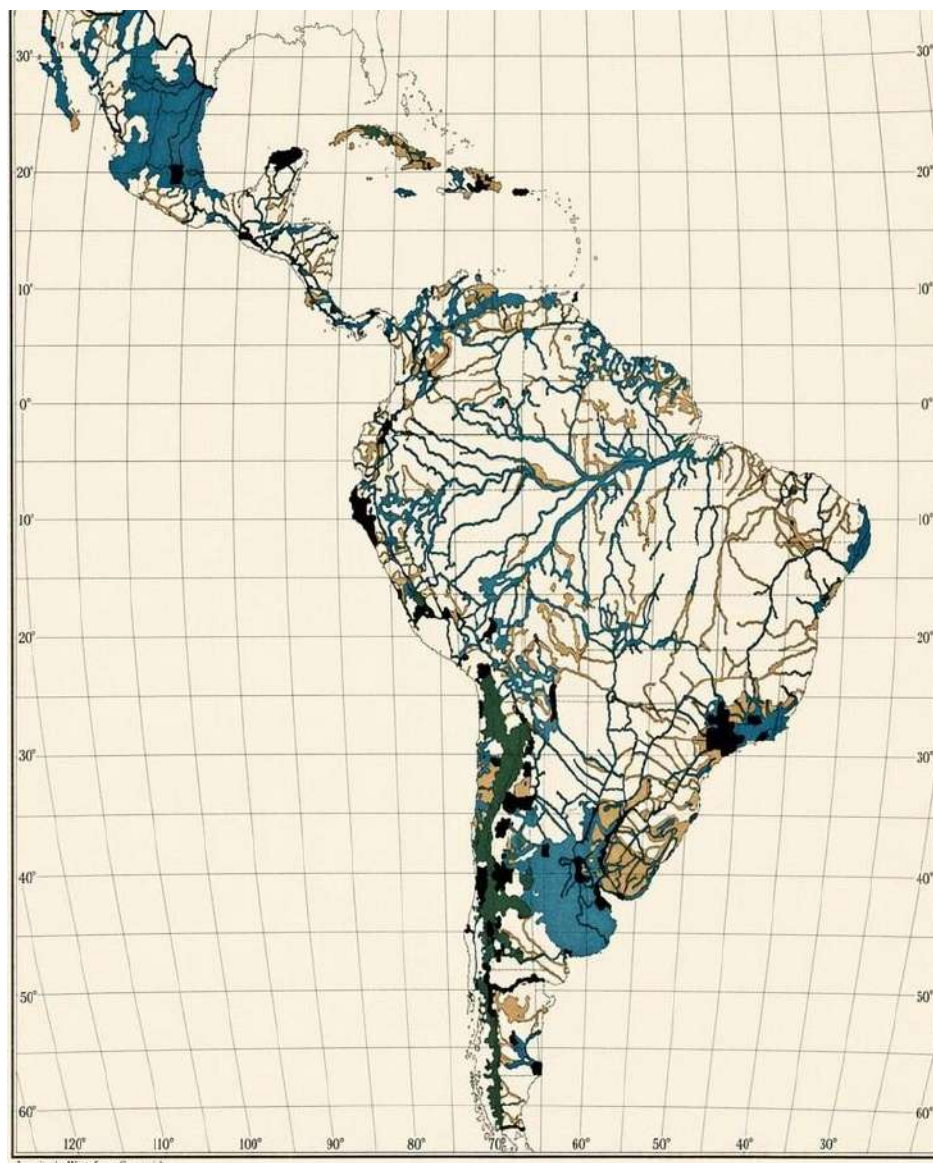


Revista Latinoamericana de Difusión Científica



Volumen 8 - Número 15
Julio – Diciembre 2026
Maracaibo – Venezuela

Relación entre la anulación de Sistemas SCR, DPF y EGR y la vida útil de motores diésel de transporte pesado en condiciones de gran altitud: Una revisión documental

DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.21497558>

Néstor César Sumi Chuquimia*

RESUMEN

El presente artículo tiene como objetivo analizar la relación existente entre la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR y la vida útil de motores diésel utilizados en el transporte pesado. Se desarrolló una investigación teórica de revisión documental basada en literatura científica especializada, libros técnicos, documentos de organismos internacionales y artículos científicos publicados entre 1999 y 2024. La información recopilada fue analizada mediante un proceso de análisis temático y síntesis comparativa de la evidencia científica disponible. Los resultados indican que la eliminación de los sistemas de postratamiento modifica las condiciones de combustión, altera parámetros térmicos del motor y puede generar efectos tanto favorables como desfavorables sobre determinados componentes mecánicos. Asimismo, se identifica una limitada cantidad de investigaciones que evalúen directamente el impacto de la anulación de estos sistemas sobre la durabilidad del motor en condiciones reales de operación, especialmente en contextos de gran altitud. Se concluye que la relación entre los sistemas de postratamiento y la vida útil del motor es compleja y depende de factores técnicos, operativos y ambientales específicos, por lo que continúa constituyendo un campo de investigación abierto para futuras investigaciones.

PALABRAS CLAVE: Motores diésel, Sistemas EGR-DPF-SCR, Vida útil del motor, Transporte pesado.

*Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería, con especialización en Gestión de la Innovación y Prospectiva Empresarial (Unidad Posgrado Ingeniería Industrial), Universidad Mayor de San Andrés, Bolivia. ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-1330-2599>. E-mail: alvaroives@outlook.com

Relationship between the Deactivation of SCR, DPF and EGR Systems and the Service Life of Heavy Transport Diesel Engines at High Altitude Conditions: A Documentary Review

ABSTRACT

This article aims to analyze the relationship between the deactivation of SCR, DPF, and EGR systems and the service life of diesel engines used in heavy-duty transportation. A theoretical documentary review study was conducted based on specialized scientific literature, technical books, international technical documents, and peer-reviewed scientific articles published between 1999 and 2024. The collected information was examined through thematic analysis and comparative synthesis of the available scientific evidence. The reviewed literature indicates that removing aftertreatment systems modifies combustion conditions, alters engine thermal parameters, and may generate both favorable and unfavorable effects on specific mechanical components. Furthermore, a limited number of studies directly evaluate the impact of these modifications on engine service life under real operating conditions, particularly in high-altitude environments. The study concludes that the relationship between emission aftertreatment systems and engine service life is complex and depends on specific technical, operational, and environmental factors. Therefore, this topic remains an open field for future research, especially in regions where heavy-duty vehicles operate under high-altitude conditions.

KEYWORDS: Diesel engines, EGR-DPF-SCR systems, Engine service life, Heavy-duty transportation.

Introducción

El transporte pesado constituye una de las principales fuentes de emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y material particulado (PM), contaminantes asociados a efectos adversos sobre la calidad del aire y la salud humana (Johnson, 2009; Heywood, 2018). En respuesta a esta problemática, las normativas EURO y EPA impulsaron el desarrollo de tecnologías orientadas al control de emisiones mediante estrategias aplicadas tanto al proceso de combustión como al tratamiento posterior de los gases de escape (Merkisz y Pielecha, 2015).

Entre las principales tecnologías incorporadas en los motores diésel modernos para el control de emisiones se encuentran la recirculación de gases de escape (EGR), los filtros de partículas diésel (DPF) y la reducción catalítica selectiva (SCR). Estas tecnologías actúan sobre diferentes etapas del proceso de formación y tratamiento de contaminantes,

