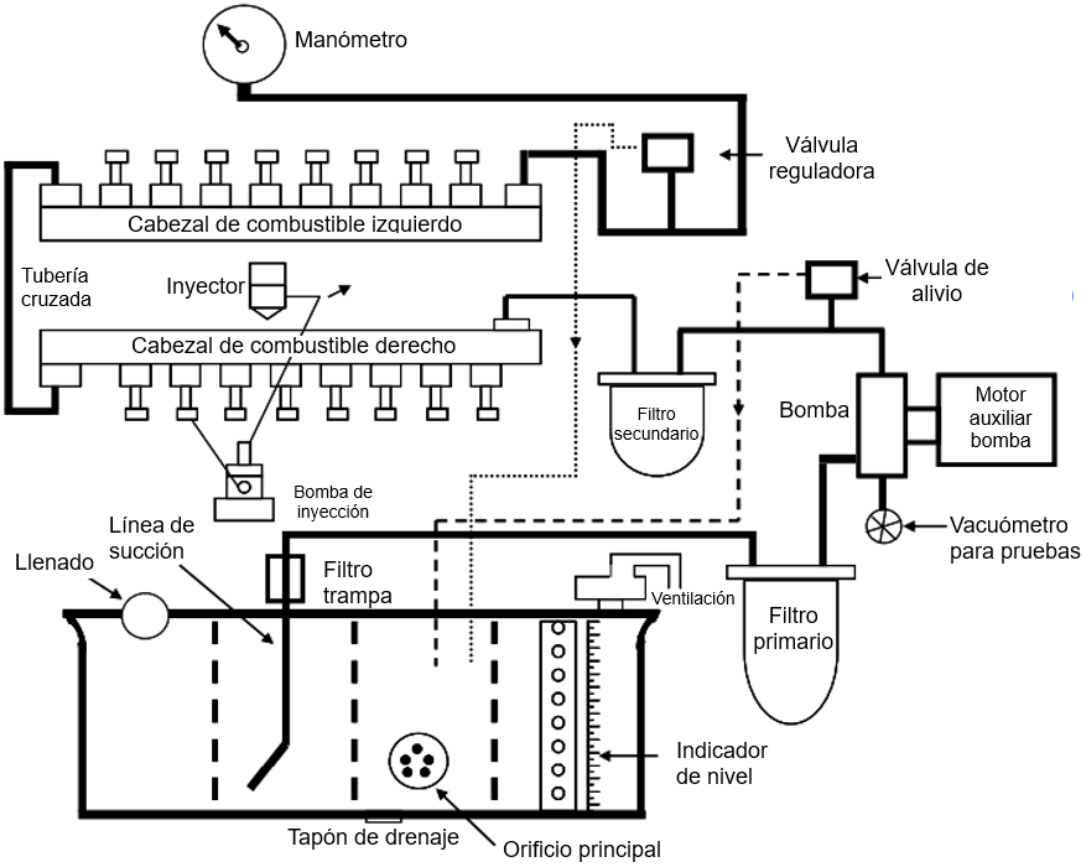


Fig. 11. Diferentes ubicaciones de filtros en un sistema de combustible de un vehículo.

NOTA: Imagen adaptada. Fuente: RSKR [27].

- **Filtros primarios:** Este tipo de filtros, que también se denominan en algunos casos prefiltros, suelen encontrarse entre el tanque y la bomba de baja presión, tal como se observa en la Fig. 11. El medio filtrante puede ser de tipo malla o alguno de los tipos de papel empleados con un mayor grosor, con capacidad de retención entre 10 y 30 µm [28]. Su función principal es retener partículas de mayor tamaño, provenientes del tanque de combustible como óxidos o sedimentos, además de eliminar el agua libre. De esta manera, se protege principalmente la bomba de aspiración, la cual es susceptible de fenómenos como la cavitación[6].

[6] Fenómeno por el cual las variaciones de presión en un líquido producen la forman burbujas de vapor. Estas burbujas al ingresar a zonas de mayor presión colapsan violentamente generando ondas de choque que pueden causar daños en la superficie del material

- **Filtros secundarios:** También conocidos como filtros de barrera, se ubican antes d ellos componentes más sensibles del sistema como la bomba de alta presión y los inyectores, tal como se muestra en la Fig. 11. Su tarea es retener las partículas más finas que hayan pasado las etapas anteriores, llegando a atrapar partículas de hasta 4 μm [29].
- **Filtros auxiliares:** Este tipo de filtros son componentes instalados de forma complementaria en situaciones específicas, generalmente de condiciones extremas de operación por la alta presencia de contaminantes que pueden afectar el desempeño del sistema. Algunos escenarios en donde suelen emplearse son flotas pesadas, minería, sistemas marinos, o aquellos equipos que trabajan con biocombustibles. Estos filtros pueden ubicarse en la línea de alimentación, o incluso en líneas de retorno. En entornos de operación críticos pueden instalarse también acompañados de sistemas de respaldo con "bypass" para asegurar la continuidad de la operación incluso durante rutinas de mantenimiento.

c) Según la función especifica

Cada tipo de filtro cumple una función específica dentro del circuito de protección, que puede enfocarse en la retención de partículas sólidas y eliminación de fluidos diluidos, entre otros. Estas funciones suelen determinarse por la etapa en la que actúa cada filtro y la sensibilidad de los componentes que desean protegerse.

- **Filtro se succión:** Es el más cercano al tanque de combustible, siendo el primer elemento de barrera. Su función es retener los contaminantes de mayor tamaño que pueden encontrarse en el combustible y podrían causar daños mecánicos en la bomba de alimentación o bloquear las líneas de combustible, evitando fallas tempranas por obstrucción o abrasión de los componentes.
- **Filtro separador:** Estos filtros tienen como función la eliminación de agua contenida en el combustible, pues esta es generadora de corrosión interna por medio de la formación de óxidos que van desgastando las diferentes piezas del sistema. Como se observa en la Fig. 12, constan de un medio filtrante hidrofóbico o un sistema de coalescente que, aglomera las gotas de agua que se van depositando en el fondo del filtro, donde pueden ser drenadas por medio de la boquilla de purga.

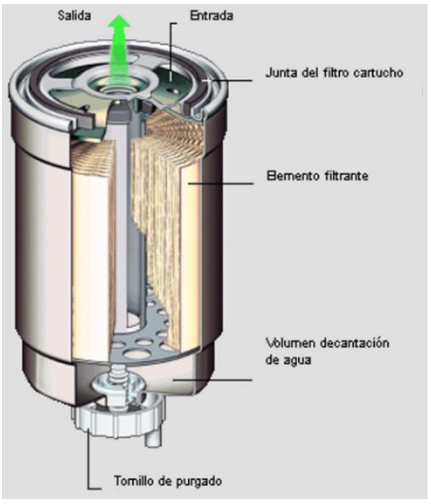


Fig. 12. Sección interna de un filtro separador.
Fuente: Baldwin [30].

- **Filtro para material particulado:** Estos filtros buscan retener partículas sólidas de menor tamaño como el polvo, sedimentos o restos metálicos. Dependiendo del sistema, estos filtros suelen estar en una etapa secundaria o final, siendo el último paso de control hacia la bomba de alta presión y los inyectores. Como medio filtrante se usan papeles tratados, fibras sintéticas y en algunos casos fibras de vidrio.

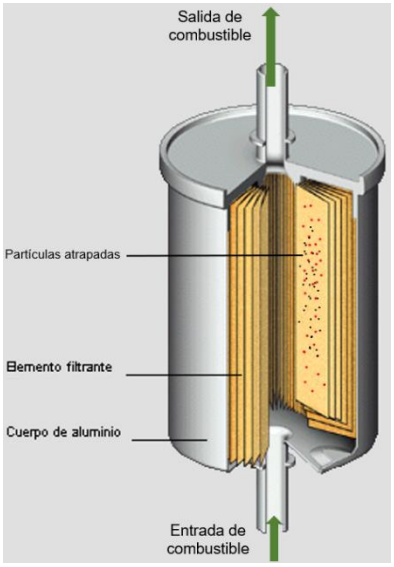


Fig. 13. Sección interna de un filtro de partículas.
Fuente: Baldwin [30].

D. Contextos operativos adversos para la filtración

En la operación de vehículos o maquinaria con motores diésel, las condiciones ambientales y del entorno de operación son un factor que incide directamente en el rendimiento de los sistemas de combustible, y por consiguiente de filtración. Los sistemas modernos de inyección han

evolucionado hacia una mayor eficiencia operativa, sin embargo, también son ahora sistemas más sensibles a las variaciones en la calidad del combustible y la presencia de polución externa. La exposición a estos entornos incrementa el riesgo de ingreso de contaminantes al circuito de combustible, lo que hace necesario un análisis cuidadoso de las condiciones en las cuales trabajará el vehículo para determinar si los sistemas de protección con los cuales cuenta son suficientes, si se requieren configuraciones auxiliares de protección más robustas, o no es posible que el equipo opere en dichas condiciones.

1. Presencia de polvo y partículas sólidas

Lo que consideramos como polvo, es en realidad una mezcla de distintos tipos de partículas abrasivas como arena, óxidos o tierra, las cuales además varían en tamaño llegando las más pequeñas a rangos de entre 100 µm y 10 µm, dependiendo del entorno específico. Si estas partículas llegaran a alcanzar las etapas finales del sistema de inyección, son altamente perjudiciales en términos de daños por corrosión, erosión y obstrucción de los componentes.

En estos sistemas críticos, la norma ISO 4406 recomienda códigos de limpieza no mayores a un nivel 18/16/13 para partículas de 4,6 y 14 µm respectivamente [31]. En la *tabla II* se muestran los códigos ISO de contaminación aceptables para diferentes aplicaciones.

TABLA II
CÓDIGOS SUGERIDOS DE CONTAMINACIÓN ACEPTABLE.

Número de código ISO	**Tipo de sistema**	**Componentes típicos donde aplica**	**Sensibilidad**
23 / 21 / 17	Sistemas de baja presión con grandes holguras	Bombas de ariete	Baja
20 / 18 /15	Nivel de limpieza típica de aceite hidráulico nuevo Sistemas industriales pesados de baja presión, donde la larga duración no es critica	Válvulas de control de flujo Cilindros	Media
19 / 17 / 14	Maquinaria general y sistemas móviles Equipos de media presión y capacidad	Bombas y motores de engranajes	Importante
18 / 16 / 13	Estándar de limpieza de la *Carta Mundial de Combustibles* para diésel suministrado en estaciones de recarga Sistemas fiables de alta calidad	Válvulas inyectoras Bombas de inyección de alta presión Válvulas direccionales y control de presión	Critico
17 / 15 /12	Sistemas altamente sofisticados y transmisiones hidrostáticas	Válvulas proporcionales	Critico
16 / 14 / 11	Servomotores de alto rendimiento y sistemas de alta presión	Máquinas herramienta para aeronaves Servoválvulas industriales	Critico
15 / 13 / 09	Sistema de control sensible a sedimentos con muy alta fiabilidad	Laboratorio o aeroespacial Servoválvulas de alto rendimiento	Super critico

NOTA: Códigos de contaminación aceptable para diferentes aplicaciones según la norma ISO 4406 [31].

2. Humedad en el combustible

La presencia de agua en el combustible puede manifestarse principalmente de tres formas: disuelta, cuando las partículas de agua son tan reducidas que se mezclan con el combustible a un nivel imperceptible a simple vista; emulsificada, cuando las gotas de agua se dispersan de forma estable en el combustible, formando una mezcla lechosa o turbia, denominada emulsión; o libre, cuando el agua forma una fase claramente diferenciable del combustible.

El contenido típicamente aceptable de agua disuelta ronda valores inferiores a 200 ppm, aunque según la temperatura de trabajo este valor puede variar entre las 50 ppm y 1800 ppm [32]. Para el caso de agua libre, la presencia de esta, incluso en concentraciones inferiores 100 ppm, genera un desgaste prematuro en los motores por corrosión interna de bombas e inyectores.

E. Criterios de selección de filtros para sistemas auxiliares

A la hora de diseñar un sistema de filtración auxiliar que complemente la labor de protección en un motor diésel, se deben evaluar distintos aspectos bajo un criterio técnico que permita garantizar la operatividad y efectiva protección del sistema, sin ir en detrimento del rendimiento del vehículo. Dentro de los principales aspectos para tener en cuenta, podemos destacar los siguientes:

- **Caudal y presión nominal de operación:** el filtro auxiliar seleccionado debe soportar un caudal continuo de combustible con un margen adicional de entre el 20-30% sobre el requerimiento del motor [33], con el fin de evitar reducción de flujo en las condiciones de operación de máxima demanda. De igual manera, el filtro auxiliar debe resistir la presión de alimentación del sistema, dependiendo del valor de trabajo en la sección específica del circuito donde este se ubique, sin comprometer la alimentación de la línea de combustible.
- **Eficiencia de filtración y tamaño de partículas presentes y admisibles:** el filtro debe contar con un micraje nominal y función de filtración acorde a su etapa. Por ejemplo, para ubicación primaria en el sistema, se debe contar con capacidad de retención de material particulado de tamaño medio, además de separación de agua. Mientras que para el caso de su aplicación en función secundaria o de seguridad, debe garantizarse una alta eficiencia en la retención de material alrededor de los 4 μm o inferior [33].

- **Resistencia mecánica y durabilidad de la adaptación:** En aplicaciones de "off-road"[7] o zonas que por sus condiciones generen vibraciones, posibles impactos u alguna otra condición que conlleve un deterioro rápido del elemento, el filtro debe contar con una carcasa o ubicarse en una zona protegida del vehículo, además de contar con un montaje capaz de resistir dichas condiciones [33]. Además, para evitar fallas y llevar un control del comportamiento del sistema, se recomienda incluir en el montaje un medidor de saturación que indique el estado del filtro, permitido tomar decisiones sobe el mantenimiento o reemplazo de este.

[7] vehículos y maquinarias diseñados para operar fuera de vías pavimentadas, en terrenos irregulares o condiciones severas, como en construcción, minería, agricultura o silvicultura.

IV. METODOLOGÍA

Para el desarrollo del proyecto, se planteó una estructura de trabajo compuesta por cinco fases principales, cada una con tareas específicas y tiempos estimados de ejecución. Esta organización permitió realizar un seguimiento continuo del progreso y estado de las actividades, facilitando la realización oportuna de ajustes y previniendo posibles problemas de ejecución. La clasificación general de las fases definidas se presenta en la Fig. 14.



Fig. 14. División por etapas del proyecto.

El desglose de las tareas correspondientes a cada fase del proceso tenía como objetivo alcanzar un diseño probado del sistema auxiliar de filtración de combustible, que respondiera a las necesidades funcionales del vehículo y garantice su operatividad en el entorno de trabajo específico.

A. Diagnóstico y análisis

La fase inicial de ejecución del proyecto se enfocó en la recopilación de la información relevante para realizar un análisis y formulación de una solución estructurada del problema planteado. En esta etapa, el objetivo fue identificar de forma general las necesidades de la solución, a fin de establecer los parámetros que orientaron las decisiones del proceso, como se esquematiza en la Fig. 15.

La recolección de información buscó proporcionar las herramientas necesarias para comprender las condiciones actuales del sistema de filtración de las camionetas Tunland, su funcionamiento y las posibles causas de avería. Para ello, se realizó la revisión de la documentación técnica suministrada por el fabricante a través de plataformas como el *Distribution Management System (DMS)* de la marca Foton, que incluye manuales de operación y reparación, listados de partes y repuestos, diagramas de sistemas y sistemas de diagnóstico, entre otros.

Asimismo, se consideró como fuente de gran valor los testimonios tanto de usuarios de estos vehículos como del personal técnico de Corautos encargados de las labores de mantenimiento y reparación de los vehículos. Estos aportes permitieron contextualizar las condiciones operativas, las consecuencias de cada condición adversa y las medidas que se toman en primera instancia para tratar de recuperar y mantener la operatividad de los equipos.

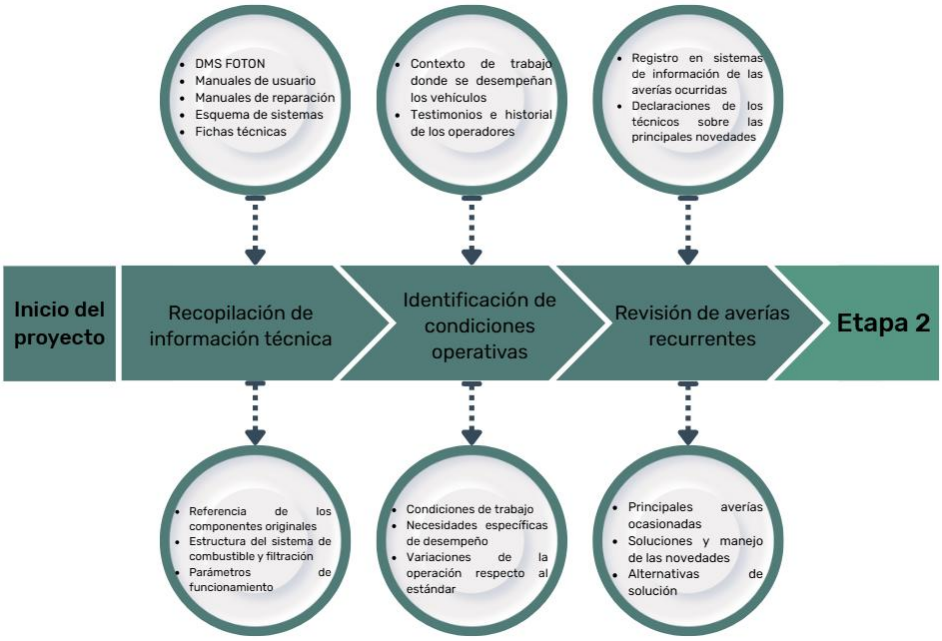


Fig. 15. Diagrama de flujo de la etapa 1.

