



ING. AUTOMOTRIZ

**Trabajo integración Curricular previa a la
obtención del título de Ingeniero en Automotriz.**

**Estudio comparativo de un sistema de
alimentación Diesel VP44, con un sistema de
alimentación CRDI**

AUTORES:

Lenin Ramírez
Diego Lahuasi

TUTOR:

Ing. Pablo Ante

CERTIFICACIÓN

Nosotros, Lenin Ramírez, Diego Lahuasi, declaramos bajo juramento, que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido presentado anteriormente para ningún grado o calificación profesional y que se ha consultado la bibliografía detallada.

Cedemos nuestros derechos de propiedad intelectual a la Universidad Internacional del Ecuador, para que sea publicado y divulgado en internet, según lo establecido en la Ley de propiedad Intelectual, reglamento y leyes.

Lenin Ramírez

Diego Lahuasi

Yo, , certifico que conozco al autor del presente trabajo siendo el responsable exclusivo tanto de su originalidad y autenticidad, como de su contenido.

Firma profesor

DEDICATORIA

Este artículo va dedicado a mis padres quienes desde pequeño me enseñaron los valores necesarios para ser un buen ciudadano y buen hombre, así como también brindarme todos los recursos necesarios para poder llevar a cabo mi formación profesional; a mis hermanas por su apoyo incondicional en todos los años de mi formación y a mi sobrino al cual quiero verlo crecer y convertirse de igual manera en un hombre de bien.

Con todo el aprecio les dedico este trabajo.

Lenin Konnik Ramírez López

El tiempo sabio y bien invertido elevan a una meta alcanzada, que dedico con desbordante cariño a mi familia, mi madre y mi hijos, por motivarme a obtener los logros de este sueño, por ser mi luz para guiar mis pasos, y ser un soporte para no decaer a mitad del camino y sobre todo a Dios, que con su infinito amor me ha permitido culminar una etapa importante en mi vida.

Con amor

Diego Orlando Lahuasi Terán

AGRADECIMIENTO

A Dios por permitirme gozar de mucha salud y felicidad para seguir alcanzando mis objetivos.

A mis padres por su carácter fuerte para guiarme y nunca dejarme vencer y sobre todo por sus valiosos consejos que me guiaban en cada momento.

A mis hermanas por su apoyo incondicional y por brindarme los recursos necesarios para iniciar mi carrera universitaria.

A mi sobrino por su cariño único, con lo cual me ha motivado a ser mejor persona.

Un sincero agradecimiento a mis docentes por ser una guía en todo el proceso de formación y en especial al Ing. Pablo Ante por su ayuda desinteresada en el progreso de este trabajo.

Finalmente, a la prestigiosa Universidad Internacional Del Ecuador por abrirme las puertas y permitirme ser un profesional competitivo con conocimientos sólidos.

A todos ustedes, gracias.

Lenin Konnik Ramírez López

Una meta culminada refleja el entorno social, hogar con enseñanza de paciencia y enérgica corrección; razón por la cual extiendo mis agradecimientos hacia mi familia, pilar principal en la vida, a mis amigos y compañeros que han enriquecido mi desarrollo personal y profesional, la institución que me forma como profesional y a todos quienes conforman el camino de la vida que con su apoyo han impulsado la culminación de mis proyectos.

Gracias por los momentos y sueños compartidos.

un proyecto terminado da inicio a mucho más....

Diego Orlando Lahuasi Terán

ÍNDICE DE CONTENIDO

Certificación	iii
Dedicatoria.....	iv
Agradecimiento	v
Índice de contenido.....	vi
Resumen	8
Abstract.....	9
Introducción.....	10
Marco Teórico	11
Evolución de los sistemas de inyección Diesel.....	11
Sistema de inyección VP44	11
Sistema Common Rail de inyección Direct (CRDI).....	11
Variables de investigación	12
Variables independientes.....	12
Variables dependientes.....	12
Variables intervinientes.....	12
Materiales y Métodos	13
Tipo de investigación.....	13
Variables de estudio y su operacionalización	13
Unidades de análisis.....	13
Instrumentos y equipos de medición.....	15
Procedimientos de prueba	18
Análisis arquitectónico y de componentes	18
Prueba de opacidad.....	18
Prueba de consumo específico de combustible	19
Prueba de nivel de ruido.....	19
Análisis de confiabilidad y costos.....	19
Resultados y Discusión.....	20
Comparación arquitectónica y funcional	20
Prueba de opacidad	22
Resultados de consumo específico de combustible	23

Resultados de nivel de ruido	24
Síntesis comparativa de confiabilidad y costos operativos.....	24
Conclusiones.....	26
Bibliografía.....	27
Anexos	29

ESTUDIO COMPARATIVO DE UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN DIESEL VP44, CON UN SISTEMA DE ALIMENTACIÓN CRDI

Diego Lahuasi, Lenin Ramírez

Ingeniero Universidad Internacional del Ecuador, pante@uide.edu.ec; Quito - Ecuador

Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, email (leramirezlo@internacional.edu.ec, Quito – Ecuador

Ingeniería Automotriz Universidad Internacional del Ecuador, email (dilahuasite@internacional.edu.ec, Quito – Ecuador

RESUMEN

Introducción: Los sistemas de inyección diésel han evolucionado desde configuraciones mecánicas hacia soluciones electrónicas avanzadas, impulsados por normativas ambientales restrictivas y demandas de mayor eficiencia. Este estudio compara el desempeño de dos tecnologías representativas: la bomba VP44 (Verteiler Pumpe), sistema de transición con control electrónico parcial, y el Common Rail Direct Injection (CRDI), tecnología moderna que desacopla la generación de presión del proceso de inyección. El propósito del estudio es examinar ambos sistemas de manera comparativa en cuanto a confiabilidad, arquitectura, costos y rendimiento operativo.