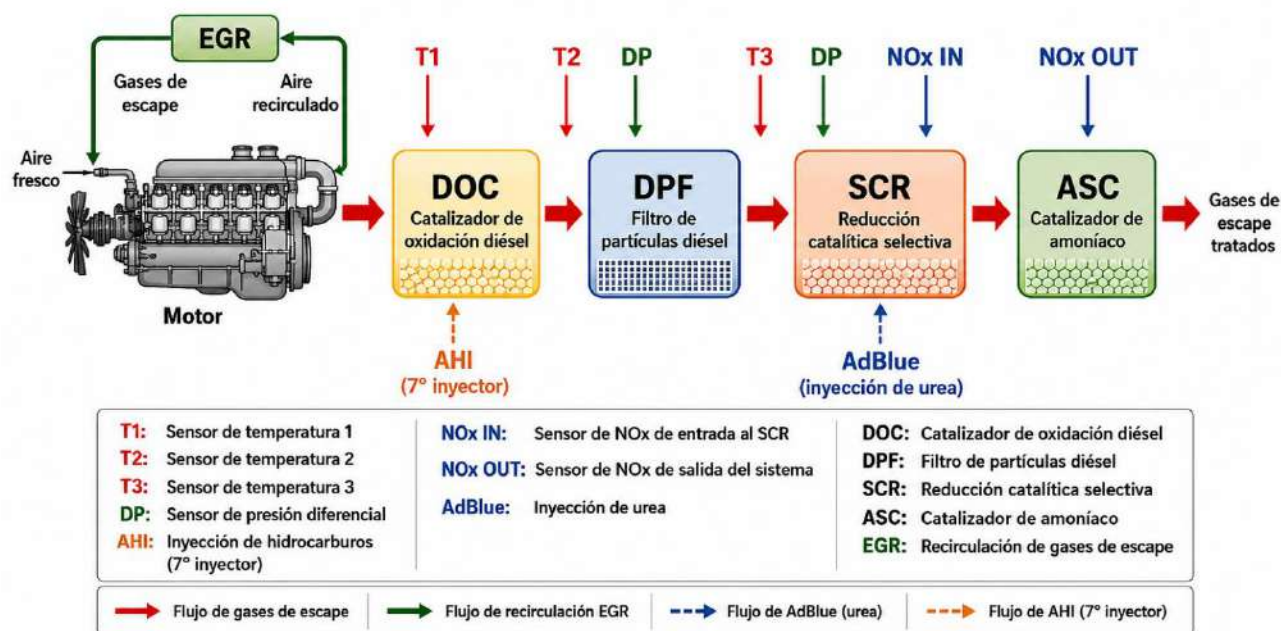
permitiendo reducir significativamente las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado, en concordancia con los requisitos establecidos por normativas ambientales cada vez más exigentes (Johnson, 2011; Bosch, 2014). No obstante, la eficacia de estos sistemas depende de condiciones adecuadas de operación y mantenimiento, ya que el envejecimiento de los componentes, la acumulación de depósitos y los procesos de degradación físico-química asociados al uso prolongado pueden disminuir su eficiencia funcional, incrementar las necesidades de mantenimiento y generar desafíos adicionales para la operación de los vehículos (Yu et al., 2023).

La vida útil de un motor diésel se define como el período durante el cual mantiene niveles aceptables de desempeño, confiabilidad y eficiencia operativa antes de requerir una reparación mayor o una reconstrucción completa (Heywood, 2018). Su duración depende de múltiples factores, entre ellos las condiciones de combustión, la calidad de la lubricación, las cargas térmicas y mecánicas, las prácticas de mantenimiento y el estado de componentes críticos como pistones, anillos, válvulas, inyectores y turbocompresores (Bosch, 2014; Pulkrabek, 2004).

Diversos estudios han señalado que la utilización intensiva de sistemas EGR puede incrementar la concentración de hollín en el lubricante y favorecer mecanismos de desgaste abrasivo, mientras que problemas asociados a la regeneración de filtros DPF o al suministro de AdBlue en sistemas SCR pueden afectar la disponibilidad operativa e incrementar los costos de mantenimiento (Dennis et al., 1999; Majewski y Khair, 2006). Estas condiciones han propiciado la manipulación o anulación de sistemas de postratamiento en determinados contextos del transporte pesado, especialmente en entornos donde existen limitaciones operativas o económicas (Bosch, 2014; Heywood, 2018).

Como se observa en la Figura 1, los gases de escape atraviesan secuencialmente los sistemas DOC, DPF, SCR y ASC, integrando sensores de temperatura, presión diferencial y NOx que permiten supervisar el funcionamiento del sistema y optimizar la reducción de emisiones mediante la dosificación controlada de AdBlue, en cumplimiento de los estándares Euro VI (Bosch, 2014; Johnson, 2009; Johnson, 2011).

Figura 1. Arquitectura general del sistema de postratamiento de emisiones en motores diésel Euro VI.



Fuente: Elaboración propia basada en Bosch (2014) y Johnson (2011).