B. Identificación y selección de alternativas

Con base en el diagnóstico previo, se realiza la búsqueda y comparación de alternativas para el desarrollo del sistema de filtración auxiliar, considerando las tecnologías disponibles y seleccionando aquella que mejor se ajuste a las necesidades establecidas, con el fin de garantizar la viabilidad técnica del proyecto, considerando la funcionalidad original del sistema y la que se desea alcanzar.

Una vez definida la tecnología, se procedió a la selección de la referencia específica de filtro a emplear, evaluando los productos disponibles en el mercado según aspectos como especificaciones técnicas, nivel de protección alcanzable, facilidad de integración al sistema y costos asociados a la operación. La evaluación de las alternativas se llevó a cabo mediante una matriz de selección que pondera la calificación de cada alternativa según criterios de eficiencia, mantenibilidad e impacto sobre el sistema original. Estos criterios se establecieron a partir de los análisis previos, asignando pesos relativos para cada uno en función de su relevancia e impacto sobre la elección final. La ruta de acción correspondiente a esta fase se muestra en la Fig. 16.

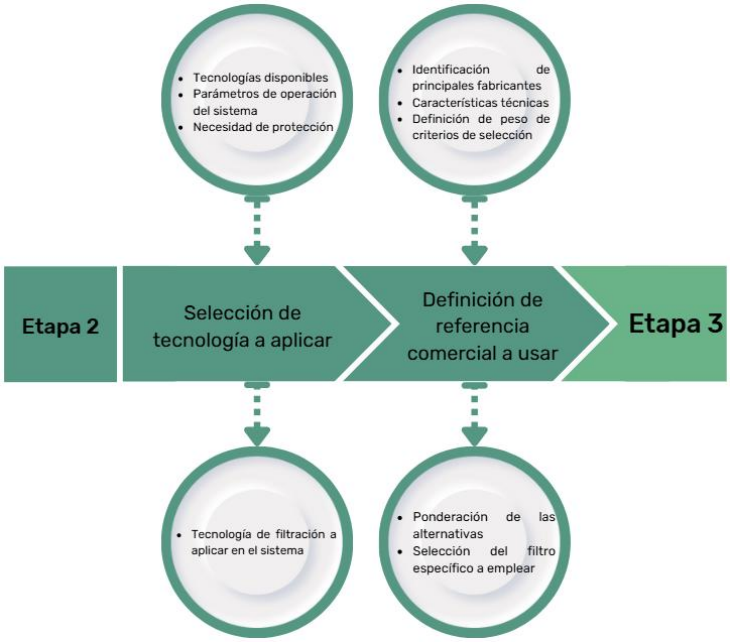


Fig. 16. Diagrama de flujo de la etapa 2.

Durante esta fase se buscó reducir la incertidumbre y dotar de más objetividad al proceso de toma de decisiones, con el propósito de asegurar un sistema viable desde su concepción para garantizar una base sólida para el desarrollo de las etapas posteriores.

C. Diseño del sistema

En esta fase, a partir de la alternativa seleccionada, se desarrolla el diseño detallado del sistema que es instalado posteriormente en los vehículos. El proceso inició con el análisis físico del espacio disponible en el cofre motor del vehículo, con el fin determinar el mejor lugar de instalación y, en consecuencia, el conjunto de componentes necesarios para el montaje en dicha ubicación.

La definición de los componentes necesarios contempló la identificación tanto de las partes disponibles comercialmente en el mercado, así como la identificación de aquellas partes que se diseñaron y fabricaron con características específicas para garantizar la sujeción y conexión completa y a conformidad de las partes. Para mayor claridad de la disposición y funcionamiento del conjunto de partes requeridas, se elaboraron modelos CAD por medio del software *Autodesk Inventor,* generando los planos y documentación técnica que especifica formas, dimensiones y materiales seleccionados, especialmente para los casos de fabricación de partes a medida, como las bases se sujeción del filtro o los acoples de conexión rápida para las mangueras.

El diseño se complementa con simulaciones de resistencia mediante análisis de elementos finitos (FEA) por medio del software *Fusion 360*, con el fin de validar la integridad estructural y

operativa de las partes. Adicionalmente, cuando se requirieron procesos específicos de fabricación, se realizó el diseño del proceso por medio de paquetes de manufactura de *Inventor* que incluyen el módulo de programación para maquinado por CNC, asegurando que las piezas se produjeran conforme a las necesidades de implementación.

El procedimiento general ilustrado en la Fig. 17, permitió contar con información técnica suficiente para futuros proyectos de implementación del sistema, permitiendo así procesos de mejora continua mediante la revisión de las actividades y calidad de los resultados. Al finalizar esta etapa, se disponía de un paquete técnico que facilitó la fabricación y montaje del prototipo, con la información suficiente para llevar a cabo el proceso de adaptación al vehículo sin inconvenientes.

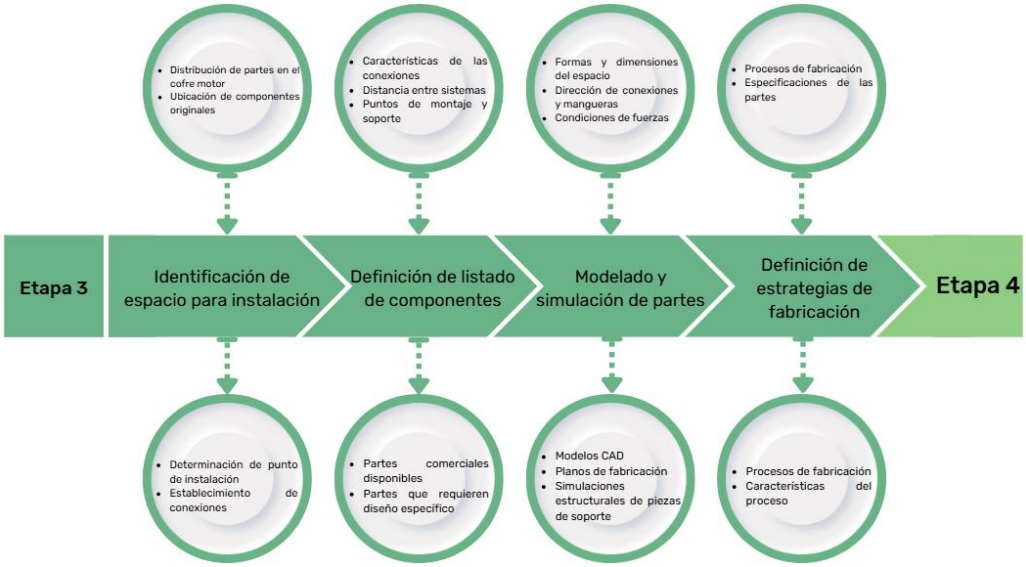


Fig. 17. Diagrama de flujo de la etapa 3.

D. Fabricación e instalación de prototipo

Con el diseño aprobado, se avanzó en la consolidación de las partes necesarias para avanzar con el montaje y pruebas del sistema, siguiendo las tareas indicadas en la Fig. 18. El objetivo de esta etapa fue materializar todo lo plasmado en la fase de diseño, validando, ajustando o rediseñando en caso de ser necesario, los resultados previos. En este punto se llevó a cabo la fabricación o adquisición de los componentes definidos, así como las adaptaciones estructurales requeridas tanto en el vehículo como en el sistema de filtración original.



Fig. 18. Diagrama de flujo de la etapa 4.

El proceso inició con la identificación de referencias de productos disponibles en el mercado que cumplieran con las características del diseño planteado y pudieran adquirirse a través de los proveedores locales. En los casos en donde no se identificó un producto comercial adecuado, o cuando las características específicas de la parte lo requirieran, se procedió a su fabricación con la elaboración de prototipos para validar el funcionamiento esperado. Confirmada su viabilidad, se estandarizó el proceso de fabricación y se establecieron proveedores capaces de suministrar los componentes en la cantidad, material y calidad necesarios para la adaptación de los vehículos. De esta manera, se conformó una cadena de suministros clara y confiable, a la cual recurrir según la demanda para adquisición o reposición de partes asociadas al sistema auxiliar.

Con todas las piezas requeridas disponibles, y con el apoyo del personal técnico, se llevó a cabo la instalación del sistema. Esto incluyó las adaptaciones y el montaje de los componentes, garantizando una correcta integración entre el sistema original del vehículo y el sistema auxiliar diseñado. El montaje garantizó seguridad, sin fugas ni interferencia en otros sistemas, de forma que el vehículo quedó completamente operativo.

E. Validación del sistema

En la etapa final del proceso se evaluó el desempeño del sistema de filtración auxiliar en condiciones reales de operación. Para ello se realizó un análisis comparativo entre el funcionamiento del vehículo antes y después de la instalación del filtro auxiliar, mediante el

monitoreo de parámetros de funcionamiento como rendimiento del motor, incidencia de averías asociadas al combustible, respuesta del sistema a los niveles de carga y operación, entre otros.

Durante este seguimiento se recopilaron los datos técnicos y se documentaron los hallazgos más representativos, permitiendo validar el funcionamiento del sistema y establecer recomendaciones finales para su implementación a mayor escala. La integración de las pruebas con todo el análisis técnico previo cerró el ciclo metodológico, como se observa en la Fig. 19, asegurando el cumplimiento de los objetivos de calidad, seguridad y rendimiento definidos para dar respuesta a la necesidad inicial de la aplicación.

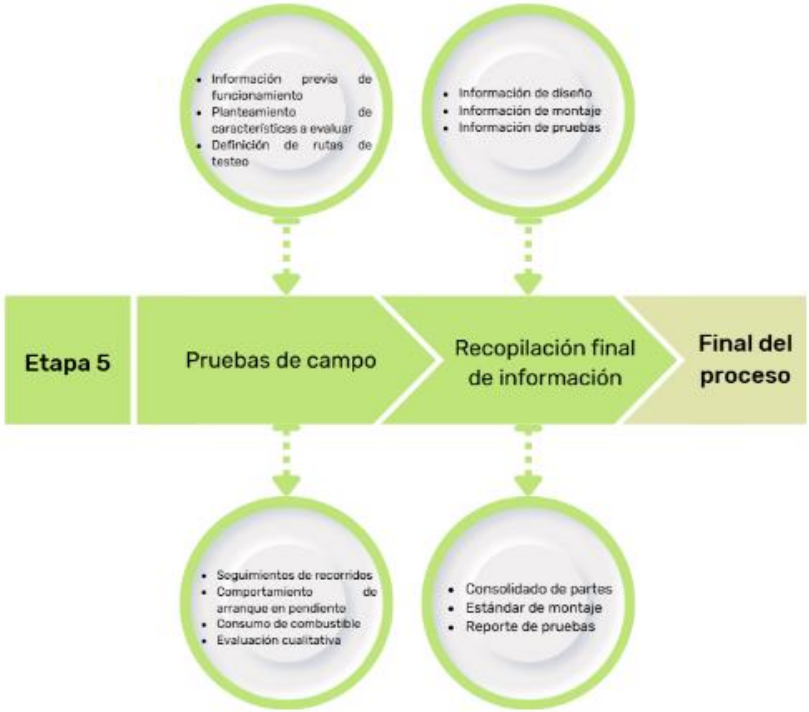


Fig. 19. Diagrama de flujo de la etapa 5.

V. RESULTADOS

A. Diagnóstico y análisis del problema

El diagnóstico del sistema parte de una necesidad identificada en la operación de las camionetas Tunland de la marca FOTON en un entorno de campo petrolífero. Según se reporta por parte de los operarios de los vehículo, las camionetas se ven afectadas por las altas concentraciones de polvo, humedad y otros contaminantes, en niveles muy por encima de los que se reportan en entornos urbanos o semirrurales para los que originalmente fueron diseñadas estas unidades de camionetas, generando recurrencia de algunos tipos de fallas, debido a la alta carga al sistema de filtración de combustible, repercutiendo de forma negativa en el desempeño de los vehículos.

En primer lugar, se realiza una caracterización del sistema de combustible, específicamente del sistema de filtración empleado en la actualidad. Para esto se parte de una revisión de la documentación técnica de las camionetas como los manuales de operación y mantenimiento.

El manual especifica que para el mejor rendimiento del motor de las camionetas se debe emplear combustible diésel con una especificación de <50 ppm, como se observa en la Fig. 20. Sin embargo, dicho valor corresponde al estándar de contenido admisible de azufre en combustible y no está relacionado con una especificación de calidad en términos de presencia de contaminantes o material particulado.

Posición	Lubricación y combustible recomendado	Cantidad
Combustible para el motor	ACPM < 50ppm	18.5 Galones
Aceite para el motor	CASTROL CRB Plus 15W-40/Vecton 15W-40	6 Cuartos
Aceite de caja	80W-90 GL-4	3 Cuartos
Aceite diferencial	80W90 / 85W90 GL5	3 Cuartos
Aceite Dirección	ATF-III	Verificar nivel
Caja de Transferencia	ATF (Dexron III)	
Grasa general	Grasa Multipropósito	N/A
Grasa especial para rodamientos	CASTROL Wheel Bearing Grease / BG SS2000	N/A
Refrigerante	EXRO RADIOX HD PREMIUM ELC	Verificar nivel
Líquido de frenos	DOT 4	Verificar nivel
Liquido batería	Líquido para batería	N/A
Aspersor de agua limpia brisas (mionas)	Agua y Jabón con PH neutro.	Verificar nivel

Fig. 20. Tipo de fluidos y cantidad.

NOTA: La información de la imagen corresponde a la recomendación del fabricante en cuanto a tipo de fluidos para los diferentes sistemas del vehículo. Fuente: Manuales Tunland [34].

En los manuales no se especifica un valor de referencia para los requerimientos de filtración del sistema de combustible. Ahora, teniendo en cuenta las características del motor empleado por el vehículo, y específicamente el uso de sistema de inyección *Common rail*, manuales técnicos de automoción como el del fabricante BOSCH, definen que para garantizar el correcto funcionamiento del sistema, a las altas presiones de operación, se debe contar con filtración de partículas de hasta

5 µm con una eficiencia de al menos 85%, además de separación de agua con eficiencia ≥95 % para agua libre y emulsionada con niveles máximos posfiltro de 200 mg agua/ kg combustible [35].

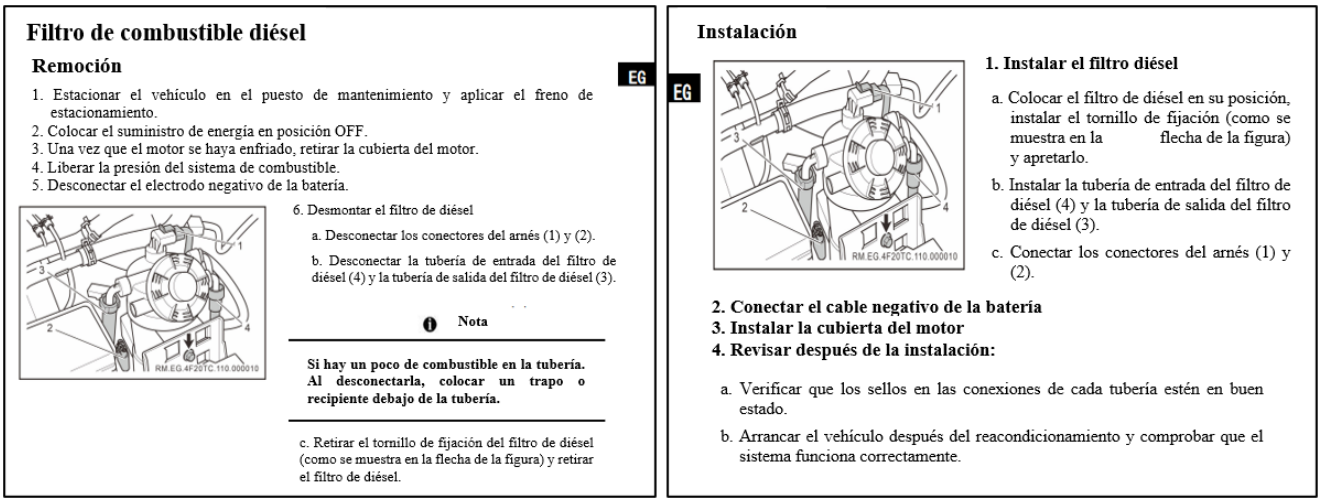
En términos de mantenimiento, en la Fig. 21 se presentan los intervalos de inspección y reemplazo para el filtro de combustible, donde se evidencia que no hay una diferenciación entre un vehículo en condiciones generales de uso y aquellos con trabajo en condiciones más severas, estableciendo un primer cambio a los 5000 kilómetros de uso, para posteriormente realizar el reemplazo de la parte cada 10000 kilómetros. La falta de una recomendación para el cambio de componente en condiciones severas se debe a la variabilidad de dichas condiciones en distintos escenarios de aplicación. Por lo cual, se recomienda seguir el estándar de reemplazo de las condiciones generales de uso mientras se genera un historial de operación que permita establecer rutinas de mantenimiento más ajustadas al contexto operacional específico.