Metodología: Se llevó a cabo una investigación de tipo cuasiexperimental comparativa, empleando dos vehículos Chevrolet DMAX (uno de 2012 con VP44 y otro de 2022 con CRDI), ambos dotados de motores ISUZU de 3.0L. Se llevaron a cabo pruebas estandarizadas de opacidad conforme a la norma NTE INEN 2207:2002, así como también se midieron el consumo específico de combustible usando un caudalímetro electrónico y el nivel sonoro con un sonómetro digital. Además, se llevó a cabo la evaluación de confiabilidad a través de registros de mantenimiento y el análisis arquitectónico documental. **Resultados:** El sistema CRDI mostró ser superior en términos técnicos, pues su consumo específico de Diesel se redujo un 14,62% (266,0 g/kWh frente a 311,3 g/kWh), el nivel de ruido disminuyó un 8,75% (6,6 dB menos) y sus emisiones de opacidad fueron estadísticamente similares (24,3% vs. 23,6%). El MTBF fue más alto en CRDI (115.000 km frente a 85.000 km), pero con costos de reparación más elevados. **Conclusiones:** El CRDI ofrece ventajas significativas en eficiencia energética, confort acústico y confiabilidad operativa, compensando sus mayores costos iniciales mediante ahorros en consumo de combustible a largo plazo. La selección tecnológica debe considerar disponibilidad de infraestructura técnica especializada y calidad regional del combustible.

Palabras clave: Diesel, bomba CRDI, bomba VP44, opacidad.

ABSTRACT

Introduction: Diesel injection systems have evolved from mechanical configurations to advanced electronic solutions, driven by restrictive environmental regulations and demands for greater efficiency. This study compares the performance of two representative technologies: the VP44 (Verteiler Pumpe) pump, a transitional system with partial electronic control, and Common Rail Direct Injection (CRDI), a modern technology that decouples pressure generation from the injection process. The purpose of the study is to examine both systems comparatively in terms of reliability, architecture, costs, and operational performance. **Methodology:** A comparative quasi-experimental study was conducted using two Chevrolet DMAX vehicles (one from 2012 with VP44 and another from 2022 with CRDI), both equipped with 3.0L ISUZU engines. Standardized opacity tests were carried out in accordance with the NTE INEN 2207:2002 standard, and specific fuel consumption was measured using an electronic flow meter and noise level using a digital sound level meter. In addition, reliability was assessed through maintenance records and documentary architectural analysis. **Results:** The CRDI system proved to be superior in technical terms, as its specific diesel consumption was reduced by 14.62% (266.0 g/kWh vs. 311.3 g/kWh), the noise level decreased by 8.75% (6.6 dB less), and its opacity emissions were statistically similar (24.3% vs. 23.6%). The MTBF was higher in CRDI (115,000 km vs. 85,000 km), but with higher repair costs. **Conclusions:** CRDI offers significant advantages in energy efficiency, acoustic comfort, and operational reliability, offsetting its higher initial costs through long-term fuel consumption savings. Technology selection should consider the availability of specialized technical infrastructure and regional fuel quality.

Keywords: Diesel, pump CRDI, pump VP44, opacity.

INTRODUCCIÓN

El sistema de inyección diésel es el encargado de suministrar el combustible necesario para que el motor funcione correctamente, el combustible tiene que ser inyectado en una proporción determinada y precisa, de lo contrario, no se podrá realizar la combustión correctamente y el motor comenzará a presentar fallas en su funcionamiento (Marnissi & Hwang, 2024). Dentro del sistema de inyección, encontramos dos elementos muy relevantes en la inyección de Diesel: la bomba de inyección y los inyectores. Los inyectores son los encargados de pulverizar el combustible hacia cada cilindro del motor en forma de fina lluvia, que es recibido por la bomba de inyección y es la encargada de brindar la cantidad de combustible necesaria y con la presión adecuada, a cada inyector, en este caso la presión y la cantidad de combustible que entregará la bomba irá variando constantemente adaptándose a las necesidades del motor en cada circunstancia (Xu et al., 2024).

Ramírez (2016) en su tesis titulada “Análisis del comportamiento del flujo transitorio en un sistema de inyección de un motor Diésel” señala que en un proceso de combustión de calidad en el cilindro, uno de los puntos más importantes es el cálculo de los esfuerzos cortantes dentro de un caudal para permitirse saber tanto la capacidad, como la tolerancia de esfuerzo que resisten estos materiales dentro de los conductos del alta y de baja presión. Además, un fluido dentro de un conducto suele tomar la forma del mismo, pero según su diámetro puede variar y generar diferentes reacciones que resultan benéficas o afectan al funcionamiento del sistema de alimentación Diésel, los esfuerzos cortantes son datos con que se sabe con exactitud las características que debe cumplir estrictamente un fluido para circular de manera correcta por las cañerías del sistema de alimentación (Tolmac et al., 2024).