En diversos contextos operativos del transporte pesado, la limitada disponibilidad de insumos para sistemas SCR, la calidad variable del combustible diésel y las condiciones de operación a gran altitud han sido señaladas como factores que pueden favorecer la manipulación o anulación de sistemas de control de emisiones (Yu et al., 2023; Zheng et al., 2023). En Bolivia, estas condiciones podrían representar desafíos adicionales para la operación de vehículos equipados con tecnologías Euro V y Euro VI. No obstante, aún es limitada la evidencia científica que permita establecer con claridad la relación entre estas modificaciones y los factores asociados a la vida útil de motores diésel modernos, especialmente bajo condiciones de operación superiores a los 3.000 m s.n.m.

En este contexto, el propósito del presente artículo es analizar críticamente la evidencia científica disponible sobre la relación entre la anulación de los sistemas EGR, DPF y SCR y los factores asociados a la vida útil de motores diésel utilizados en el transporte pesado, identificando los principales hallazgos, vacíos de conocimiento y oportunidades para futuras investigaciones en el contexto latinoamericano.

1. Metodología

La presente investigación corresponde a un estudio teórico de revisión documental con enfoque cualitativo, orientado al análisis de la evidencia científica sobre la influencia de la anulación de los sistemas EGR, DPF y SCR en los factores asociados a la vida útil de motores diésel utilizados en el transporte pesado.

La revisión se sustentó en literatura científica especializada publicada entre 1999 y 2024, obtenida de bases de datos académicas y repositorios especializados, entre ellos Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink, SAE International, IEEE Xplore y Google Scholar, complementada con libros técnicos y documentos especializados.

La selección de fuentes se realizó mediante palabras clave en español e inglés relacionadas con motores diésel, sistemas EGR, DPF y SCR, control de emisiones, desgaste mecánico, durabilidad del motor y operación en altitud. Se incluyeron artículos científicos, revisiones, libros especializados y documentos técnicos vinculados con los objetivos del estudio, excluyéndose publicaciones sin respaldo técnico-científico o sin relación directa con la temática analizada.

La información recopilada fue analizada mediante síntesis comparativa y análisis temático, organizando los hallazgos en categorías relacionadas con los sistemas de postratamiento, los mecanismos de desgaste, la combustión, la lubricación, la influencia de la altitud y los factores asociados a la vida útil del motor. Finalmente, los resultados fueron integrados de manera crítica para identificar tendencias, coincidencias y vacíos de conocimiento presentes en la literatura revisada.

2. Resultados

2.1 Influencia del Sistema EGR sobre el Desgaste de Componentes Internos del Motor Diésel

La recirculación de gases de escape (EGR) constituye una de las principales estrategias empleadas para reducir las emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en motores diésel mediante la disminución de la temperatura máxima de combustión. Sin embargo, la implementación de esta tecnología genera efectos secundarios que han sido ampliamente documentados en la literatura científica, particularmente en relación con la contaminación del lubricante y los mecanismos de desgaste interno del motor (Dennis et al., 1999; Majewski y Khair, 2006).

Diversas investigaciones han señalado que el incremento de la tasa de recirculación favorece la incorporación de partículas de hollín al sistema de admisión, aumentando la concentración de contaminantes sólidos en el aceite lubricante. Desde una perspectiva tribológica, estas partículas pueden actuar como agentes abrasivos capaces de acelerar el desgaste de componentes sometidos a contacto mecánico continuo, tales como anillos de pistón, camisas de cilindro y cojinetes (Pulkrabek, 2004). En este sentido, Dennis et al. (1999) identificaron que una parte importante del desgaste observado en motores equipados con EGR se encuentra asociada a la contaminación del lubricante por partículas carbonosas derivadas del proceso de combustión.

Asimismo, la formación de depósitos carbonosos en el sistema de admisión puede afectar la eficiencia volumétrica y modificar las condiciones de funcionamiento del motor, aunque la magnitud de estos efectos depende de variables operativas y de mantenimiento (Heywood, 2018).

En conjunto, la evidencia científica revisada sugiere que la influencia del sistema EGR sobre la durabilidad del motor se encuentra principalmente asociada a mecanismos de contaminación del lubricante, formación de depósitos carbonosos y desgaste abrasivo de componentes internos. Sin embargo, la intensidad de estos procesos depende de variables operativas y de mantenimiento que pueden modificar significativamente el comportamiento del sistema y su impacto sobre la vida útil del motor. Los principales mecanismos identificados en la literatura se sintetizan en la Tabla 1.