Descripción	**Intervalo de inspección (lo que ocurra primero, lectura del odómetro y número de meses)**																		
	Mes	—	**3**	**6**	**9**	**12**	**15**	**18**	**21**	**24**	**27**	**30**	**33**	**36**	**39**	**42**	**45**	**48**	**51**
	Lectura del odómetro×1000 km	**1**	**5**	**10**	**15**	**20**	**25**	**30**	**35**	**40**	**45**	**50**	**55**	**60**	**65**	**70**	**75**	**80**	**85**
Compruebe si el elemento filtrante de cenizas está obstruido o dañado	Condición general de uso							I						I					
	Condición severa de uso				I			I			I			I			I		
Otras revisiones																			
Reemplazar el aceite de motor	Condición general de uso	El primer mantenimiento es a los 5.000 kilómetros o 6 meses, y luego se reemplaza cada 10.000 kilómetros o 12 meses																	
	Condición severa de uso	Por favor, consulte a su distribuidor autorizado local para el mantenimiento y la reparación, ya que el vehículo será conducido en ambientes y condiciones duras durante mucho tiempo.																	
Reemplazar el filtro de combustible	Condición general de uso	El primer mantenimiento es a los 5.000 kilómetros o 6 meses, y luego se reemplaza cada 10.000 kilómetros o 12 meses																	
	Condición severa de uso	Por favor, consulte a su distribuidor autorizado local para el mantenimiento y la reparación, ya que el vehículo será conducido en ambientes y condiciones duras durante mucho tiempo.																	
Reemplazar el filtro de combustible	Condición general de uso	El primer mantenimiento es a los 5.000 kilómetros, y luego se reemplaza cada 10.000 kilómetros																	
	Condición severa de uso	Kilometraje de reemplazo y las condiciones generales de uso																	
Reemplazar el elemento filtrante del filtro de aire	Condición general de uso	R primero 10.000 km, luego cada 20.000 km o cada 12 meses, I cada 10.000 km o cada 6 meses																	
	Condición severa de uso	R primero 5.000 km, luego cada 10.000 km o cada 6 meses																	
Reemplazar los filtros de cenizas y los tubos de conexión	Condición general de uso	60.000 km o 36 meses para reemplazar una vez																	
	Condición severa de uso	30.000 km o 18 meses para reemplazar una vez																	

Fig. 21. Intervalos de mantenimiento recomendados.

NOTA: La información de la imagen es una recomendación inicial del fabricante para la inspección y reemplazo de diferentes componentes. Estos intervalos se aplican en primera instancia, pero pueden modificarse en función de las condiciones operativas específicas. Fuente: Manuales Tunland [34].

De los manuales también se extrae la información de la Fig. 22, en la cual se explica el procedimiento de desmontaje y montaje del filtro diésel del sistema de combustible de los vehículos, procedimiento que se realiza en una de las camionetas para observar el sistema original con el cual cuentan.



Filtro de combustible diésel

Remoción

EG

1. Estacionar el vehículo en el puesto de mantenimiento y aplicar el freno de estacionamiento.
2. Colocar el suministro de energía en posición OFF.
3. Una vez que el motor se haya enfriado, retirar la cubierta del motor.
4. Liberar la presión del sistema de combustible.
5. Desconectar el electrodo negativo de la batería.

6. Desmontar el filtro de diésel
   a. Desconectar los conectores del arnés (1) y (2).
   b. Desconectar la tubería de entrada del filtro de diésel (4) y la tubería de salida del filtro de diésel (3).

Nota

Si hay un poco de combustible en la tubería. Al desconectarla, colocar un trapo o recipiente debajo de la tubería.

   c. Retirar el tornillo de fijación del filtro de diésel (como se muestra en la flecha de la figura) y retirar el filtro de diésel.

Instalación

EG

1. Instalar el filtro diésel

a. Colocar el filtro de diésel en su posición, instalar el tornillo de fijación (como se muestra en la flecha de la figura) y apretarlo.

b. Instalar la tubería de entrada del filtro de diésel (4) y la tubería de salida del filtro de diésel (3).

c. Conectar los conectores del arnés (1) y (2).

2. Conectar el cable negativo de la batería
3. Instalar la cubierta del motor
4. Revisar después de la instalación:

a. Verificar que los sellos en las conexiones de cada tubería estén en buen estado.

b. Arrancar el vehículo después del reacondicionamiento y comprobar que el sistema funciona correctamente.

Fig. 22. Instrucciones de remoción e instalación del filtro.

NOTA: La imagen es una traducción al español del manual original en inglés, con las instrucciones para la remoción e instalación el filtro de combustible . Fuente: Manuales Tunland [34].

Una vez que se realiza el procedimiento de desmonte del filtro con el cual cuenta el vehículo, se revisan las características de la carcasa o filtro trampa, que se observe en la Fig. 23**a**, con el fin de determinar las opciones de intervención en el sistema. Luego se procede a extraer de la carcasa el elemento filtrante de tipo cartucho que se muestra en la Fig. 23**b**.

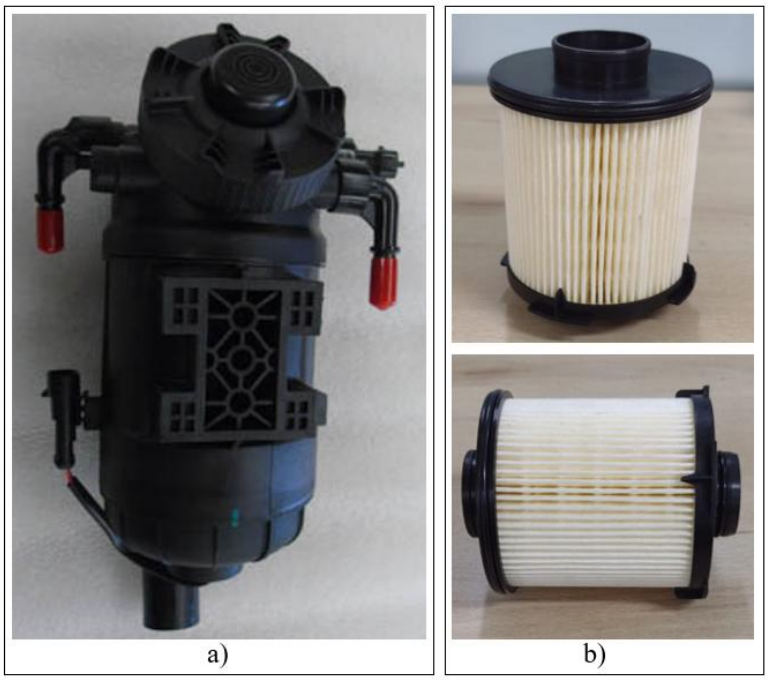


Fig. 23. Filtro de combustible de las camionetas Tunland.
a) Carcasa b) Elemento filtrante.

En el momento de analizar los componentes del sistema, se encuentra que en primera instancia no se evidencia capacidad de separación de agua en el filtro. Para definir las

características específicas de este filtro, se busca la referencia de la parte, para lo cual se recurre a la plataforma *Global DMS* [36] que emplea la marca FOTON para registrar y compartir con sus socios internacionales información como los listados de partes, referencia de componentes y diagramas de los distintos sistemas que componen los vehículos que se comercializan de la marca. De esta base de datos se obtiene el esquema de la Fig. 24, en la cual se identifican las diferentes partes que componen el sistema de combustible, especificando la configuración, ubicación y relación con otros componentes del filtro con el cual cuenta la línea de combustible. De esta misma plataforma y con base en las partes que se muestran, se obtiene el listado de la *tabla III,* donde se especifica la referencia y número de parte por medio del cual se identifican los componentes y se puede acceder a la información específica suministrada comercialmente para el elemento filtrante.

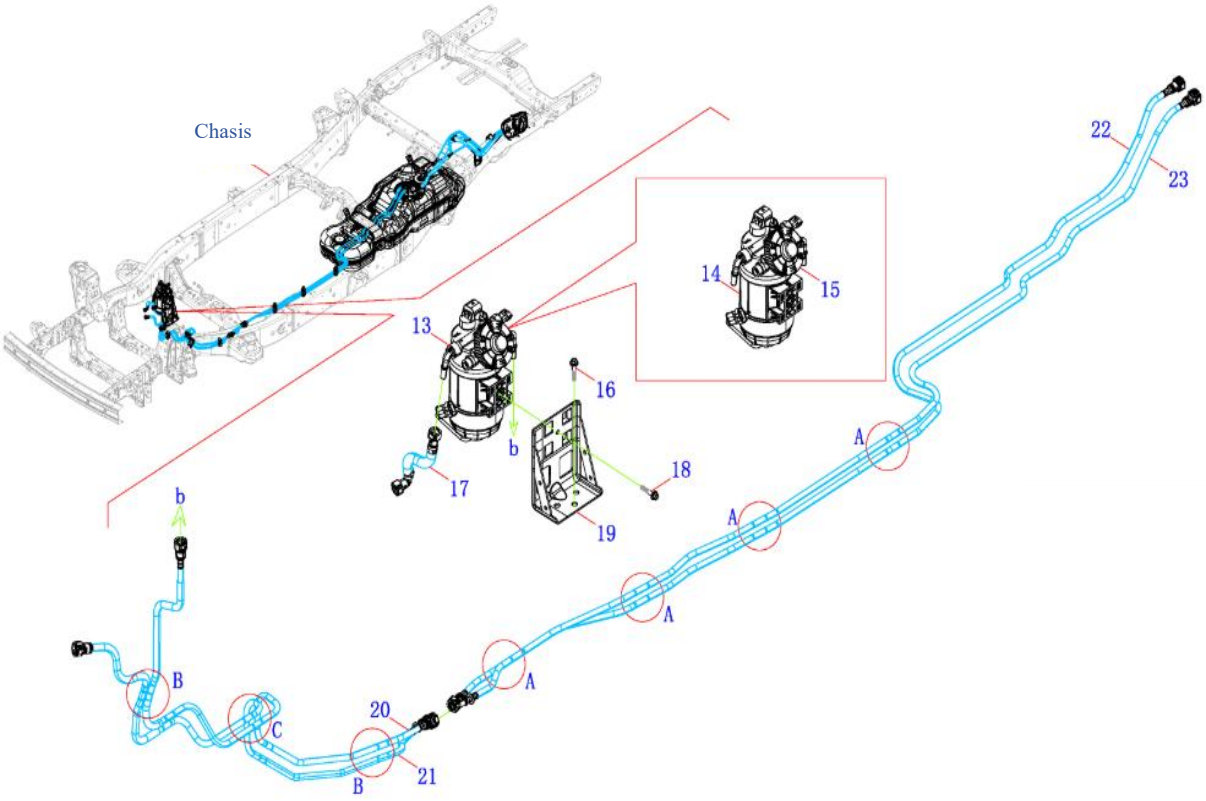


Fig. 24. Esquema del sistema y sus partes.
Fuente: DMS [36].

TABLA III
REFERENCIA DE PARTES SISTEMA DE COMBUSTIBLE.

Número serial	Número de parte	Nombre de la parte
13	P111000000201	Ensamble filtro diésel
14	P111000000245	Elemento filtrante
15	P111000000246	Carcasa del filtro
16	Q1841020F61	Perno hexagonal
17	P111000000190	Línea de alimentación del filtro al motor
18	Q1840812F61	Perno hexagonal
19	P111000000195	Soporte del filtro
20	P111000000189	Línea de alimentación del tanque al filtro
21	P111000000205	Línea de retorno del motor al tanque
22	P111000000188	Tubería de retorno
23	P111000000187	Conjunto de la línea de diésel

Fuente: DMS [36].

Una vez que se conoce la referencia del elemento filtrante usado en los vehículos, se procede con la búsqueda de información sobre sus propiedades y características, las cuales se registran en la *tabla IV*. En esta parte se evidencia que el filtro cumple con una capacidad de filtrado de partículas cercanas a los 5 µm, tal y como se recomienda para la protección de los inyectores empleados en este tipo de vehículos. Sin embargo, considerando que las camionetas van a operar en entornos de alta concentración de material particulado, los elementos pueden saturarse rápidamente, reduciendo el rendimiento del motor. A esto se suma que el filtro no cuenta con capacidad de separación de agua en combustible, aumentando los riesgos de afectación en los componentes que se encuentran posterior a la protección.

TABLA IV
CARACTERÍSTICAS DEL FILTRO.

Parámetro	Especificación
Función	Filtración de polvo, separador de partículas grandes y finas
Micraje nominal	Retención de partículas hasta entre 5-10µm
Eficiencia de filtrado	Alta eficiencia ~98%
Separación de agua	Sin función de coalescencia o decantación
Mantenimiento	Elemento filtrante reemplazable

Identificadas las características del sistema y los componentes, se procede a reunir información sobre las averías que se han presentado en diferentes unidades. En los manuales de las camionetas se presenta un pequeño formato de preguntas, el cual se muestra en la Fig. 25*,* mediante el cual se busca que los técnicos de reparación y mantenimiento realicen un registro de las

novedades operativas que presentan los vehículos con base a las observaciones realizadas al momento de intervenir el vehículo, así como contar con el testimonio de los conductores quienes conocen algunos de los síntomas de primera mano durante la operación. Luego, con base en dicha información registrada, se realiza análisis más completos de diagnóstico sobre las anomalías más recurrentes.

¿Cuál es el caso?	Nombre de la condición y la parte o sistema afectado
¿Cuándo?	Momento y frecuencia de ocurrencia
¿Donde?	Estado de la carretera
¿Cuáles son las condiciones?	Condiciones de circulación, manejo y meteorológicas
¿Cómo ocurrió?	Síntomas, indicios de avería o anormalidad

Fig. 25. Esquema de diagnóstico de causa de averías.

Con la información de averías registradas, se detecta que la recurrencia de problemas en varias camionetas del cliente que opera en zonas de extracción petrolífera corresponde específicamente a daños en el sistema de combustible, tal como se evidencia en la *tabla V* con los registros realizados sobre los casos más relevantes que se trataron.

TABLA V
RESUMEN DE NOVEDADES EN LAS CAMIONETAS.

	Síntomas	Hallazgos	Manejo del problema
1	Pérdida de potencia en subida con carga. Aceleración intermitente	Obstrucción parcial de inyectores por partículas	Inspección de inyectores: filtro primario saturado, presencia de sedimento y lodo. Cambio de filtro
2	Arranque difícil en frío. Humo gris y ralentí inestable	Agua libre/emulsionada en el combustible y contaminación de inyectores	Purgado del sistema, drenaje del agua acumulada y reemplazo de filtro primario
3	Se enciende “Check Engine” con código de baja presión en riel; el motor con baja potencia	Contaminación afectó sensor y filtro colmatado	Cambio de sensor de presión y de filtro; limpieza de tuberías de alimentación
4	Tironeo del motor a velocidad constante. Sin alertas en tablero	Contaminación en la línea de combustible por agua no separada inicialmente	Limpieza de línea y revisión de sistema
5	Consumo irregular y falta de respuesta al acelerar	Obstrucción parcial de suministro de combustible por lodo	Cambio de filtro, drenaje del agua acumulada y ajuste de la bomba de baja presión
6	Filtro de combustible colapsado tras solo 1.000 km	Entrada masiva de partículas gruesas sin pre-filtrado adecuado.	Reemplazo de filtro primario; ajuste de cronograma de cambio
7	Bomba HP no mantiene presión. Fallos de arranque del vehículo	Daño por abrasión en componentes internos de la bomba HP causado por partículas no filtradas.	Desmontaje de bomba HP: se constató desgaste. Reemplazo de bomba y filtro; plan de filtración auxiliar

De la información registrada se puede observar que las averías relacionadas a disminución del rendimiento, la perdida de potencia, problemas en el sistema de combustible y demás anomalías asociadas, tienen su origen en problemas con la filtración del combustible y los daños que esto puede ocasionar en distintas etapas y componentes de varios sistemas relacionados con el transporte y/o aprovechamiento del combustible diésel y que se encuentra con una alta carga de contaminantes. Incluso se evidencia que, en varios de los casos analizados, no solo se recomienda tomar una acción correctiva inmediata, sino estructurar soluciones que abarquen el problema raíz por medio de alternativas como un sistema de filtración auxiliar, recomendación que se toma y desarrolla por medio del presente proyecto.