Por tanto, como objetivo general del presente artículo se tiene: la comparación del desempeño de las bombas de inyección CRDI y VP44, utilizadas en la inyección de combustible en motores Diesel. Y como objetivos específicos: primero, caracterizar técnicamente las arquitecturas, componentes y estrategias de control electrónico de las bombas de inyección VP44 y CRDI; segundo, evaluar comparativamente el desempeño operacional de ambos sistemas mediante pruebas de consumo específico de combustible, emisiones de opacidad y niveles de ruido en operación, y tercero, analizar las diferencias en términos de confiabilidad, costos de mantenimiento y facilidad de diagnóstico entre ambas tecnologías.

MARCO TEÓRICO

Evolución de los sistemas de inyección Diesel

Los sistemas de inyección Diesel han experimentado una enorme evolución impulsada por normativas ambientales cada vez más restrictivas y la demanda de mayor eficiencia energética. La transición desde sistemas mecánicos hacia soluciones electrónicas ha permitido un control más preciso de los parámetros de inyección, resultando en mejoras sustanciales en consumo, emisiones y potencia (Ferrari & Vento, Thermal effects on Common Rail injection system hydraulic performance, 2023)

Sistema de inyección VP44

La bomba VP44 (Verteiler Pumpe) es un avance tecnológico de transición entre los sistemas totalmente electrónicos y los que son puramente mecánicos. Es una bomba rotativa de embolo radial que tiene un control electrónico a través de una electroválvula dosificadora. Conforme a la demanda de carga y al régimen del motor, el sistema funciona con presiones para inyección que oscilan entre 1350 y 180 bar (BOSCH, 2004). La presión se produce de forma directa en la bomba y se envía a cada inyector por medio de tuberías individuales.

El control de la cantidad inyectada se realiza mediante una válvula de solenoide que regula el tiempo de apertura del embolo de bombeo, mientras que la temporización de inyección se gestiona mediante la posición angular de la bomba respecto al cigüeñal. La arquitectura limita la flexibilidad en la conformación de la ley de inyección, permitiendo únicamente una inyección principal por ciclo (BOSCH, 2022).

Sistema Common Rail de inyección Direct (CRDI)

El sistema Common Rail representa un avance tecnológico sustancial al desacoplar la generación de presión del proceso de inyección. La bomba de alta presión alimenta un riel común (rail) que mantiene el combustible a presión constante, típicamente entre 200 y 2500 bar en sistemas modernos. Los inyectores, controlados electrónicamente mediante solenoides o piezoeléctricos, administran la cantidad y temporización de combustible de manera independiente para cada cilindro (DENSO, 2025).

La arquitectura permite implementar estrategias de inyección múltiple (pre inyección, inyección principal, post inyección) dentro de un mismo ciclo de

combustión, optimizando el proceso termodinámico, reduciendo emisiones contaminantes y disminuyendo el ruido característico del motor Diesel. La gestión electrónica del sistema posibilita adaptaciones en tiempo real según condiciones de operación, temperatura, altitud y calidad de combustible (Balaji et al., 2021).

Variables de investigación

Se determinaron las siguientes variables para la comparación entre las tecnologías.

Variables independientes

Los sistemas de inyección (VP44 vs. CDRI), que difieren en su arquitectura de generación y control de presión, configuración de componentes electromecánicos y capacidad de inyecciones múltiples (Castro & Gonzáles, 2019).

Variables dependientes

Consumo específico de combustible (g/kWh), indicador de eficiencia energética del motor; opacidad de emisiones (%), medida del contenido de partículas según norma INEN 2204; nivel de ruido (dB), relacionado con la suavidad operacional del sistema (Cervera, 2018).

Variables intervinientes

Temperatura ambiente, calidad del combustible, estado mecánico del motor y régimen de operación, controladas mediante procedimientos estandarizados de medición (Ferrari & Vassallo, 2025).

La definición de estas variables permitió el establecimiento de criterios técnicos objetivos para evaluar comparativamente ambos sistemas en términos de desempeño, eficiencia y características operacionales.

MATERIALES Y MÉTODOS

Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo experimental con diseño comparativo, ya que se realizaron pruebas controladas sobre dos sistemas de inyección diferentes bajo condiciones estandarizadas. Se utilizaron dos vehículos con características técnicas similares (mismo fabricante, cilindrada y aplicación) que difieren únicamente en el sistema de inyección, lo que permite aislar el efecto de la variable independiente (tipo de bomba) sobre las variables dependientes medidas (consumo, emisiones y ruido). Las pruebas se ejecutaron siguiendo protocolos normalizados que garantizaron la validez y reproducibilidad de los resultados.


Variables de estudio y su operacionalización

En correspondencia con los objetivos específicos planteados, las variables se operacionalizaron mediante técnicas de medición normalizadas. Para la caracterización técnica (objetivo 1), se realizó un análisis documental de especificaciones técnicas de fabricantes y literatura especializada. Para la evaluación del desempeño operacional (objetivo 2), el consumo específico de combustible se cuantificó mediante cuadralimetría electrónica en régimen estabilizado (1.500, 2.500 y 3.500 rpm), expresado en g/kWh; la opacidad se midió conforme la norma NTE INEN 2207:2002 mediante opacimetría en aceleración libre, registrada en porcentaje; y el ruido se determinó siguiendo lineamientos de ISO 366:2022 con sonometría digital en banco de pruebas, expresado en dB(A). Para el análisis confiabilidad y costos (objetivo 3), se aplicó revisión de historiales de mantenimiento y cotización de repuestos.