B. Identificación y selección de alternativas

1. Definición de tecnología a usar

De acuerdo con las condiciones específicas de operación y los requerimientos del sistema auxiliar de filtrado, se procede con la definición del tipo de filtro que se empleará. Para esto, se analizan las alternativas con respecto a la *función específica,* de acuerdo con las categorías definidas en el marco teórico numeral *C-2. Tipos de filtración,* destacando principalmente los filtros separadores, filtros de partículas y los filtros de succión. En la *tabla VI* se identifican los rangos de las principales especificaciones de operación para los diferentes tipos de filtros clasificados por su función.

TABLA VI
ALTERNATIVAS DE TIPOS DE FILTRACIÓN DISPONIBLES.

Características técnicas	**Filtro separador**	**Filtro de partículas**	**Filtro de succión**
Tamaño de filtración	5-10 µm	2-30 µm	> 50 µm
Capacidad de separación de agua	> 95%	N.A	N.A
Caudales de operación soportados	20-60 L/h	30-80 L/h	30-80 L/h
Vida útil promedio	15000-30000 km	10000-20000 km	7000-15000 km

Fuente: Filtros Donaldson [25].

Teniendo en cuenta el diagnóstico realizado en la fase previa, en donde se identifica que el combustible tiene una alta carga de material contaminante y presencia de agua, debido a las condiciones ambiente del entorno de operación; así como que el elemento filtrante empleado en la actualidad no cuenta con capacidad especifica de separación de agua, y la alta carga de material particulado tiende a saturarlo con rapidez, se tiene clara la necesidad principal de contar con un

filtro que funcione tanto como barrera a la humedad presente en el entorno y en el combustible, como un soporte adicional para la retención de partículas.

Considerando las características operativas de cada tipo de filtro que se muestra en la *tabla VI,* se opta por emplear filtros de tipo separador para cubrir las necesidades de retención tanto de agua, como de material particulado. A partir de esta decisión, se procede con la selección del filtro especifico a emplear en el sistema.

2. Alternativas disponibles en el mercado

En el mercado global de filtración de combustible destacan varios fabricantes reconocidos por la calidad y confiabilidad de sus productos. Entre los principales fabricantes están: Donaldson, Fleetguard, Baldwin, Mann Hummel y Facet. Estas marcas, según lo requerido en este proyecto, ofrecen filtros que combinan eficiencia de retención de partículas con sistemas integrados de separación de agua, mediante tecnologías de medios coalescentes o multicapa.

En el contexto nacional, las marcas con mayor presencia y respaldo técnico-comercial son Fleetguard, Donaldson y Baldwin, encontrándose en un segundo escalón marcas como Hifi y Wix, que también tiene participación en las aplicaciones locales, pero con una menor escala. Con esto, se cuenta con redes de distribución, servicio posventa y disponibilidad para realizar los mantenimientos, aunque la cantidad de unidades en stock y la capacidad de reabastecimiento varía según la presencia de marca en lugares específicos del país.

De la revisión, se identificaron las alternativas comerciales que cumplen las necesidades de retención y separación. Adicionalmente, dentro de la información identificada se cuenta con filtros que tienen compatibilidad con el motor empleado por las camionetas, por lo tanto, se asegura que la modificación realizada al sistema no genere un detrimento operativo de las unidades vehiculares. Dichas referencias identificadas se muestran en la *tabla VII*.

TABLA VII
REFERENCIAS DE FILTROS IDENTIFICADAS.

Marca	Referencia	Imagen	Características
Fleetguard	FS19612		• Separador con drenaje • Medio filtrante de celulosa hidrofóbica • Retención de partículas ~10 µm, agua libre ~95 %
Donaldson	P551436		• Separador con drenaje • Medio filtrante de celulosa multicapa • Retención de partículas ~15 µm, agua libre ~95 %
Baldwin	BF7699-D		• Separador con drenaje • Medio filtrante de celulosa multicapa • Retención de partículas ~9 µm, agua libre ~95 %
Hifi	SN70182		• Separador con drenaje • Medio filtrante de celulosa tradicional • Retención de partículas ~15 µm, agua libre ~90 %
Wix	WIX33748		• Separador con drenaje • Medio filtrante de celulosa tradicional • Retención de partículas ~20 µm, agua libre ~80 %

En la tabla, se observa que todas las referencias cuentan con retención de partículas, la cual varía en los valores absolutos, pero cumplen con el requerimiento de aliviar la carga de material particulado sobre el filtro principal que se encargará de atrapar el material más fino antes de que el combustible alcance el sistema de inyección y el motor. Adicionalmente, las alternativas cuentan con la capacidad de separación de agua, lo cual suplirá la carencia de dicha característica en el elemento filtrante original. Con la información depurada, se procede con la selección final mediante la realización de una matriz de ponderación y selección, que permita una evaluación técnica y objetiva.

3. Ponderación y selección

Para la ponderación de las alternativas, se procede con la definición de los criterios y su peso porcentual de acuerdo con su importancia y funcionalidad. En la *tabla VIII* se especifican los criterios de evaluación que, de acuerdo con las necesidades del sistema diseñado y el contexto en el cual se realiza, son los más importantes a la hora de definir el elemento.

TABLA VIII
CRITERIOS DE EVALUACIÓN DE LOS FILTROS.

Criterio de evaluación	Peso del criterio (%)	Descripción
Capacidad de filtración	25	Capacidad de retención de partículas finas
Separación de agua	25	Eficiencia de separación de agua libre / emulsionada
Compatibilidad / Tamaño	17	Facilidad de instalación sin grandes intervenciones en el vehículo
Precio	16	Costo estimado en COP en el mercado nacional
Caudal nominal	12	Compatibilidad con sistemas common rail (~15 L/min)
Disponibilidad	5	Facilidad para conseguirlo: Plazos de entrega, distribuidores, etc.

La definición de los criterios y sus pesos o importancia en la selección se realiza mediante un promedio de los valores dados individualmente de manera propia y por otras personas del área de mantenimiento y de ingeniería de la empresa, allí se observa como los parámetros más importantes son aquellos que de forma técnica dan respuesta a la protección de los componentes del motor y sistema de inyección que se estaban viendo afectados por la alta presencia de material particulado y agua. Luego, se encuentra la compatibilidad del filtro, pues al ser las camionetas fabricadas por una marca externa, es reducido el nivel de intervención que se puede realizar sin generar cambios mayores en el diseño o configuración. Posteriormente, está el costo total, el cual está asociado a la adaptación y su viabilidad en comparación a los mantenimientos que se realizan en la actualidad para corregir las averías relacionadas a la filtración de combustible. También se tiene en cuenta que el sistema auxiliar no genere restricciones en la operación por reducción de caudal, y que los accesorios utilizados se puedan encontrar disponibles de forma local para agilizar el montaje y reemplazo en los vehículos cuando sea necesario.

Una vez que se han definido los criterios y pesos relativos para cada uno de los filtros, se procede a establecer una escala de calificación con base en la cual se le asignará el puntaje a cada alternativa en cada una de las categorías evaluadas, tal como se especifica en la *tabla IX.*

TABLA IX.
ESCALA DE PUNTUACIÓN PARA LOS CRITERIOS.

Criterio	**Puntuación**				
	5	4	3	2	1
Capacidad de filtración	≤10 µm	≤15 µm	≤20µm	≤25 µm	>25 µm
Separación de agua	≥98 %	≥95 %	80-94%	<80 %	Sin separación activa
Compatibilidad	Instalación directa sin adaptadores ni modificaciones	Requiere adaptador común o base estándar	Necesita modificaciones leves en ubicación	Rediseño del sistema original (líneas, espacio)	Incompatible sin intervención estructural significativa.
Precio (COP)	<120.000	120.000 – 150.000	150.000 – 180.000	180.000 – 220.000	>220.000
Caudal nominal (L/min)	≥20	15-19	12-14	<12	<10
Disponibilidad	Disponible en tiendas locales o distribuidores nacionales con entrega inmediata.	Disponible bajo pedido nacional en menos de 1 semana.	Disponibilidad limitada. Tiempo de espera de 1–2 semanas	Solo disponible por importación directa. Tiempo ≥3 semanas.	Solo por proveedor exclusivo internacional.

Finalmente, en la *tabla X* se registran las puntuaciones asignadas a cada opción de filtro con base en la información de las fichas técnicas suministradas por los fabricantes, las cuales se contrastan con el desglose de los ítems realizado en la *tabla IX.* De esta manera, se procede con la ponderación de las puntuaciones por medio de los pesos definidos para cada criterio y se obtiene la puntuación final para cada una de las referencias de filtro.

TABLA X
EVALUACIÓN DE LAS ALTERNATIVAS.

Filtro	**Criterio**						**Ponderación**
	Filtración	Separación agua	Compatibilidad	Precio	Caudal nominal	Disponibilidad	
FS19612	5	4	4	4	5	4	4.37
P551436	4	4	4	3	5	3	3.91
BF7699-D	5	4	4	4	4	4	4.25
SN70182	4	3	3	4	4	3	3.53
WIX33748	3	3	4	3	3	3	3.17

Luego de realizar la ponderación, se evidencia que dos alternativas, el FS19612 de Fleetguard y el BF7699-D de Baldwin, sobresalen entre las demás con puntuaciones por encima de 4. Ahora bien, considerando la cercanía entre las notas de los dos filtros más opcionados y que

la única diferencia se encuentra en el caudal de operación, el cual es menor en el BF7699-D, sin que esto implique una restricción operativa, se opta finalmente por la elección del filtro de la marca Baldwin mostrado en la Fig. 26, teniendo presente que en la actualidad Corautos ya cuenta con varios proveedores que representan la marca y tienen la capacidad de suministrar dichos filtro de forma rápida, facilitando además el acceso a otros elementos y componentes para su instalación.



Fig. 26. Filtro seleccionado para el sistema auxiliar.

C. Diseño del sistema

1. Identificación de componentes necesarios

Ya que se ha seleccionado el filtro a emplear en el montaje del sistema auxiliar, es necesario establecer los demás componentes y accesorios que se requieran para garantizar el correcto montaje y puesta en marcha del sistema. Para esto, se procede a definir el espacio físico que ocupará el filtro, de manera que se identifique la forma de sujeción, los tipos de conexiones, la longitud de las mangueras, etc. En la Fig. 27 se observa el espacio del cofre motor, donde en el recuadro (1) se señala la posición del filtro principal con el cual cuentan las camionetas y el recuadro (2) muestra un detalle del tipo de conexiones usadas entre el filtro y las mangueras.

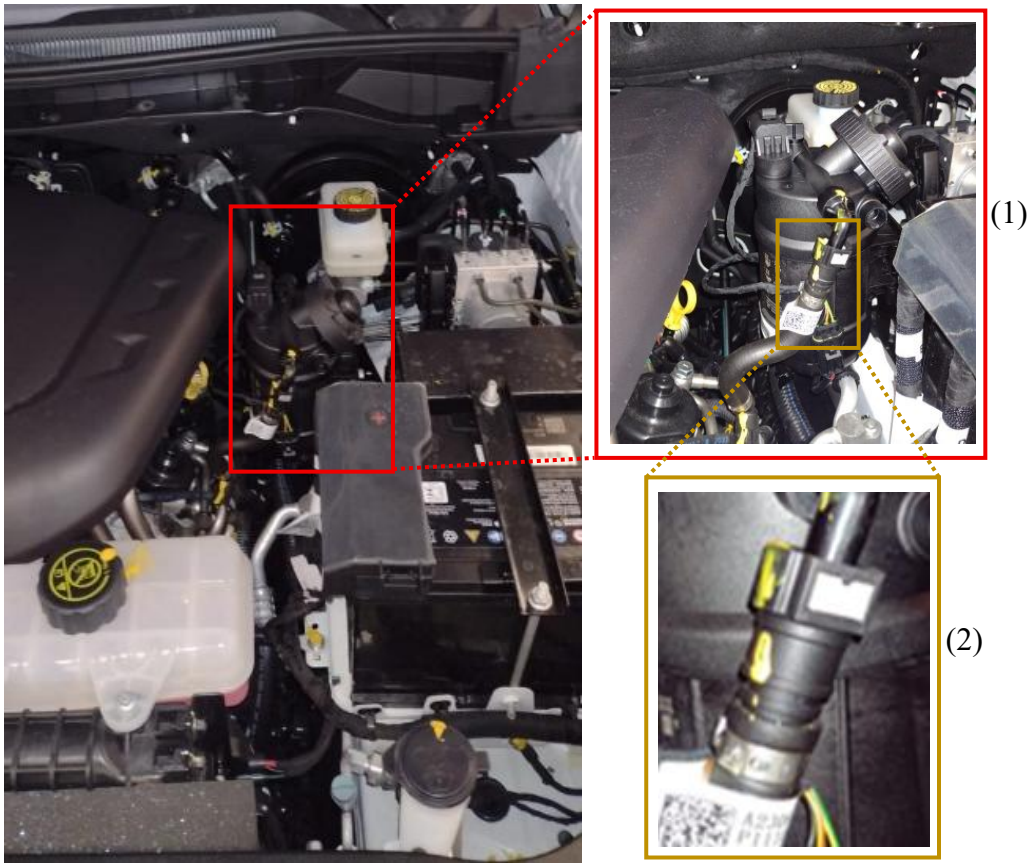


Fig. 27. Sistema de filtración original.

Para el funcionamiento del sistema, el propósito es que el filtro original cumpla la función de retención de partículas finas, mientras que el filtro auxiliar se encargue de la separación de agua y la reducción de carga de material particulado que llega al filtro principal. En este sentido, tal como se ilustra en la Fig. 28, las modificaciones que se deben realizar en las conexiones del filtro original del sistema son las siguientes:

- Se desconecta la manguera que alimenta el combustible desde el tanque hasta el filtro principal
- La manquera que va desde el tanque se conecta ahora a la entrada del filtro auxiliar
- Desde la salida del filtro auxiliar se instala una nueva manguera que lleve el combustible hasta la entrada de alimentación del filtro principal
- Se mantiene la conexión desde la salida del filtro principal hasta la admisión del sistema de inyección del motor

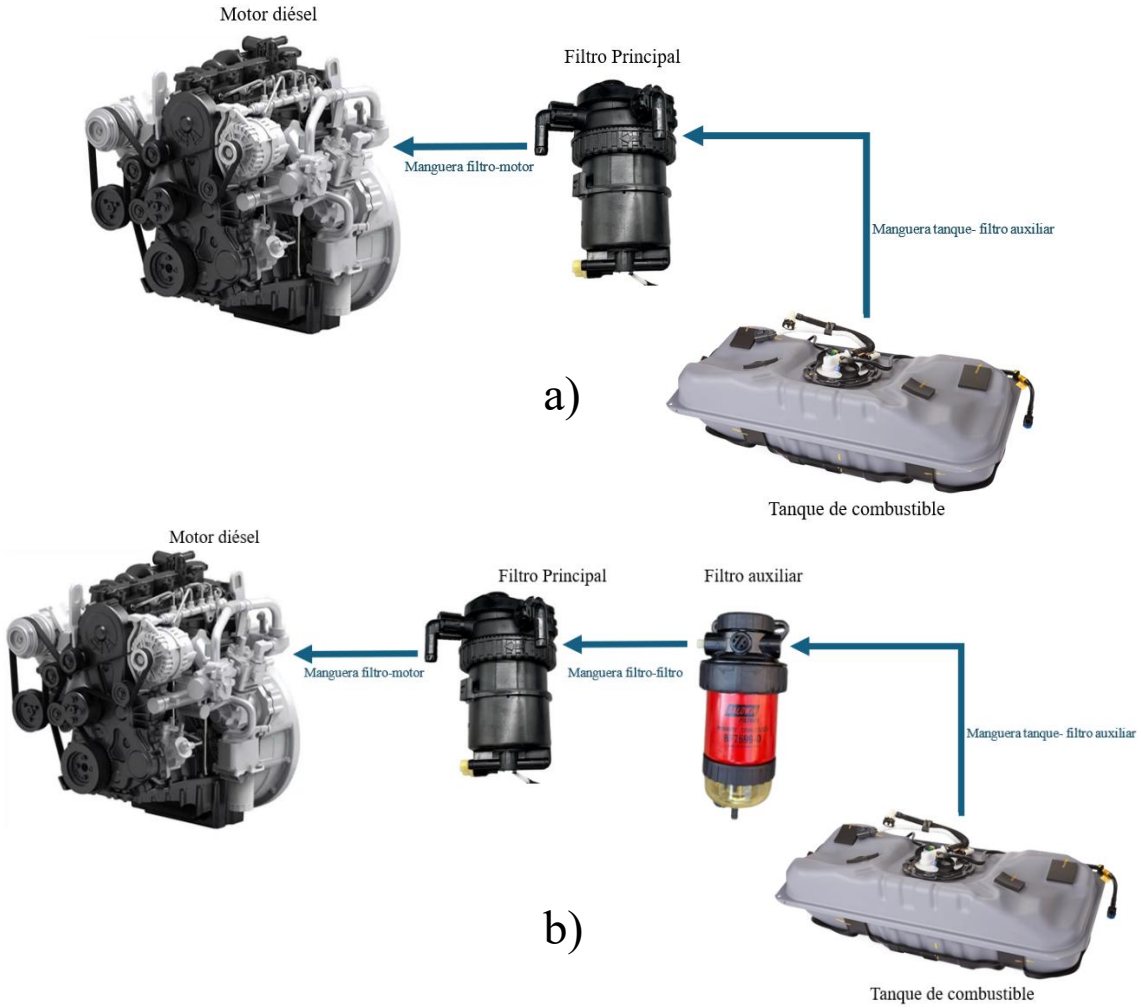


Fig. 28. Esquema de conexiones del sistema de filtración.
a) sistema original y b) sistema modificado con el filtro auxiliar.