Unidades de análisis

Primer vehículo, Chevrolet DMAX año 2012, equipado con motor ISUZU 4JH1-TC de 3,0L, sistema de inyección VP44 (bomba BOSCH), potencia 130 kW @ 3600 rpm, torque 360 Nm @ 1800-2800 rpm. En la tabla 1, se presenta las características de la bomba de la marca BOSCH

Tabla 1*Parámetros técnicos de la bomba modelo VP44 de la marca BOSCH*

Marca	BOSCH
Modelo	VP44
Tipo	Bomba de inyección de Diesel con distribuidor de émbolo radial
Peso	8 kg
Medidas	12 x 12 x 12 pulgadas
Aplicación	Para motor diésel ISUZU 4JH1-TC
Imagen referencial	

Nota: Adaptado de (BOSCH, 2004)

Segundo vehículo, Chevrolet DMAX año 2022, equipado con motor ISUZU 4JJ1 de 3,0L, sistema de inyección CRDI (bomba DENSO 294000-1404), potencia 147 kW @ 3600 rpm, torque 430 Nm @ 1800-2800 rpm. Las características de la bomba de la marca DENSO, se presenta en la tabla 2:

Tabla 2*Parámetros técnicos de la bomba modelo 294000-1404 de la marca DENSO*

Marca	DENSO
Modelo	294000-1404
Tipo	Bomba diésel HP3 de inyección diésel Common Rail (CRDI)
Peso	5,6 kg
Medidas	7 x 7,29 x 5,7 pulgadas
Número de pieza	8-98155988-4
Aplicación	Para motor diésel ISUZU 4JJ1

Imagen referencial



Nota: Adaptado de (DENSO, 2025)

Instrumentos y equipos de medición

Todos los instrumentos utilizados pertenecen a la empresa Garner Espinosa CA., para las mediciones de opacidad se aplicó el procedimiento detallado en la norma INEN 2204 (INEN, 2002), la misma que regula los límites de contaminación permitidos por los vehículos, además de los análisis de opacidad o prueba de gases midiendo el humo negro que desprende el vehículo, y se utilizó el opacímetro BOSCH BEA 070, calibrado según procedimientos del fabricante, resolución 0,1%, rango de medición 0-100% de opacidad y 0-10 m⁻¹ de coeficiente de absorción, los demás datos se muestran en la tabla 3.

Tabla 3

Parámetros técnicos del opacímetro modelo BEA 070 de la marca BOSCH

Marca	BOSCH
Modelo	BEA 070
	Dimensiones 414 x 330 x 280 mm
	Peso aproximada 10 kg
	Alimentación eléctrica 100-240V, 50-60 Hz
	Temperatura funcionamiento 5°C a 45°C
	Temperatura máxima sonda gases 250°C
Características	Temperatura máxima punto medición 200°C
	Grado de opacidad Intervalo Medición: 0-100%
	Resolución: 0,1%
	Coefficiente de absorción Intervalo Medición: 0-10 m-1
	Resolución: 0,01 % m-1

Imagen Referencial



Nota: Adaptado de (AutoExpert, 2022)

Para consumo específico de combustible, se utilizó un caudalímetro electrónico de aluminio de la serie EGM de la marca FLOMEC, cuyas características se detallan en la tabla 4, el consumo se mide en condiciones de régimen estabilizado.

Tabla 4

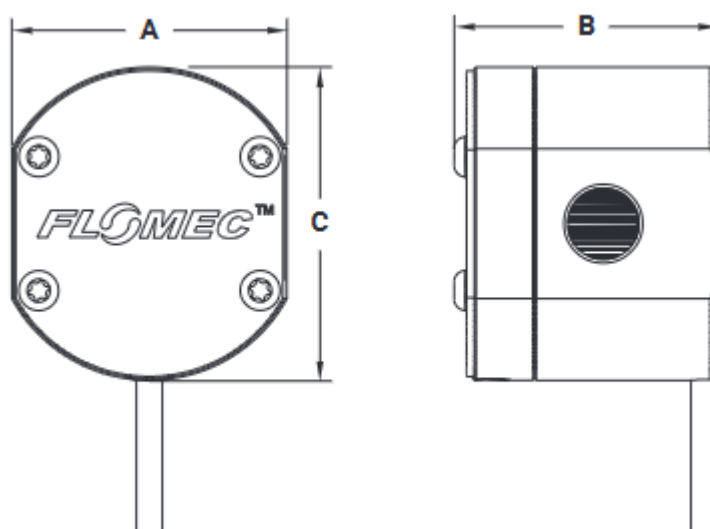
Parámetros técnicos del caudalímetro electrónico modelo EGM006 de la marca FLOMEC

Marca	FLOMEC
Modelo	EGM006
Características	Dimensiones A=5,8 cm; B=6,4 cm y C=3,8 cm Tecnología: Engranaje ovalado Tamaño: 1/8 pulg., 1/4 pulg., 3/8 pulg., 1/2 pulg. Precisión (% de la lectura): $\pm 1,0$ % Repetibilidad: Normalmente $\pm 0,03$ % Temperatura de funcionamiento: 5 F - +176 F (-15 °C - +80 °C). Tipo de salida de impulsos: colector abierto NPN (sensor de efecto Hall) Impulso de tensión: 5-24 V (CC) Consumo de corriente: hasta 20 mA. Corriente de conmutación: máximo 10 mA. Medida nominal: 1/4" (6 mm) Amplitud de caudal nominal a 3 cP: de 0,5 a 27 GPH (equivalente a 2-100 L/h) Presión máxima (medidores de flujo AI): 500 psi (34 bar)

Filtración sugerida: malla 200 (75 μm)



Imagen Referencial



Nota: Adaptado de (FLOMEC, 2025)

Para la medición de ruido, se usó un sonómetro digital modelo GT1355B marca BENETECH, que se especifica en la tabla 5, las mediciones se realizaron acercando el sonómetro a la bomba en funcionamiento en un banco de prueba, emulando las indicaciones de la normativa ISO 362 (2022).