Teniendo en cuenta los acoples observados en el recuadro (2) de la *figura 27*, se identificó que este tipo de acoples corresponden a conectores plásticos con referencia de dimensión D9.89, los cuales también deben ser empleados tanto en la manguera que se adicione para la comunicación entre los filtros, como en las conexiones de los puertos del filtro auxiliar, para garantizar la compatibilidad de las conexiones existentes con el nuevo sistema.

Para definir los demás accesorios y elementos necesarios en el montaje, se debe establecer la ubicación donde se instalará el filtro. En este caso, en primera instancia se busca realizar el menor número de modificaciones posibles al vehículo, además de garantizar un fácil acceso al filtro auxiliar a la hora de realizar su instalación y las respectivas labores de mantenimiento. En la Fig. 29 se señala un área libre del cofre motor, en el cual se cuenta con espacio para realizar el montaje del filtro auxiliar. En esta ubicación, además del espacio se tiene una distancia corta al filtro

principal del vehículo, con lo cual se puede aprovechar la misma manguera que viene desde el tanque sin necesidad de modificar su longitud.

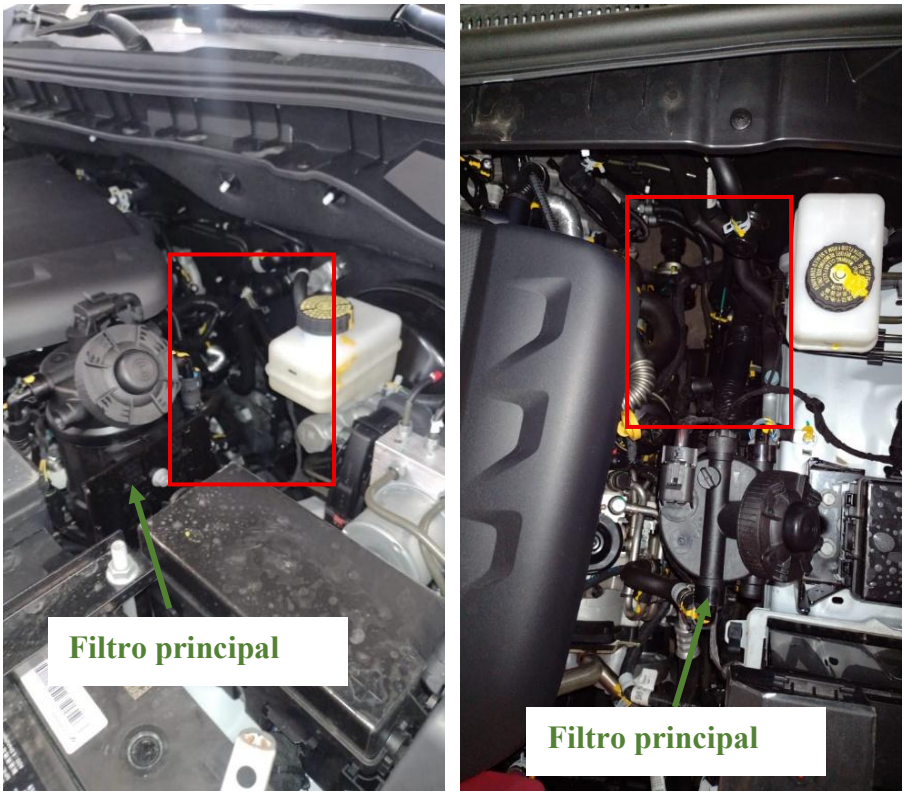
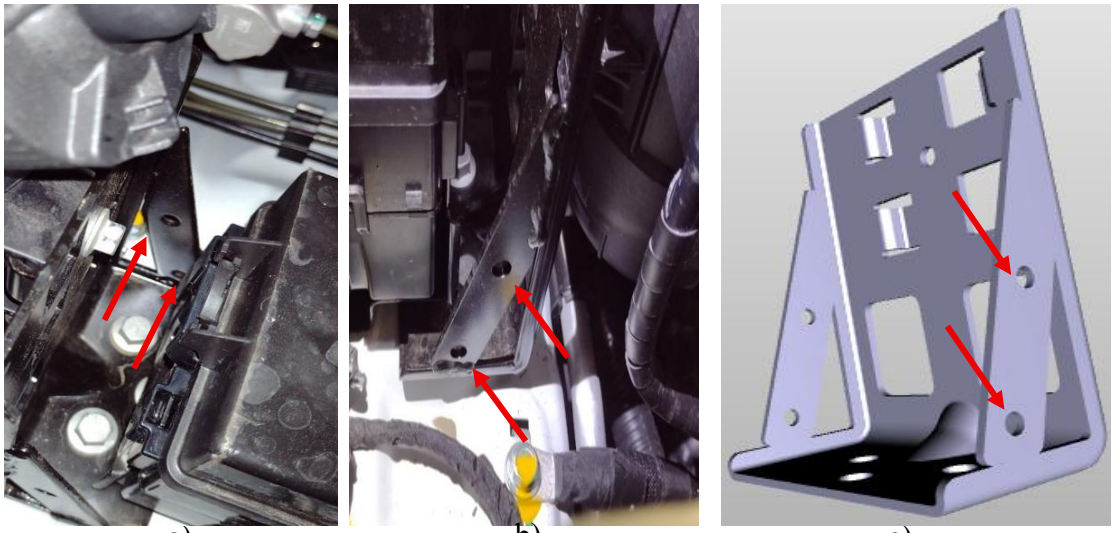


Fig. 29. Ubicación para el sistema auxiliar.

Para realizar la instalación del sistema auxiliar en la ubicación definida, también se debe establecer la forma de sujetar el filtro en dicho espacio. Al analizar posibles formas de sujeción que no involucren modificación del chasis, se detecta que el soporte del filtro principal del vehículo cuenta con unas perforaciones laterales en las cuales es posible anclar una nueva platina que sirva como sujeción del filtro auxiliar. En la Fig. 30**a** se señalan las perforaciones encontradas, mientras que en la Fig. 30**b** se observa el diseño de la base del filtro original obtenido de la plataforma *DMS* [36], donde se aprecia que dichos agujeros son una característica de fábrica de todas estas bases. Además, al analizar dicho modelo en la plataforma, no se observa que estos agujeros tengan relación funcional con otras partes, con lo cual se pueden definir estas perforaciones como el punto de instalación del soporte para el nuevo filtro.



a) b) c)

Fig. 30. Puntos de sujeción para la base del filtro auxiliar
a) vista superior del soporte, b) vista lateral y c) CAD 3D del soporte del filtro original.

Con el punto de instalación del filtro auxiliar definido, se opta por una manguera de calibre de 3/8” con una longitud de 40 cm para su fácil manipulación, instalación y desmontaje. Adicionalmente, el filtro BF7699-D seleccionado, es del tipo *“spin on”,* es decir, que se gira o enrosca en una base soporte que suele incluirse en el sistema de filtración de los vehículos que cuentan con este tipo de elementos. Sin embargo, dado que este filtro corresponde a una adición al vehículo, dicha base no está incluida en el sistema. Por esta razón, también debe incluirse dicha base para la instalación del filtro.

De modo que, definidas las partes comerciales que se requieren para el proceso de ensamblaje del nuevo filtro en las camionetas, en la Fig. 31 se esquematiza un diseño preliminar del montaje a realizar para la adaptación del filtro auxiliar.

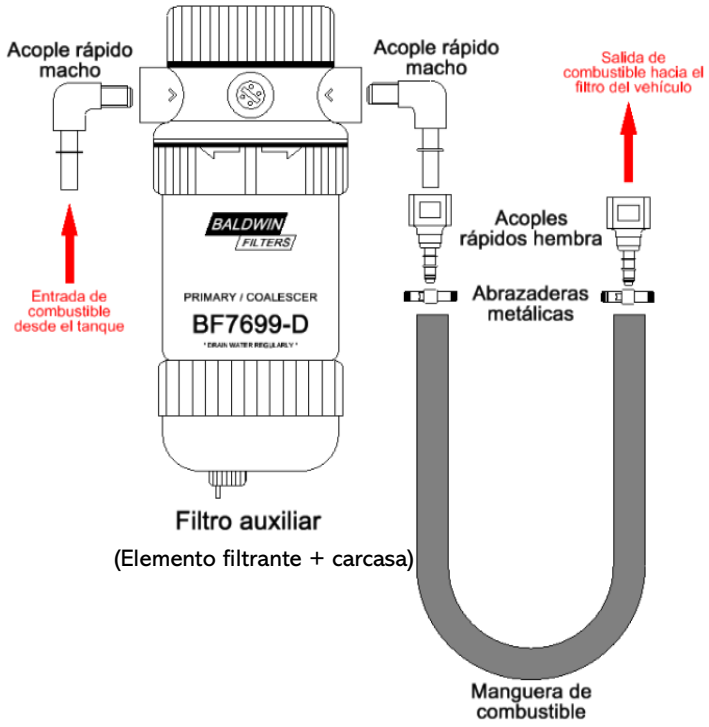


Fig. 31. Esquema de componentes necesarios para adaptar el filtro auxiliar.

El proveedor *Corgil*, además del cuerpo filtrante, suministra los componentes complementarios mostrados en la Fig. 32, necesarios para la instalación del filtro. Entre estos se encuentra el cabezal base, diseñado para enroscar el filtro y proporcionar los puertos de entrada y salida de combustible. Además, se incluye un tazón que se acopla al orificio de drenaje del filtro, cuya función es recolectar el agua separada del combustible para su posterior evacuación.

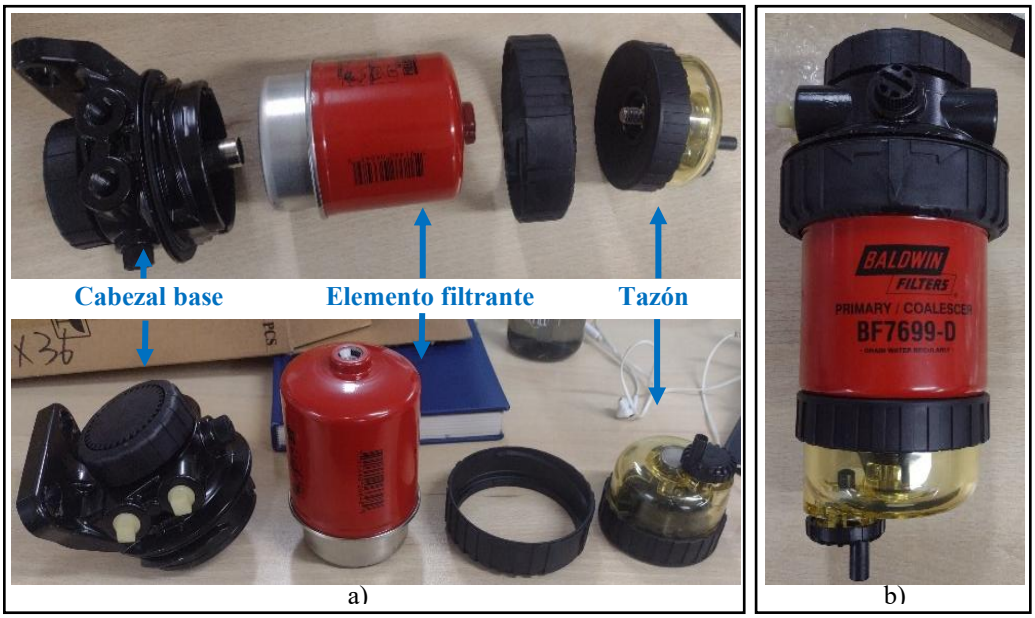


Fig. 32. Ensamble completo del filtro y carcasa.
a) Componentes del filtro y b) Conjunto del filtro ensamblado

Además del filtro y los componentes necesarios para su ensamblaje de conjunto, el proveedor también dispone de las abrazaderas, acoples rápidos y la manguera, presentados en la Fig. 33, necesarios para garantizar las conexiones del sistema.



Fig. 33. Otras partes comerciales para la instalación,

2. Partes no comerciales

Después de la revisión de componentes realizada en el apartado anterior, se identificó que, además de las partes comerciales ya establecidas, es necesario diseñar y fabricar algunas piezas específicas. Estos componentes deben adaptarse a las condiciones particulares del montaje como el espacio, formas, dimensiones y requerimientos funcionales. En este caso, se requiere el diseño y fabricación de la platina base para la sujeción del filtro y los acoples rápidos tipo macho que se instalarán en los puertos de conexión del filtro auxiliar.

Con la identificación del espacio, se procede a definir la forma y las dimensiones del soporte. En la Fig. 34 se describe la forma propuesta, la cual asegura la fijación en el punto establecido y permite ubicar, facilitando la manipulación del filtro durante su instalación y durante las rutinas de mantenimiento. La geometría definida permite adaptar la platina y el filtro a los componentes del vehículo que se encuentran alrededor sin necesidad de reubicarlos o desmontarlos para instalar el filtro auxiliar.



Fig. 34. Ubicación y forma de la platina de sujeción.

Para definir con mayor detalle las dimensiones y geometría del soporte, se elaboró la plantilla. Por medio de este modelo se describe la forma considerada en la Fig. 34, así como las

demás características de forma que eviten la interferencia del soporte con otros elementos del cofre motor. Además, se precisa la ubicación de los orificios para la sujeción de la platina en el chasís de las camionetas y las ranuras para el montaje del filtro. En la figura 35 se muestra el CAD de la platina, construido en el módulo de lámina metálica del software *Autodek Inventor y en la misma imagen se muestra el plano técnico. En el anexo1* se especifican todas las características dimensionales, geométricas y las anotaciones de fabricación requeridas para la reproducción precisa de la pieza.

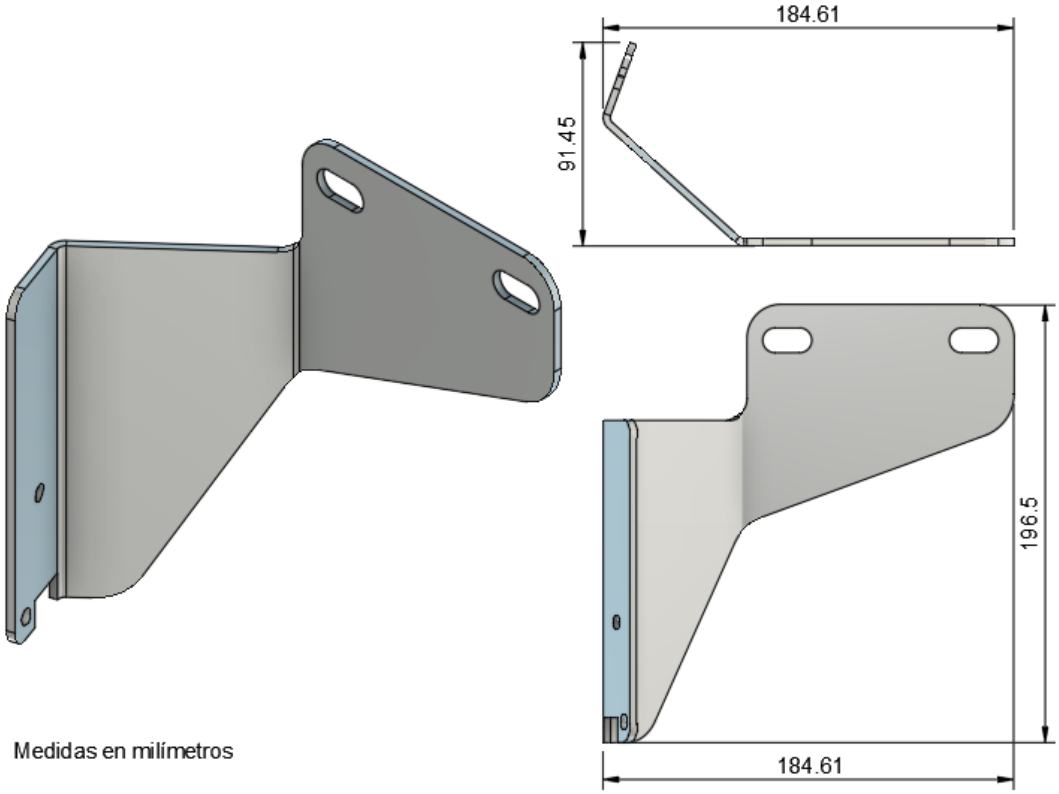


Fig. 35. Diseño de la platina de sujeción.

En la Fig. 35 se realiza una validación estructural para la platina de acero con espesor de 1/8 in, mediante un análisis estático por análisis de elementos finitos (FEA por sus siglas en inglés), con el objetivo de evaluar el comportamiento de la pieza bajo las fuerzas que experimenta durante la operación de los vehículos. Inicialmente, se determina mediante pesaje que el filtro completamente lleno de combustible tiene un peso de 4 kg. Para simplificar el análisis de los efectos dinámicos sobre el filtro y su soporte, como las vibraciones, paso por baches, etc., se aplica un factor de sobrecarga dinámica. Este factor amplifica la carga estática del filtro en la simulación, proporcionando unos resultados más conservadores del comportamiento del sistema. Según el estudio "*Effects of Speeds and Road Types on the Highest Dynamic Factor of the Load of the*

Articulated Truck" [37] se establece un factor de sobrecarga de 2.5, lo que permite calcular la fuerza aplicada sobre el soporte como se muestra en la *ecuación 1.*

$$F = m * FS * g \qquad \textit{Ecuación 1}$$

Donde F: fuerza aplicada al soporte [N]
m: masa del conjunto del filtro auxiliar [kg]
FS: factor de sobrecarga dinámica [-]
g: fuerza de la gravedad [m/s^2]

$$F = (4\ kg) * (2.5) * \left(9.8\frac{\text{m}}{\text{s}^2}\right) = 98\ \text{N}$$

Los resultados de la simulación se muestran en la Fig. 36. En la Fig. 36a, se observa el desplazamiento del debido a las fuerzas aplicadas sobre la sección de la platina. El mayor desplazamiento se presenta en la esquina superior izquierda, el punto más alejado de los anclajes del soporte, lo que lo expone a mayores momentos generados por el peso del filtro. No obstante, la magnitud del desplazamiento, de 0.436 mm produce, como se muestra en la Fig. 36b, una deformación unitaria del 0.1% respecto a las dimensiones originales de la pieza. Este valor se encuentra dentro de un rango seguro de operación para un acero, ya que la deformación permanece en la región elástica, sin superar el valor típico promedio de 1% para el límite elástico de deformación.

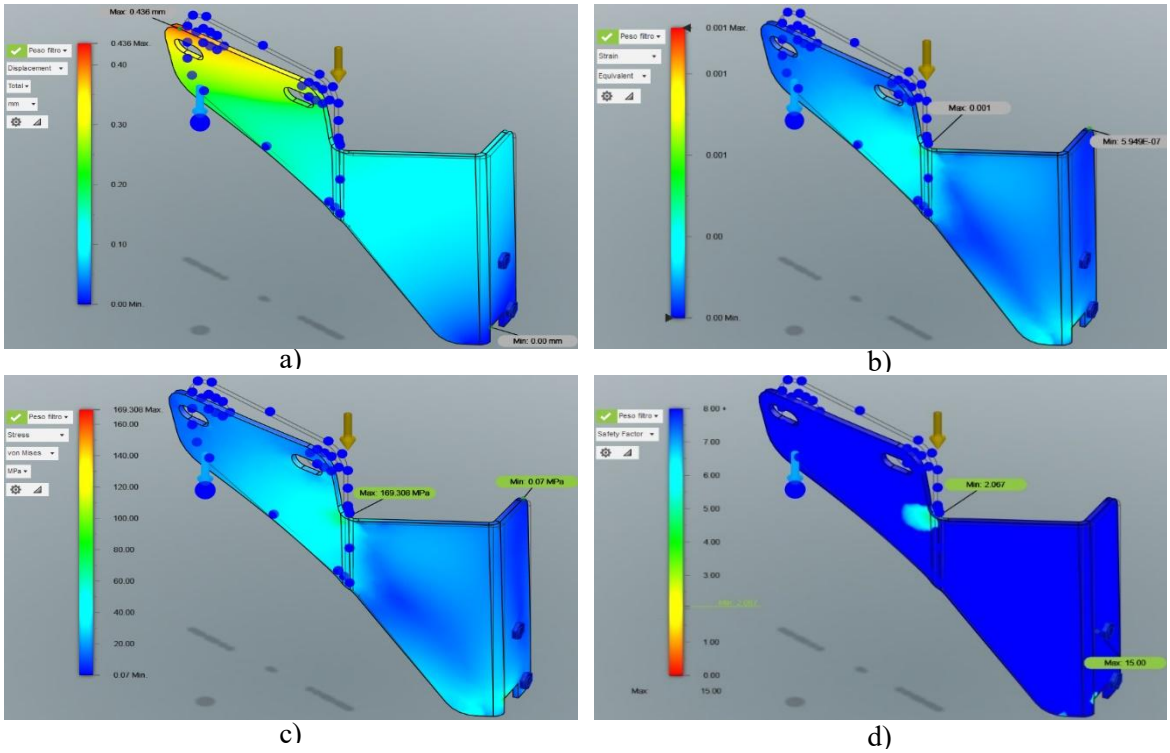


Fig. 36. Resultados de la simulación.
a) Desplazamiento b) Deformación c) Esfuerzo y d) Factor de seguridad

En cuanto al esfuerzo generado en la pieza, el valor máximo reportado se muestra en la Fig. 36c y es de 169.31 MPa. Al contrastarlo con el esfuerzo de fluencia del acero, de 350 MPa, se obtiene el factor de seguridad de 2.1 mostrado en la imagen de la Fig. 36d. Este factor de seguridad, sumado al hecho de que ya se ha considerado un factor de sobrecarga en el diseño del sistema, se garantiza la seguridad e integridad de la platina durante su instalación en las camionetas.

Para la implementación del sistema, se realiza la fabricación de un prototipo para realizar el montaje de prueba del sistema de filtración. Tal como se había establecido, se utiliza una platina de acero de espesor 1/8 pulgada, la cual es cortada según las dimensiones indicadas en el plano del *anexo 1*, y se dobla conforme a las especificaciones, obteniéndose el soporte mostrado en la Fig. 37. Es importante aclarar que la platina utilizada corresponde a una pieza reutilizada, la cual fue plantillada y recortada. Por esta razón, el prototipo presenta un recorte semicircular en la parte superior que no se encuentra incluido en el diseño original.



Fig. 37. Prototipo de la platina de sujeción.

Para el montaje del sistema, se identificó que los acoples rápidos tipo macho disponibles en el mercado no satisfacen los requerimientos de diseño. Esto se debe a que, las dimensiones estándar que presentan estas piezas y las restricciones de espacio de la instalación hacen necesario que dichos acoples tengan una geometría en “L” para permitir una correcta instalación de las mangueras de combustible. Sin embargo, los acoples comerciales con esta forma no permiten contar con el espacio necesario para una conexión adecuada con los acoples tipo hembra de las mangueras, por esta razón, se decide fabricar los acoples tipo macho que serán instalados en los puertos del filtro

auxiliar. Los acoples se diseñan tomando como referencia las dimensiones de las piezas estándar, incorporando una modificación de longitud que garantiza la conexión requerida en el sistema. En la Fig. 38 se muestra el modelo de la pieza diseñada, mientras que el *Anexo 2: plano del acople*, incluye el plano técnico con las respectivas dimensiones para la fabricación de la pieza.

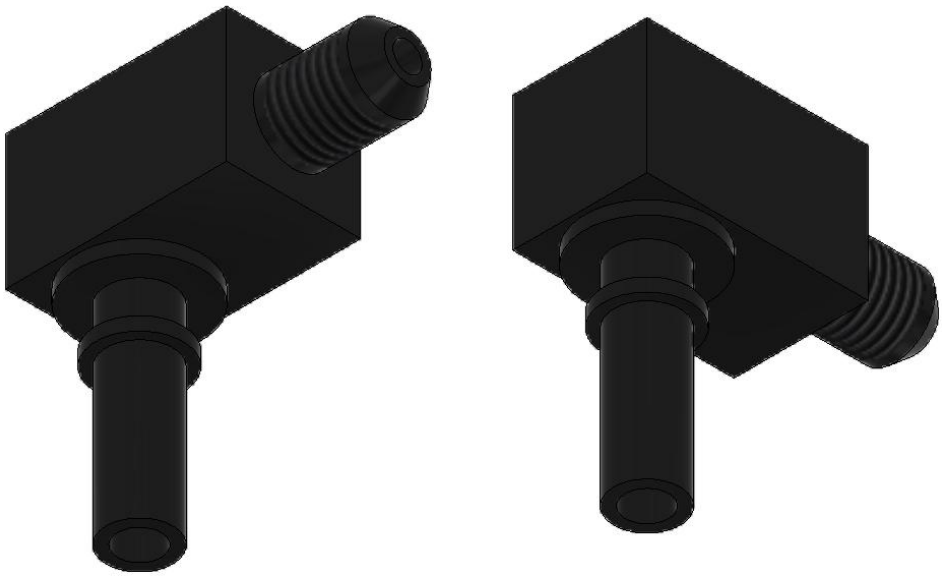
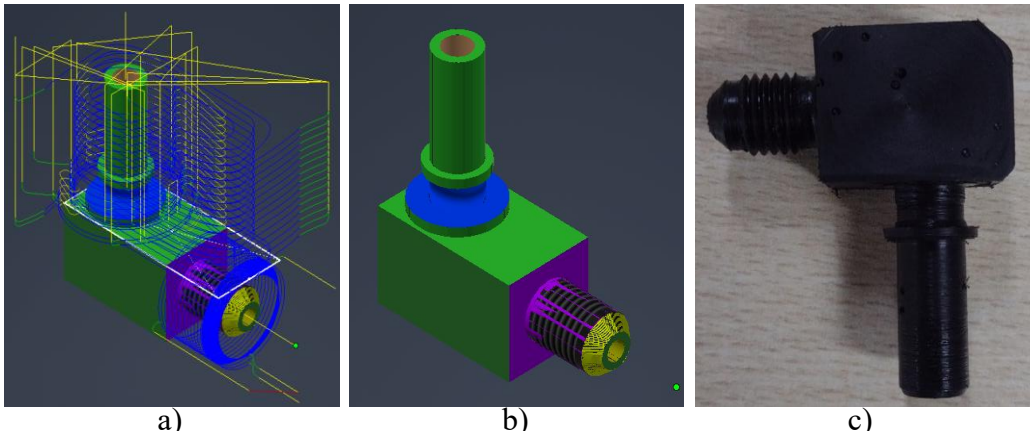


Fig. 38. Diseño de los acoples macho en L.

La fabricación de los acoples se hace mediante mecanizado por CNC (Control numérico computarizado), considerando la necesidad de tolerancias, ajustes, características geométricas y dimensionales. El material seleccionado es poliamida, también conocido por su nombre comercial de Nylon, el cual es un polímero que ofrece buena resistencia química frente a hidrocarburos como el diésel, además de una adecuada resistencia mecánica y una buena maquinabilidad, lo que facilita alcanzar los acabados y tolerancias que debe tener un acople rápido como el diseñado.

Para el proceso de fabricación, se usa el software *Autodesk Inventor,* con su módulo de CAM (Computer-Aided Manufacturing) para generar el programa con el código G que se ejecuta en el centro de mecanizado CNC. En la Fig. 39a se presentan las trayectorias de herramienta definidas por el software para cada una de las operaciones de mecanizado, desde el material en bruto hasta obtener la pieza final que se observa en la Fig. 39b. Con la programación del mecanizado y el material listos, se procede a la ejecución del código en el centro de mecanizado CNC, obteniendo el modelo de acople mostrado en la Fig. 39c.



a) b) c)

Fig. 39. Fabricación del acople.
a) Trayectorias de mecanizado b) Resultado de forma mecanizada y c) Acople mecanizado

La pieza resultante cumple con todas las características definidas y se acopla correctamente, como se evidencia en la Fig. 40, tanto a los puertos del filtro, como a los acoples rápidos tipo hembra de las mangueras, garantizando un ajuste seguro, firme y funcional.

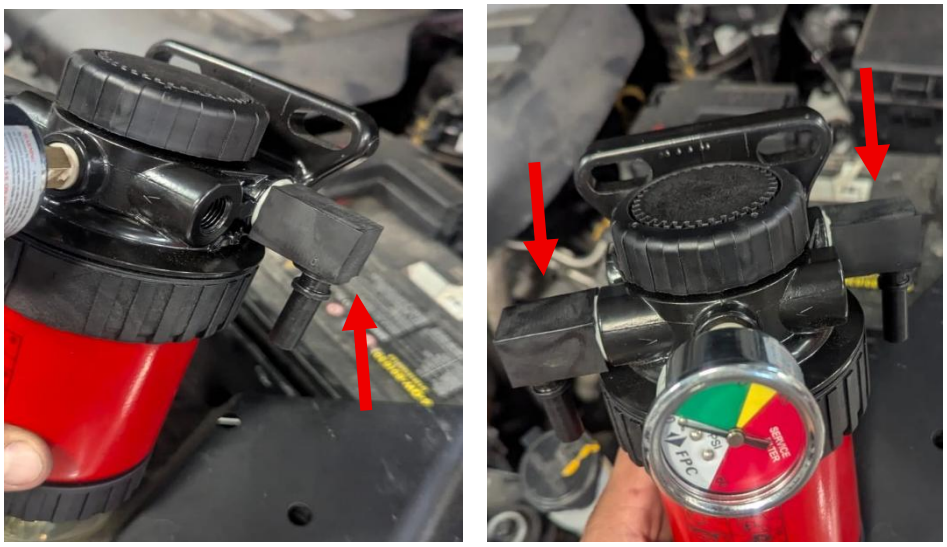


Fig. 40. Ajuste de los acoples fabricados.

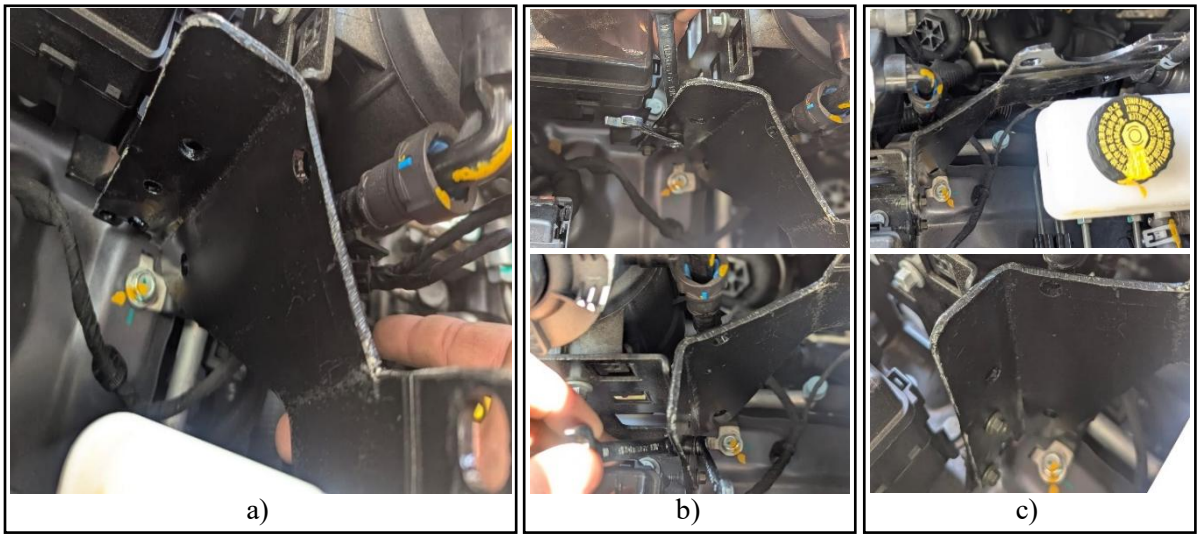
D. Instalación del prototipo

La *tabla XI* recopila el listado de piezas y herramientas requeridas para llevar a cabo el procedimiento de instalación del filtro.

TABLA XI
LISTA DE PARTES Y HERRAMIENTAS.

Pieza	**Cantidad**
Kit filtro BF7699-D	1
Platina de soporte	1
Tornillo hexagonal 7/16 x 1”	2
Tuerca hexagonal de seguridad 7/16”	2
Tornillo hexagonal 1/4 x 5/8”	2
Tuerca hexagonal de seguridad 1/4”	2
Manguera hidráulica SAE R6 3/8”	1
Acoples rápidos tipo macho 3/8”	2
Acople rápido tipo hembra D9.89	2
Abrazadera metálica 16-25	2
Manómetro diferencial PG1326	1
Herramienta	**Cantidad**
Llave boca fija Nº 11	1
Llave boca fija no 16	1
Destornillador de pala	1
Recipiente	1

Para iniciar la instalación, se monta de la platina de soporte en la posición identificada previamente, alineando sus orificios de fijación con las perforaciones que tiene la base del filtro principal, como se muestra en la Fig. 41**a**. A continuación, se insertan tornillos de 1/4” y se aseguran con tuercas, utilizando una llave de boca fija N°11, tal como se ilustra en la Fig. 41**b**. Finalmente, el soporte queda instalado en su posición como se ve en la Fig. 41**c**.



a) b) c)

Fig. 41. Instalación del soporte.

a) Ubicación del soporte b) Fijación con tornillos c) Soporte instalado

Tras la instalación del soporte, el proceso de montaje continua con la fijación del conjunto del filtro auxiliar en la ubicación definida sobre el soporte. Al igual que en el paso anterior, se alinean las ranuras de la base del filtro con las perforaciones del soporte y, posteriormente, se insertan los tornillos hexagonales de 7/16”. Los tornillos se aseguran mediante tuercas de seguridad, utilizando una llave de boca fija nº 16, como se ilustra en la Fig. 42a.