Tabla 5

Parámetros técnicos del sonómetro digital modelo GT1355B de la marca GT1355B

Marca	BENETECH
Modelo	GT1355B
Características	Dimensiones: 160 x 56 x 31 mm (sin incluir la esponja antiviento) Peso: Aproximadamente 126 g (sin incluir la esponja antiviento) Rango de medición: 30-130 dB(A), 35-130 dB(C)

Precisión: ± 1.5 dB (referencia 94 dB @ 1 kHz)

Resolución: 0.1 dB

Respuesta en frecuencia: 31.5 Hz ~ 8.5 kHz

Ponderación de frecuencia: A / C

Temperatura de operación: 0°C a 50°C

**Imagen
Referencial**



Nota: Adaptado de (BENETECH, 2025)

Procedimientos de prueba

Análisis arquitectónico y de componentes

Se realizó una revisión técnica documental de las especificaciones de ambos sistemas, identificando: los componentes principales y su función, la forma de control electrónico, los rangos de operación para las presiones de trabajo, la capacidad para inyecciones múltiples, y los requerimientos de mantenimiento según los manuales del fabricante.

Prueba de opacidad

Realizado de acuerdo a la norma NTE INEN 2207:2002, procedimiento para vehículos Diesel en aceleración libre: primero, un precalentamiento del motor hasta la temperatura de operación, segundo, la estabilización en régimen de ralentí por 30 segundos, tercero, una aceleración rápida a fondo hasta régimen máximo sin carga, cuarto, mantenimiento por 2 a 3 segundos, quinto, desaceleración a ralentí, sexto, repetición del proceso 3 veces con intervalos de 45 segundos, y séptimo, registro de valores máximos de opacidad en cada prueba.

Prueba de consumo específico de combustible

El procedimiento consistió en primer lugar, la instalación del caudalímetro en la línea de alimentación de combustible, antes de las bombas de inyección, como segundo paso el precalentamiento del motor a temperatura de operación, tercero, la estabilización en régimen constante de 1500, 2500 y 3500 rpm durante 5 minutos en cada punto, cuarto, el registro del consumo volumétrico (ml/min), como quinto paso, el cálculo del consumo específico mediante la relación consumo por potencia efectiva, sexto, la aplicación de tres repeticiones por punto de medición, y séptimo, la corrección por densidad de combustible y temperatura ambiente.

Prueba de nivel de ruido

La metodología, que se aplicó paso por: primero, la medición en entorno controlado con ruido ambiente menor a 45 dB, segundo, bomba puesta en operación en banco de pruebas, tercero, posicionamiento del sonómetro a 10 cm de la bomba, a una altura media del equipo, cuarto, realizar mediciones en ralentí (750.800 rpm), 2.000 rpm y 3.000 rpm, quinto, llenar registro durante 30 segundos con promedio de valores (ponderación A), y sexto, realizar tres repeticiones por régimen evaluado.

Análisis de confiabilidad y costos

Dicho análisis se realizó mediante la revisión de registros de mantenimiento de los vehículos analizados, consultas de fallas comunes en talleres especializados y cotizaciones de repuestos principales utilizados, tiempo promedio de diagnóstico y reparación y requerimientos de equipamiento especializado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comparación arquitectónica y funcional

La tabla 6 presenta una comparación sistemática de las características de arquitectura y funcionales de ambos sistemas de inyección

Tabla 6

Comparación técnica entre sistemas VP44 y CRDI

	Parámetro	Sistema VP44	Sistema CRDI	Sistema con Ventaja
Arquitectura	Principio de operación	Bomba rotativa con control electrónico	Riel común de alta presión con inyectores controlados	CRDI
	Generación de presión	En bomba, por cada evento de inyección	Continua, desacoplada de la inyección	CRDI
	Presión de inyección	180-1350 bar (variable)	200-2500 bar (regulable)	CRDI
	Flexibilidad de presión	Limitada, depende del régimen	Alta, independiente del régimen	CRDI
	Bomba	Rotativa de émbolo radial	Bomba CP3 de pistones radiales	Similar
Componentes principales	Elemento de control	Válvula solenoide dosificadora	ECU + inyectores piezoeléctricos/solenoides	CRDI
	Sensores requeridos	6-8 sensores básicos	10-15 sensores de alta precisión	VP44 (simplicidad)
	Cableado y conectores	Moderada complejidad	Alta complejidad	VP44

Estrategia de control	Inyecciones por ciclo	1 (solo principal)	Hasta 5 (piloto, pre, principal, post)	CRDI
	Control de cantidad	Por tiempo de apertura de válvula	Por tiempo de apertura de inyector	CRDI
	Corrección por parámetros	Limitada (temperatura, presión boost)	Integral (múltiples mapas adaptativos)	CRDI
	Capacidad de mapeo	Mapas básicos en ECU	Mapas 3D complejos, auto adaptativos	CRDI
	Facilidad de diagnóstico	Moderada, equipos básicos	Compleja, requiere escáner específico	VP44
Diagnóstico y mantenimiento	Fallas típicas	Válvula dosificadora, sensor ángulo	Inyectores, sensor rail, regulador presión	VP44
	Costo de bomba (USD)	800-1200	1500-2500	VP44
	Costo de inyector (USD)	150-250	300-500	VP44
	Intervalo calibración	80,000-100,000 km	120,000-160,000 km	CRDI
	Disponibilidad repuestos	Decreciente (tecnología obsoleta)	Alta (tecnología actual)	CRDI

Nota: Datos tomados de (BOSCH, 2004) y (DENSO, 2025)

Prueba de opacidad

Los resultados de las pruebas de emisiones se presentan en la tabla 7 y la figura 1, el análisis revela que ambos sistemas cumplen con la norma INEN 2207:2002 que establece un límite máximo de 50% de opacidad para vehículos posteriores al año 2000.

Tabla 7.

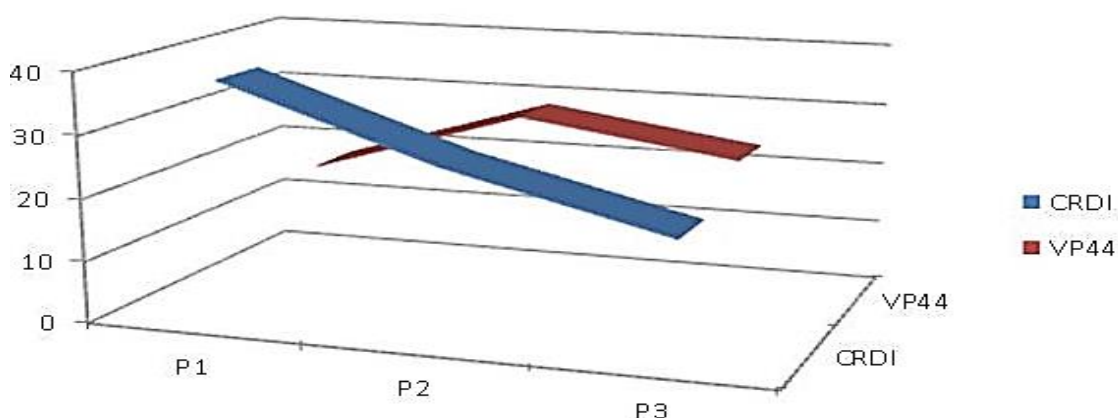
Resultado de pruebas de opacidad

Parámetros	CRDI	VP44
Marca	Chevrolet	Chevrolet
Modelo	DMAX	DMAX
Año fabricación	2022	2012
Régimen ralentí (rpm)	800	750
Régimen máximo (rpm)	5000	4500
Opacidad P1 (%)	38,1	18,1
Opacidad P2 (%)	26,7	28,7
Opacidad P3 (%)	18,4	23,7
Opacidad promedio	24,3	23,6

Nota: Desarrollado a partir de las mediciones realizadas con el opacímetro.

Figura 1.

Análisis de opacidad de bomba CRDI y VP44



Nota: Desarrollado a partir de las mediciones realizadas con el opacímetro.

El sistema VP44 presenta una opacidad promedio de 23,6% mientras que el CDRI muestra un promedio de 24,3%, una diferencia de apenas 0,7 puntos porcentuales que no resulta en lo estadístico representativo. Sin embargo, el patrón de comportamiento difiere notablemente, puesto que el VP44 arroja valores crecientes entre la primera y segunda prueba, pasando de 18,1% a 28,7%, sugiriendo una combustión menos estable durante periodo transitorios rápidos, mientras que, el sistema CDRI evidencia un comportamiento descendente (38,1% a 18,4%), atribuible a la estrategia de inyecciones múltiples que permite un precalentamiento de la cámara mediante inyecciones piloto. El pico inicial de 38,1% en el sistema CRDI puede estar asociado a desgaste o mal funcionamiento de los inyectores (Inlago & Vinueza, 2023).

Resultados de consumo específico de combustible

En la tabla 8 se compara los consumos específicos de combustible por parte de ambos sistemas.

Tabla 8.

Comparativo del consumo específico de combustible

Régimen (rpm)	VP44 Consumo (ml/min)	Consumo Específico de VP44 (g/kWh)	CRDI Consumo (ml/min)	Consumo Específico de CRDI (g/kWh)	Reducción del Consumo (%) del CDRI con respecto al VP44	Reducción del Consumo Específico (%) con respecto al VP44
Ralentí (800)	38,5	-	32,2	-	16,36%	
1500	125,3	287	108,6	241	13,33%	16,03%
2500	318,7	312	276,4	268	13,27%	14,10%
3500	542,8	335	468,3	289	13,73%	13,73%
Promedio operativo	-	311,3	-	266,0	-	14,62%

Nota: Cálculos basados en densidad del Diesel de 0,84 kg/l y curvas de potencia de los motores ISUZU 4JH1-TC y 4JJ1.

El sistema CDRI se muestra una reducción promedio del 14,62% en el consumo específico de combustible respecto al sistema VP44, y dicha mejora se atribuye principalmente a tres factores: el primero, la mayor precisión de inyección, ya que el sistema CDRI Permite una atomización más fina del combustible, mejorando la mezcla aire-combustible y la eficiencia en la combustión; el segundo factor, las inyecciones

múltiples, la preinyección eleva a la temperatura de la cámara, reduciendo el retardo de ignición de la inyección principal y optimizando el desarrollo de presión durante la carrera de potencia; el tercer factor, el control electrónico adaptativo, puesto que la gestión integral permite ajustes en tiempo real según las condiciones operativas, maximizando la eficiencia en cada punto de funcionamiento. La ventaja es más pronunciada a regímenes bajos y medios, donde las estrategias de inyección múltiple tienen mayor impacto en la calidad de la combustión.