Fig. 42. Montaje del filtro auxiliar.
a) Filtro en el soporte y b) Conexión de las mangueras

Una vez asegurado el filtro en su posición, se realizan las conexiones. Se identifican los puertos de entrada y salida tanto del filtro auxiliar como del filtro principal. la manguera que se desconecta -proveniente del tanque de combustible- se conecta al acople rápido de la entrada del filtro auxiliar. Posteriormente, se utiliza la manguera adicional incluida en los componentes de instalación, para conectar el puerto de salida del filtro auxiliar con el puerto de alimentación del filtro principal del vehículo. La conexión con los acoples al filtro auxiliar se muestra en la Fig. 42b.

Finalmente, el sistema completamente instalado queda como se muestra en la Fig. 43, en donde se observa la ubicación del sistema auxiliar con respecto al conjunto de filtración de combustible original de las camionetas.

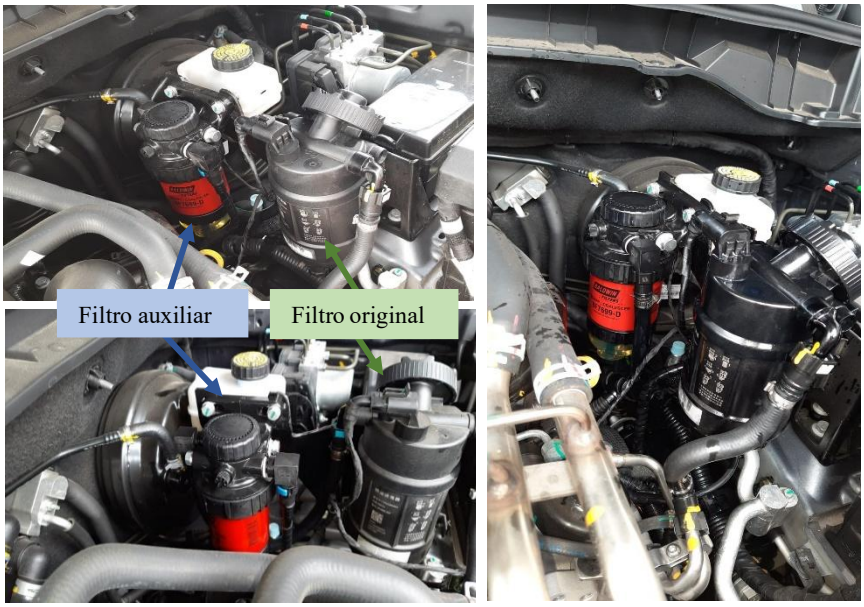


Fig. 43. Sistema montado y acoplado.

Antes de operar el sistema es necesario realizar una purga para eliminar posibles burbujas de aire que hayan quedado en el interior de las líneas o los filtros como resultado del montaje. Para ello se emplea el sistema de bombeo manual incorporado en los filtros principales de las camionetas (Fig. 44*)*, donde mediante presión ejercida en el botón señalado, se bombea combustible desde el tanque, haciendo que fluya a través de las líneas, pase por el filtro auxiliar y salga por el puerto de descarga del filtro principal, hasta verificar que ambos filtros están completamente llenos y que no haya presencia de aire en el sistema.



Fig. 44. Bomba manual.

Finalmente, para concluir con la instalación, se hace el monitoreo del filtro instalado, para ello se emplea un indicador de saturación de carátula, el cual muestra visualizar el grado de restricción o saturación del elemento filtrante. Su funcionamiento se basa en la medición del aumento de presión en el filtro a medida que se incrementa su saturación. Cuando el filtro está limpio, el combustible fluye a través de él con una baja caída de presión; sin embargo, conforme el elemento filtrante acumula contaminantes, la resistencia al paso del fluido aumenta, y con ello, la caída de presión generada. De esta manera, el estado de saturación puede determinarse en función del diferencial de presión interno de filtro.

Como se muestra en la Fig. 45a, el cabezal empleado para el elemento filtrante dispone de un puerto específico para la instalación de instrumentos para control de saturación.



a) b)

Fig. 45. Indicador de saturación.
a) Puerto de conexión y b) Indicador instalado

En la Fig. 45b se muestra el indicador instalado, el cual corresponde a un manómetro diferencial de referencia PG1326. Este dispositivo incorpora una escala visual que indica los diferentes rangos de operación según el nivel de saturación del filtro. Según las recomendaciones de los fabricantes, cuando la caída de presión supere los 25 PSI, se debe reemplazar el elemento filtrante para evitar que el exceso de saturación afecte el correcto funcionamiento del motor o de otros componentes del sistema.

E. Pruebas y validación del sistema

Con el objetivo de confirmar que sus características de funcionamiento no se vean afectadas por la incorporación del sistema auxiliar , se lleva a cabo una verificación y seguimiento de las condiciones operativas de la camioneta. A continuación, se describen las pruebas realizadas al vehículo con el nuevo sistema instalado.

1. Arranque en frio

La primera prueba realizada corresponde a un arranque en frio del vehículo. Esta prueba consiste en encender el motor tras un periodo de reposo de aproximadamente 2 horas. El objetivo es evaluar el comportamiento de arranque y la estabilidad del motor, verificando su capacidad para mantenerse en funcionamiento durante un periodo de prueba de 15 minutos en ralentí, sin fluctuaciones de revoluciones, apagado del motor, sensación de ahogo o ruidos anormales como cascabeleo. Finalizado el periodo de 15 minutos a ralentí, se acelera la camioneta de forma variable hasta alcanzar las 2500 rpm, observando nuevamente el comportamiento del motor y comprobando que no haya fugas en las conexiones del sistema de filtrado.

En la *tabla XII* se registran los resultados de la primera prueba de inspección de arranque en frio. Durante el desarrollo de esta, transcurridos aproximadamente 5 minutos desde el encendido del motor, se evidenció una variación irregular en las revoluciones, acompañada de caídas de potencia que llevaron a que el motor se apagara. Debido a esta condición, no fue posible completar la totalidad de los pasos establecidos para la prueba.

TABLA XII
CHEQUEO DE LA PRIMERA PRUEBA DE ARRANQUE.

Prueba	Criterio	Evaluación	Observaciones
Encendido del vehículo	Arranca normalmente	✔	Encendido sin novedad
Sostenimiento del motor	Se sostiene encendido en ralentí durante 15 minutos	✘	Se apaga a los 5 min
	Las revoluciones se mantienen estables	✘	Las revoluciones varían sin accionamiento del acelerador
	Opera sin presencia de ruidos anormales	-	No se alcanza la prueba
Motor con aceleración	Alcanza las 2500 rpm sin problemas	-	No se alcanza la prueba
	No se genera ahogo del motor	-	No se alcanza la prueba
	Revoluciones sostenidas con el acelerador accionado	-	No se alcanza la prueba
	Opera sin presencia de ruidos anormales	-	No se alcanza la prueba
Inspección de conexiones	Sin presencia de fugas de combustible	-	No se alcanza la prueba

Una vez apagado el motor, se procede a revisar las posibles causas de la falla, determinándose que el inconveniente se debe a la presencia de aire en las líneas de alimentación de combustible, a pesar de la purga realizada durante la instalación del filtro auxiliar. Para corregir esta condición, con el motor apagado se acciona el sistema de bombeo manual del filtro principal, asegurando el llenado completo de las líneas con combustible y la eliminación del aire residual.

Posteriormente, tras aplicar las medidas correctivas, se efectúa un segundo intento de la prueba de arranque en frio, cuyos resultados se registran en la *tabla XIII.* En esta ocasión, la prueba se desarrolla en su totalidad, obteniéndose resultados satisfactorios en cada uno de los ítems evaluados. Con ello, se aprueba esta fase de ensayos y se procede a la realización de las pruebas dinámicas.

TABLA XIII
CHEQUEO DE LA SEGUNDA PRUEBA DE ARRANQUE.

Prueba	Criterio	Evaluación	Observaciones
Encendido del vehículo	Arranca normalmente	✔	Encendido sin novedad
Sostenimiento del motor	Se sostiene encendido en ralentí durante 15 minutos	✔	Se sostiene el tiempo definido
	Las revoluciones se mantienen estables	✔	Las revoluciones se mantienen constantes
	Opera sin presencia de ruidos anormales	✔	No hay ruidos extraños
Motor con aceleración	Alcanza las 2500 rpm sin problemas	✔	Alcanza las revoluciones definidas
	No se genera ahogo del motor	✔	Motor sin ahogo
	Revoluciones sostenidas con el acelerador accionado	✔	Las revoluciones se sostienen
	Opera sin presencia de ruidos anormales	✔	No hay ruidos extraños
Inspección de conexiones	Sin presencia de fugas de combustible	✔	Sin fugas combustible

2. Recorrido y consumo

Para validar la operatividad del vehículo piloto equipado con el sistema auxiliar de combustible, se efectuó un análisis de su desempeño en condiciones reales operación. Con este propósito, se realizaron recorridos de prueba diseñados para evaluar el rendimiento y la eficiencia de la camioneta, registrando datos para variables como la distancia recorrida y los perfiles de altimetría de las rutas. De este modo, se incluyeron en el análisis diferentes escenarios operativos que puedan ser influyentes en el comportamiento del vehículo.

Estas pruebas de ruta permiten establecer un comparativo entre el comportamiento del vehículo antes y después de la instalación del sistema auxiliar, considerando parámetros como

consumo de combustible, la respuesta del motor y la estabilidad en la entrega de potencia. Como punto de referencia, se utilizaron los registros históricos obtenidos durante la fase de caracterización del modelo de camioneta previo a la incorporación del vehículo al mercado colombiano. Este proceso que se realiza para todas las nuevas referencias de vehículos que se incorporan al portafolio comercial de Corautos y se documenta la realización de múltiples rutas de prueba, considerando las distancias recorridas, el consumo de combustible y el cálculo de la autonomía del vehículo. La información correspondiente a los registros de dicho histórico de pruebas se presenta en la *tabla XIV*.

TABLA XIV
SEGUIMIENTO VEHÍCULO ANTES DE FILTRO AUXILIAR.

Tanqueo	**km inicial**	**km final**	**Total de km recorridos**	**gal de Diesel**	**Consumo km/gal**
1	37	463	426	16,646	25,59
2	463	993	530	18	29,44
3	993	1353	360	14,241	25,28
4	1353	1891	538	14,56	36,95
5	1891	2733	842	18,4	45,76
6	2733	3014	281	10	28,10
7	3014	3650	636	17,7	35,93
8	3650	4273	623	15,6	39,94
9	4273	5236	963	17,89	53,83
10	5236	5821	585	19,5	30,00
11	5821	6330	509	15,023	33,88
12	6330	6853	523	16,466	31,76
13	6853	7550	697	18,048	38,62
14	7550	8072	522	17,8	29,33
Promedio			573,93	16,42	34,60

Con base en la información de los recorridos realizados y las rutas empleadas durante las pruebas de caracterización de las camionetas, se diseñó el plan de ensayos, definiendo como objetivo alcanzar un kilometraje acumulado de aproximadamente 5000 km. Este valor corresponde al ciclo de mantenimiento establecido por Corautos para las camionetas Tunland, entendido como el recorrido para el cual las camionetas deben someterse a una rutina de inspección, sustitución de ciertos componentes y demás actividades de mantenimiento preventivo. El principal foco de esta revisión es el estado del sistema de filtración, evaluando tanto el filtro principal como el filtro auxiliar.

En la Fig. 46 se presenta el registro de algunas de las rutas de prueba efectuadas, identificadas en el mapa mediante el sistema de monitoreo y posicionamiento equipado en las Tunland. Asimismo, se incluye el perfil de altimetría correspondiente a cada recorrido, lo que permite analizar el desempeño operativo del motor y el rendimiento del vehículo en distintas alturas. Esto es útil dado que, los motores de combustion interna ven afectado su rendimiento termodinámico por la altitud. Finalmente, se indican las distancias totales asociadas a cada uno de los recorridos.

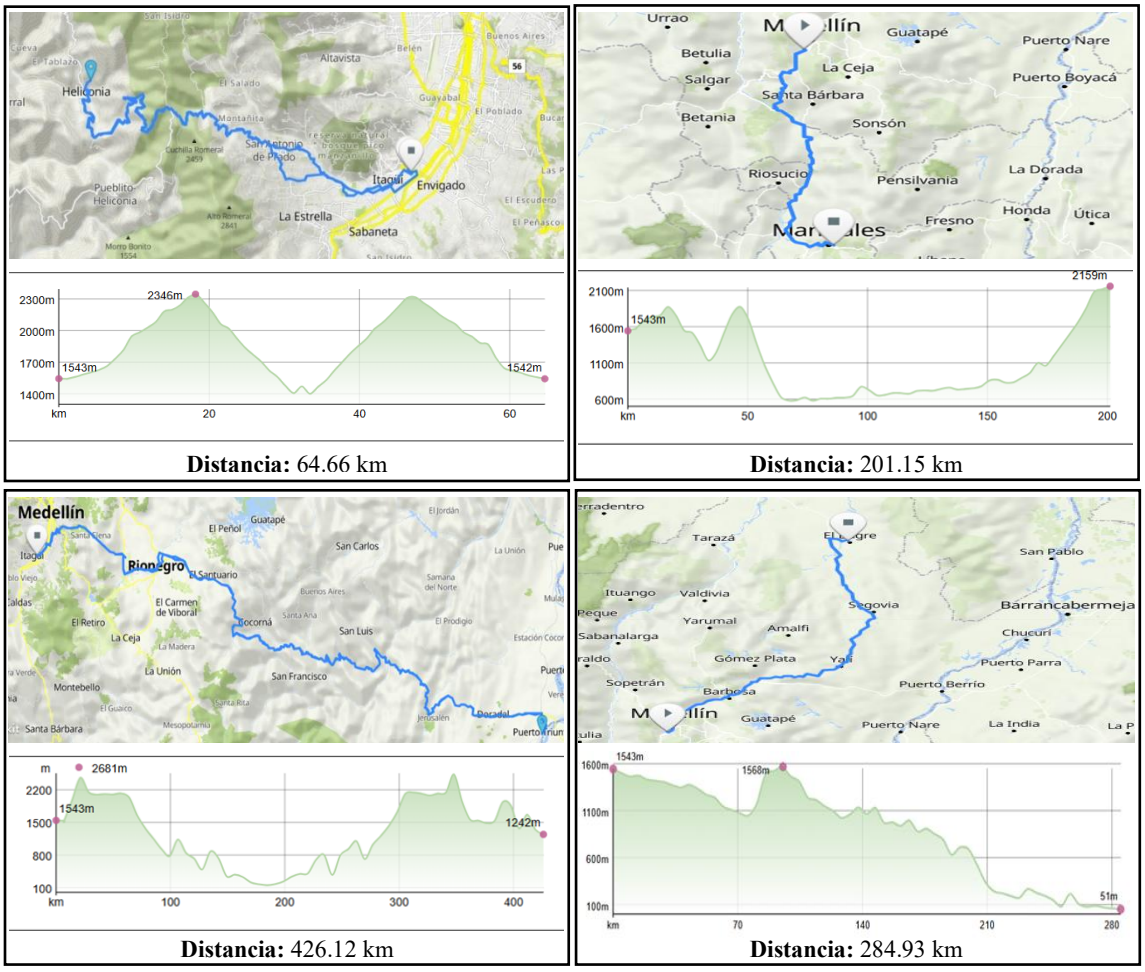


Fig. 46. Trayectos y altimetría de algunas rutas de prueba.

En cuanto a las rutas seleccionadas para realizar los recorridos, se procuró replicar las utilizadas previamente durante la caracterización de los vehículos, esto con el propósito de establecer un punto de comparación entre el desempeño de las Tunland antes y después de la instalación del sistema auxiliar de filtración. Hay que considerar que al tratarse de camionetas hibridas, el motor eléctrico auxiliar puede influir en el rendimiento general del vehículo más allá del funcionamiento del motor diésel en las condiciones operativas de los recorridos.