Resultados de nivel de ruido

La comparativa entre los niveles de ruido de ambos sistemas de inyección, se presenta en la tabla 9.

Tabla 9.

Comparativo en operación del nivel de ruido

Régimen (rpm)	VP44 Nivel sonoro (dB A)	CRDI Nivel sonoro (dB A)	Reducción del Nivel sonoro del CRDI con respecto al VP44 (dB)	Reducción del Nivel sonoro del CRDI con respecto al VP44 (%)
Ralentí (800)	68,5	62,3	6,2	9,05%
2000	75,8	69,4	6,4	8,44%
3000	82,3	75,1	7,2	8,75%
Promedio	75,5	68,9	6,6	8,75%

Nota: mediciones realizadas a 10 cm de las bombas instaladas en los bancos de prueba.

El sistema CDRI presenta una reducción promedio de 6,6 dB en el nivel de ruido, equivalente a una disminución perceptible de 8,75%, dicha mejora se debe principalmente a la implementación de inyecciones piloto que elevan gradualmente la presión en la cámara antes de la inyección principal, suavizando el característico “golpeteo” Diesel causado por el rápido incremento de presión durante la autoignición.

La reducción de ruido contribuye al confort del habitáculo y al cumplimiento de normativas de ruido ambiental, representando una ventaja cualitativa importante en aplicaciones de transporte de pasajeros.

Síntesis comparativa de confiabilidad y costos operativos

La tabla 10 describe la comparación entre los sistemas en términos de costes y fiabilidad operativa.

Tabla 10.*Análisis de confiabilidad y costos de operación*

Aspecto	Sistema VP44	Sistema CRDI	Observaciones
Fallas comunes	Válvula dosificadora (40%), sensor de ángulo (25%), desgaste de émbolos (20%)	Inyectores (45%), sensor de presión rail (20%), regulador de presión (15%)	CRDI más sensible a calidad de combustible
MTBF (Mean Time Between Failures)	85.000 km	115.000 km	CRDI muestra mayor confiabilidad con mantenimiento adecuado
Costo reparación bomba	USD 350-600 (refacción)	USD 800-1400 (refacción)	VP44 más económico en reparación
Costo inyectores (juego 4)	USD 600-1000	USD 1200-2000	VP44 significativamente más económico
Costo diagnóstico	USD 40-60 (equipo básico)	USD 80-150 (escáner específico)	VP44 más accesible
Disponibilidad de talleres capacitados	Decreciente	Creciente	CRDI como tecnología actual tiene mejor soporte
Sensibilidad a combustible adulterado	Moderada	Alta	CRDI requiere Diesel de mejor calidad
Costo operativo 100,000 km*	USD 3,850	USD 3,240	CRDI más económico por menor consumo

Nota: Elaborado con datos de consultas a talleres especializados y literatura técnica.

Aunque el sistema CRDI presenta costos iniciales y de reparación superiores, su mayor eficiencia en consumo de combustible (14,62% de ahorro) compensa estos costos en el largo plazo. Para un recorrido anual de 25.000 km, y un consumo promedio de 0,04 L/km el consumo anual en dólares sería de USD 3.000, por lo que el ahorro de combustible del CRDI es de aproximadamente USD 435, si se establece el precio del Diesel en USD 2,78 por litro, lo que en 5 años amortizaría la diferencia de costos en componentes.

CONCLUSIONES

Con respecto a las características técnicas de ambos sistemas, el CRDI presenta grandes ventajas en su arquitectura sobre el VP44, destacando la capacidad de inyecciones múltiples (hasta 5 por ciclo versus una), mayor rango de presión de operación, (200-2500 bar versus 180-1350 bar) y un control adaptativo integral. Todas esas características permiten una optimización superior del proceso de combustión, aunque a costa de mayor complejidad de componentes y requerimientos de diagnóstico especializado. Aunque la tecnología VP44 es más sencilla y menos costosa al principio, se trata de un diseño anticuado que cuenta con una disponibilidad de repuestos cada vez menor.

En cuanto a la evaluación del desempeño operacional de las pruebas experimentales, se ha demostrado que el sistema CRDI presenta una disminución del 14,62% en el consumo específico de combustible (266,0 g/kWh en comparación con 311,3 g/kWh) y emisiones de opacidad comparables desde un punto de vista estadístico (23,6% VP44 frente a 24,3% CRDI con un patrón conductual distinto). También se ha registrado una reducción del nivel de ruido de 6,6 dB (un 8,75% menos). Los resultados demuestran que el CRDI es mejor en cuanto a la eficiencia energética y al confort acústico, con un desempeño igual en emisiones de partículas por debajo de condiciones normales de funcionamiento.

El sistema CRDI demuestra una superior confiabilidad operativa en lo que se refiere a los costos y el análisis de la confiabilidad, con un MTBF de 115.000 km frente a 85.000 km, así como menores costos operativos totales a largo plazo (USD 3.340 en comparación con USD 3.850 por cada 100.000 km), lo cual compensa sus costos más altos de reparación a través del ahorro del consumo de combustible. No obstante, es más sensible a la calidad del combustible y necesita una evaluación técnica especializada, lo que podría ser un inconveniente en situaciones donde la infraestructura técnica o el combustible no sean de buena calidad. La elección entre las dos tecnologías debe tomar en cuenta la calidad del combustible accesible en la región, el perfil de uso y si hay mantenimiento especializado disponible.