En la *tabla XV* se presentan los datos obtenidos durante las pruebas de ruta, en las cuales, al igual que en el histórico de pruebas disponible, se registró la cantidad de combustible recargado en cada tanqueo, así como la distancia recorrida entre cada uno de estos. Con esta información se calcula el consumo relacionado a la autonomía de las camionetas para cada uno de los trayectos, obteniéndose un incremento de 19.5% en la autonomía con respecto a los resultados de las Tunland antes de la instalación del filtro auxiliar, como se mostraba en la *tabla XIV*.

TABLA XV
SEGUIMIENTO VEHÍCULO DESPUÉS DE FILTRO AUXILIAR.

Tanqueo	km inicial	km final	Total de km recorridos	gal de diésel	Consumo km/gal
1	148	560	412	11.56	35.63
2	560	957	397	11.60	34.22
3	957	1463	506	15.67	32.30
4	1463	2029	566	18.59	30.45
5	2029	2571	542	14.33	37.81
6	2571	3532	961	15.94	60.28
7	3532	4572	1040	18.70	55.61
8	4572	4968	396	10.16	38.96
Promedio			602.75	14.57	41.36

La relación entre el aumento de la autonomía de la camioneta y la instalación del filtro auxiliar radica en la mejora de la calidad del combustible que ingresa al sistema de inyección del motor. Este incremento de la calidad del diésel mejora la atomización y el proceso de combustion, evitando la disminución de la energía generada por unidad de combustible debido a la presencia de contaminante, por lo tanto, se reduce el consumo general de diésel. Adicionalmente, el sistema auxiliar retiene una cantidad significativa de partículas y separa tanto el agua libre como emulsionada, previniendo la obstrucción de los inyectores y la saturación prematura del filtro primario. Esta distribución de la carga de contaminantes contribuye a mantener estable el caudal y la presión de combustible en el sistema, estabilizando el rendimiento del motor.

3. Arranque en pendiente

Otra característica de las camionetas que es importante verificar es la capacidad para iniciar la marcha en superficies inclinadas con pendientes pronunciadas, pues este tipo de operaciones es común en entornos de trabajo exigentes como aquellos para los cuales están destinadas las Tunland. Esta prueba es una forma de evaluar la entrega de potencia del motor posterior a la instalación del filtro auxiliar, pues reproduce una condición de exigencia de alto torque, dado que en esta

circunstancia el consumo instantáneo de combustible y la carga sobre el sistema de alimentación aumentan significativamente.

La prueba se llevó a cabo con la camioneta cargada con 749 kg, en una vía de tipo riel de concreto con una inclinación entre 22° y 23.3°, según lo registrado en la *tabla XVI*. Bajo estas condiciones, el vehículo logra un arranque suave y sin inconvenientes, presentando un tiempo de reacción del motor, desde el accionamiento del acelerador hasta el incremento de torque, prácticamente instantáneo, sin evidenciar tiempos de respuesta prolongados ni picos de potencia abruptos. Asimismo, no se detectaron fluctuaciones en las revoluciones durante una aceleración constante en los primeros metros de ascenso.

TABLA XVI
DATOS ARRANQUE EN PENDIENTE

Peso bruto [kg]	**Peso carga [kg]**	**Inclinación [°]**	**Inclinación [%]**	**Imágenes**
3034	749	22	40%	
3034	749	23,3	43%	

Los resultados obtenidos en la prueba fueron conformes y satisfactorios, confirmando la capacidad del sistema auxiliar de filtración para responder de manera eficiente a elevadas demandas de combustible. Este desempeño contrasta con la condición previa de las camionetas sin el sistema auxiliar, en las cuales las restricciones de flujo generadas por la saturación del filtro primario ocasionaban fluctuaciones de potencia durante los arranques en pendiente, comprometiendo la estabilidad del motor y la capacidad de ascenso de los vehículos. El sistema auxiliar, estabiliza el comportamiento, asegurando un suministro constante de potencia, esencial para completar la maniobra de arranque sin pérdida de tracción ni riesgo de detención.

4. Rutina de inspección del sistema

Como se había establecido previamente, una vez finalizadas las pruebas de ruta y alcanzados los 5000 km correspondientes al ciclo de mantenimiento, se procedió a la revisión del estado del sistema de filtración de la camioneta. Durante esta inspección se verificaron las conexiones de los puertos, encontrándose en buen estado, sin indicios de fugas ni desgaste. Por su parte, el indicador de saturación instalado en el cabezal del filtro auxiliar no presenta una variación significativa en el valor mostrado, tal como se observa en la Fig. 47*,* lo que evidencia que el elemento filtrante se mantiene en buen estado y sin signos de saturación. Adicionalmente, se inspeccionó el tazón de acumulación del agua separada del combustible, el cual es drenado mediante el puerto ubicado en su parte inferior. Con ello se confirma que el filtro está cumpliendo su función de separación y retención de forma correcta, evitando la llegada de contaminantes al motor.



Fig. 47. Estado del indicador de saturación.

Una vez finalizadas las pruebas establecidas, se decidió mantener el vehículo de ensayo bajo observación para registrar la variación de la presión indicada por el medidor de saturación en función del número de kilómetros recorrido. Este seguimiento permitirá establecer el comportamiento del filtro y determinar el tiempo promedio de operación tras el cual será necesario reemplazar el elemento filtrante.

5. Costos de las partes

Para los costos de la adaptación realizada, se presenta un resumen presupuestal en la *tabla XVII*, donde se reflejan los costos de instalación asociados a las partes necesarias. Además, se considera el valor de las pruebas de campo, el cual solo se incluye en la instalación del primer prototipo con el fin de validar su operación.

TABLA XVII
PRESUPUESTO DEL MONTAJE REALIZADO.

Concepto	Descripción	Cantidad	Valor unitario [COP]	Valor total [COP]
Componentes comerciales	Filtro Baldwin BF7699-D	1	$ 85 920	$ 85 920
	Cabezal porta filtro y tazón	1	$ 100 500	$ 100 500
	Indicador de saturación PG1326	1	$ 83 181	$ 83 181
	Maguera hidráulica y racores	1 conjunto[1]	$ 85 000	$ 85 000
	Tornillos y tuercas	1 conjunto[2]	$ 10 100	$ 10 100
Piezas fabricadas	Soporte metálico de montaje	1	$ 95 000	$ 95 000
	Racores adaptados	2	$ 35 000	$ 70 000
Mano de obra	Montaje e instalación (Horas)	4	$ 25 000	$ 100 000
			Costo total de instalación	$ 629 702
Consumo de pruebas	Combustible diésel [gal]	116.55	$ 10 585	$ 1 233 682
			Costo total con las pruebas	$ 1 863 383

[1] Manguera hidráulica + acoples rápidos hembra D9.89 (x2)

[2] Tornillo hexagonal 7/16 x 1” (x2) + Tuerca hexagonal de seguridad 7/16” (x2) + Tornillo hexagonal 1/4 x 5/8” (x2) + Tuerca hexagonal de seguridad 1/4” (x2)

El costo de instalación se justifica por el incremento en la protección del sistema de inyección, manteniendo la capacidad operativa de las camionetas y la reducción de los potenciales costos asociados a mantenimientos correctivos a causa del desgaste generado por los contaminantes en diferentes componentes de los vehículos. En este sentido se obtiene una relación costo-beneficio favorable, especialmente considerando que se trata de varios vehículos operando en conjunto en flotas expuestas a combustibles de baja calidad por las condiciones del entorno operativo.

VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

El desarrollo del proyecto permitió desarrollar satisfactoriamente el objetivo general de diseñar un sistema de filtración auxiliar que garantiza el correcto funcionamiento de las camionetas Tunland en condiciones operativas exigentes. A través de las distintas fases realizadas, se logra la definición, fabricación e instalación de un prototipo funcional que complementa el sistema de filtración original de los vehículos, y que ofrece una protección adicional frente a los contaminantes sólidos y la presencia de agua en el combustible que se encuentra en los entornos de trabajo que estaban generando fallas prematuras en las camionetas.

Durante el desarrollo del sistema que integra componentes comerciales, seleccionados de acuerdo con criterios técnicos para el cumplimiento de las necesidades de la aplicación, y piezas fabricadas a medida para responder a las condiciones específicas del montaje y operación del sistema, se aseguró una correcta adaptación al vehículo sin comprometer el rendimiento del motor. De esta manera, se establece una metodología clara para la adquisición y fabricación de las partes necesarias para los futuros procesos de instalación de este tipo de sistemas en las camionetas Tunland que lo requieran, mejorando tiempos de respuesta y la estandarización del proceso.

Las pruebas de campo realizadas validaron el funcionamiento mecánico y operativo del sistema, aunque se resalta que el seguimiento a largo plazo de su desempeño, particularmente en lo relacionado con la reducción de la incidencia de fallas asociadas a la contaminación del combustible, permanece como una tarea en desarrollo que permitirá complementar la información de validación técnica del sistema desarrollado.

Los resultados obtenidos muestran una solución técnica, operativa y económicamente viable, cumpliendo con criterios de durabilidad y mantenibilidad definidos en la etapa de diseño. No obstante, también se identifican opciones de mejora relacionadas con la integración de un sistema de monitoreo del estado de los filtros, así como la posibilidad de revisar nuevos materiales con mayor resistencia a la corrosión y desgaste, con el fin de prolongar más la vida útil del sistema.

Este proyecto constituye una contribución a la confiabilidad operativa de los vehículos en contextos adversos, aportando una solución adaptable a otras aplicaciones dentro del sector automotriz. Como proyección futura, se recomienda realizar un plan de seguimiento en las condiciones reales de operación para medir cuantitativamente los datos que permitan justificar la definición de rutinas específicas de mantenimiento y operación de los distintos componentes del sistema.

REFERENCIAS

[1] Robert Bosch GmbH, «Management for diesel engines,» de *Automotive Handbook*, 2022, pp. 922-923.

[2] U.S. Department of Energy, «Hybrid Electric Vehicles,» Energy Efficiency & Renawable Energy (EERE), [En línea]. Available: https://afdc.energy.gov/vehicles/electric-basics-hev. [Último acceso: 3 Mayo 2025].

[3] M. Ali Kaleem, M. Zubair Alam y S. Ur Rehman, «An investigation on the malfunctioning of fuel injectors due to contamination of water in diesel fuel,» *International Transaction Journal of Engineering, Management, & Applied Sciences & Technologies,* vol. 10, nº 14, pp. 1-6, 2019.

[4] K. Min Seop, A. Ugochukwu Ejike y H. Jang Wook, «A study on water-induced damage severity on diesel engine injection system using emulsified diesel fuels,» *Electronics,* vol. 10, nº 2285, pp. 1-15, 2021.

[5] Construction Equipment, «The impact of contaminated fuel,» 23 Mayo 2019. [En línea]. Available: https://www.constructionequipment.com/sustainability/article/10756088/the-impact-of-contaminated-fuel. [Último acceso: 4 Mayo 2025].

[6] Colombiana de Comercio, «Página principal,» Corautos andino, [En línea]. Available: https://www.corautosandino.com/index.html. [Último acceso: 3 Mayo 2025].

[7] J. Clifford, «How hybrid cars work?,» Toyota UK magazine, 9 Julio 2020. [En línea]. Available: https://mag.toyota.co.uk/how-does-toyota-hybrid-work/.

[8] S. Krishna Veer, B. Hari Om y S. Dheerendra, «A comprehensive review on hybrid electric vehicles: architectures and components,» *Journal of Modern Transportation,* vol. 27, nº 2, pp. 77-107, 2019.

[9] L. Jinming y P. Huei, «Modeling and Control of a Power-Split Hybrid Vehicle,» *Control Systems Technology, IEEE Transactions on,* vol. 16, nº 6, pp. 1242-1251, 2008.

[10] OPEL, «The electric vehicle family,» Opel, [En línea]. Available: https://www.opel.ie/e-mobility/facts-advantages/bev-phev-erev.html.

[11] S. Blanco, «Types of Electric Vehicles: Mild Hybrid, Hybrid, Plug-in Hybrid, and Electric,» J.D Power, 29 Junio 2023. [En línea]. Available: https://www.jdpower.com/cars/shopping-guides/types-of-electric-vehicles-mild-hybrid-hybrid-plug-in-hybrid-and-electric.

[12] Knauf Industries, «Extended range hybrids – combining ecology and efficiency,» Knauf Industries, 25 Marzo 2023. [En línea]. Available: https://knaufautomotive.com/extended-range-hybrids-combining-ecology-and-efficiency/.

[13] Corautos Andino, «FOTON Tunland Hybrid,» Corautos, [En línea]. Available: https://www.foton.com.co/comprar-vehiculo-foton-colombia-tunland-v9.html.

[14] SEM Automobile, «Motor diésel serie FOTON® AUCAN – Vehículo ligero,» SEMOTO, [En línea]. Available: https://es.semautomobile.com/auto-parts/accessories-series/foton-aucan-series-diesel-engine-light.html.

[15] E-Zoil, «Diesel engine basics,» Ezoil, [En línea]. Available: https://www.ezoil.com/resources-diesel-diesel-engine-basics.

[16] Engineers post, «Fuel injection system: Diagram, parts, working, types,» TheEngineersPost, 11 Marzo 2023. [En línea]. Available: https://www.theengineerspost.com/fuel-injection-system-diagram-parts-working-types/.

[17] M. Khair y H. Jääskeläinen, «Diesel fuel injection,» DieselNet, [En línea]. Available: https://dieselnet.com/tech/diesel_fi.php.

[18] P. Dempsey, Troubleshooting and repairing Diesel engines, McGraw-Hill.

[19] RACE, «¿En qué consiste el common rail de los motores diésel?,» 19 Mayo 2023. [En línea]. Available: https://www.race.es/funcionamiento-common-rail.

[20] A. Castillejo Calle, «Sistemas de Inyección en Motores Diesel,» Universidad de sevilla, Sevilla, 2014.

[21] J. B. Heywood, Internal combustion engine fundamentals, McGraw-Hill.

[22] Fleetguard, «The role of fuel filtration in enhancing engine performance,» Fleetguard, 12 Junio 2025. [En línea]. Available: https://www.fleetguard-filtrum.com/resources/blog/the-role-of-fuel-filtration-in-enhancing-engine-performance.

[23] E-Zoil, «Diesel fuel filter basics,» Ezoil, [En línea]. Available: https://www.ezoil.com/resources-diesel-engines-diesel-fuel-filter-basics.

[24] Hollingsworth & Vose, «Celulosa,» Hollingsworth & Vose, [En línea]. Available: https://www.hollingsworth-vose.com/es/products/filtration-solutions/celulosa/#:~:text=La%20celulosa%20es%20una%20de,en%20relieve%2C%20corrugado%20y%20plisado..

[25] Donaldson, «Engine liquid filtration guide,» Donaldson filtration solutions, [En línea]. Available: https://ecatalog.donaldson.com/view/477967314/14/.

[26] Donsson, «Productos Donsson,» Donsson filters, [En línea]. Available: Donsson.com.

[27] Rolling Stock Knowledge Resource, «Fuel oil system (ALCO),» RSKR, [En línea]. Available: https://rskr.irimee.in/sites/default/files/FUEL%20SYSTEM%20ALCO%20%26HHP_2.pdf.

[28] Luber, «The dynamics of fuel filtration,» Luber finer, [En línea]. Available: https://luberfiner.com/lfu4/.

[29] Donaldson, «What do primary and secondary filters in your fuel system do?,» Donaldson filtration solutions, [En línea]. Available: https://www.donaldson.com/en-us/engine/oem-systems/technical-articles/what-filters-do-fuel-system.

[30] Baldwin, «Fuel filtration solutions,» Baldwin filters, [En línea]. Available: https://www.baldwinfilters.com/us/en/solutions/fuel-filtration.html.

[31] Organización Internacional de Normalización, «Hydraulic fluid power -Fluids- Method for coding the level of contamination by solid particles,» ISO, 2021. [En línea]. Available: https://www.iso.org/standard/79716.html.

[32] Donaldson, «Water is te enemy of diesel engines,» Donaldson filtration solution, [En línea]. Available: https://www.donaldson.com/en-us/bulk-fluid-storage/technical-articles/water-enemy-diesel-engines.

[33] International Council on Clean Transportation- ICCT, Ricardo Energy & Environment, 27 Abril 2017. [En línea]. Available: https://theicct.org/wp-content/uploads/2021/06/HDV-Technology-Potential-and-Cost-Study_Ricardo_Consultant-Report_26052017_vF.pdf.

[34] FOTON, Foton motor Service manual- TUNLAND series VI, 2024.

[35] Robert Bosch GmbH, «Operating fluids. Diesel,» de *Automotive Handbook*, 2022, p. 573.

[36] FOTON, «Foton Distribution Management System,» Beiqui Foton Motor Co, [En línea]. Available: https://globaldms.foton.com.cn/Login.aspx?ReturnUrl=%2fHome.aspx#/PartsDemandPicture.

[37] N. Thanh Tung, L. Van Van y N. Thai Van, «Effects of Speeds and Road Types on the Highest Dynamic Factor of the Load of the Articulated Truck, » *Advances in Engineering Research and Application,* pp. 465-471, 2024.

ANEXOS

Anexo A. Plano del soporte

Anexo B. Plano del acople rápido