BIBLIOGRAFÍA

- AutoExpert. (2022). *BOSCH BEA 070*. https://www.autoexpert-spain.com/wp-content/uploads/Catalogo_bosch_bea070_es.pdf
- Balaji, G., Sathish, T., Mankar, S., & Kumar, A. (2021). *Study on CRDI engine for the various fuel injection pressures*. International Conference on Advances in Thermal Engineering and Applications, Tamil Nadu, India.
<https://doi.org/10.1088/1742-6596/2054/1/012021>
- BENETECH. (2025). *Sound Level Meter GT1355B*.
<http://www.benetechno.net/en/products/sound-level-meter-gt1355b.html>
- BOSCH. (2004). *BOSCH VP44 Fuel injection system*.
- BOSCH. (2022). *Diagnosis, Testing and Repair Tools*. <https://boschdiesel.co.za/wp-content/uploads/2022/08/Test-Equipments-Brochure.pdf>
- Castro, J., & Gonzáles, M. (2019). Análisis comparativo del funcionamiento del inyector de un motor CRDI bajo diferentes alturas geográficas. *INNOVA Research Journal*, ISSN 2477-9024, 4(1), 72-87.
<https://doi.org/10.33890/innova.v4.n1.2019.906>
- Cervera, L. (2018). *Análisis de la variación de presión de inyección para determinar el consumo específico de combustible en motores Common Rail de 3000cc, Chiclayo*. [Tesis de grado, Universidad César Vallejo].
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/28562>
- DENSO. (2025). *Bombas de combustible*. <https://www.densoautoparts.com/fuel-pumps/#knowledge>
- Ferrari, A., & Vassallo, A. (2025). The Impact of the Common Rail Fuel Injection System on Performance and Emissions of Modern and Future Compression Ignition Engines. *Energies*, 18(19), 5259. <https://doi.org/10.3390/en18195259>
- Ferrari, A., & Vento, O. (2023). Thermal effects on Common Rail injection system hydraulic performance. *International Journal of Engine Research*, 24(8).
<https://doi.org/10.1177/146808742311624>
- FLOMEC. (2025). *EGM SERIES OVAL GEAR FLOW METER*. <https://s3-us-west-2.amazonaws.com/catsy.467/egm-data-sheet.pdf>
- Hernández, M. (2023). *Evaluación de mezclas diésel-biodiésel a partir de la caracterización de los parámetros macroscópicos del chorro de combustible empleando elevados niveles de presión de inyección*. Tesis de Maestría, [Universidad Autónoma de Nuevo León]. <http://eprints.uanl.mx/id/eprint/26839>

- INEN. (2002). *NTE INEN 2 207:2002. Gestión ambiental. Aire. Vehículos automotores. Límites permitidos de emisiones producidas por fuentes móviles terrestres de Diesel.*
- Inlago, F., & Vinueza, E. (2023). *Interpretación de los niveles de opacidad generados por fallas en la válvula dosificadora e inyectores en motores diésel electrónicos.* Ibarra, Ecuador: [Tesis de grado, Universidad técnica del norte].
<https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/13434>
- ISO. (2022). ISO 362-1:2022. Acústica: método de ingeniería para la medición del ruido emitido por vehículos de carretera en aceleración. Parte 1: Categorías M y N. <https://www.iso.org/standard/80872.html>
- Marnissi, Y., & Hwang, J. (2024). Microscopic Imaging on Diesel Spray and Atomization Process. *Processes*, 12(2), 359. <https://doi.org/10.3390/pr12020359>
- Ramirez, A. (2016). *Análisis del comportamiento del flujo transitorio en un sistema de inyección de un Motor Diésel.* Arequipa, Perú: [Tesis de grado, Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa].
<http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/2404>
- Tolmac, J., Prvulovic, S., Jovanovic, S., Markovic, M., Radisic, B., & Tolmac, D. (2024). Parameters Analysis of Crude Oil Transport with Pipes. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 17(10), 2092-2099.
<https://doi.org/10.47176/jafm.17.10.2593>
- Xu, R., Ma, F., Li, L., Yang, W., & Zhang, Y. (2024). Research on fuel injection characteristics of common rail system based on high pressure pipeline integration and matching. *Energy Science & Engineering*, 12(4), 1446-1461.
<https://doi.org/10.1002/ese3.1672>

ANEXOS

Anexo 1. Fuel injection pump model VP44 service manual construction and operation.



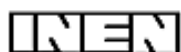
Pub. No. EE14E-11130

SERVICE MANUAL CONSTRUCTION
& OPERATION

VP44



Anexo 2. Norma técnica Ecuatoriana NTE INEN 2 207:2002



INSTITUTO ECUATORIANO DE NORMALIZACIÓN

Quito - Ecuador

NORMA TÉCNICA ECUATORIANA NTE INEN 2 207:2002
(Primera Revisión)

GESTIÓN AMBIENTAL. AIRE. VEHÍCULOS
AUTOMOTORES. LÍMITES PERMITIDOS DE EMISIONES
PRODUCIDAS POR FUENTES MÓVILES TERRESTRES DE
DIESEL.

Primera Edición

ENVIRONMENTAL MANAGEMENT. AIR. MOTOR VEHICLES. EMISSIONS PERMITTED LEVELS PRODUCED BY DIESEL
ROAD MOVABLE SOURCES.

First Edition

DESCRIPTORES: Emisión de gases, límites, contaminación atmosférica, protección del medio ambiente, calidad del aire,
requisitos.

MC 08.06-402
CDU: 75-862.94
CIIU: 3530
ICS: 13.040.50