Además de sus implicaciones tribológicas, la literatura especializada señala que el sistema EGR influye directamente en el comportamiento térmico del motor. La reducción o anulación de la recirculación incrementa la disponibilidad de oxígeno durante la combustión, elevando la temperatura máxima alcanzada en la cámara y aumentando la temperatura de los gases de escape. Como consecuencia, se incrementan las cargas termo-mecánicas que actúan sobre componentes críticos como pistones, válvulas de escape y turbocompresores, favoreciendo fenómenos de fatiga térmica y degradación progresiva de materiales (Heywood, 2018; Bosch, 2014).

Tabla 1. Principales mecanismos reportados en la literatura mediante los cuales el sistema EGR puede influir en la vida útil de motores diésel.

Aspecto analizado	Evidencia reportada en la literatura	Posible implicación sobre la vida útil	Referencia
Recirculación de gases de escape	Incrementa la presencia de partículas de hollín en los gases recirculados.	Mayor contaminación del lubricante.	Dennis et al. (1999)
Contaminación del aceite lubricante	El hollín suspendido en el lubricante actúa como contaminante sólido.	Incremento del desgaste abrasivo.	Dennis et al. (1999)
Desgaste de anillos y camisas	Las partículas carbonosas favorecen procesos de abrasión superficial.	Reducción progresiva de la eficiencia mecánica.	Pulkrabek (2004)
Formación de depósitos carbonosos	Acumulación en conductos de admisión y válvulas.	Disminución de la eficiencia volumétrica.	Heywood (2018)
Condiciones de mantenimiento	La calidad del lubricante y los intervalos de cambio modifican el impacto del hollín.	Variación en la durabilidad del motor.	Heywood (2018)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

Sin embargo, la literatura también indica que una menor tasa de EGR puede disminuir la formación de hollín y reducir la contaminación del lubricante, lo que podría atenuar determinados mecanismos de desgaste abrasivo. Esta situación evidencia que la influencia del sistema EGR sobre la vida útil del motor no responde a una relación lineal, sino a la interacción simultánea de efectos potencialmente favorables y desfavorables que afectan distintos subsistemas del motor (Johnson, 2011; Majewski y Khair, 2006).

La evidencia científica disponible muestra que la reducción o anulación del sistema EGR genera un escenario de compromiso técnico entre el control de emisiones y la durabilidad mecánica. Mientras la disminución de partículas carbonosas puede contribuir a reducir ciertos mecanismos de desgaste asociados a la contaminación del lubricante, el incremento de las temperaturas de combustión y escape puede aumentar las exigencias térmicas sobre componentes críticos. Por ello, los efectos de la modificación del sistema EGR deben analizarse de manera integral, considerando simultáneamente variables ambientales, mecánicas y operativas. La Tabla 2 resume los principales efectos identificados en la literatura científica.

Tabla 2. Efectos reportados en la literatura de la reducción o anulación del sistema EGR sobre variables asociadas a la vida útil del motor diésel.

Variable analizada	Efecto asociado a la reducción o anulación del EGR	Implicación potencial sobre la durabilidad del motor (vida útil)	Referencias
Temperatura de combustión	Incremento de la disponibilidad de oxígeno y aumento de la temperatura máxima de combustión.	Mayor carga térmica sobre pistones, válvulas de escape y cámara de combustión.	Heywood (2018); Bosch (2014)
Temperatura de gases de escape	Incremento de la temperatura de los gases evacuados hacia el turbocompresor.	Mayor exigencia térmica y riesgo de fatiga en componentes del sistema de sobrealimentación.	Bosch (2014); Heywood (2018)
Emisiones de NOx	Incremento de la formación de NOx debido a temperaturas de combustión más elevadas.	Alteración de las condiciones de operación previstas por el fabricante y pérdida de conformidad ambiental.	Johnson (2011); Majewski y Khair (2006)
Formación de hollín	Disminución de partículas carbonosas generadas por la recirculación de gases.	Menor contaminación del lubricante y reducción del desgaste abrasivo asociado al hollín.	Dennis et al. (1999); Majewski y Khair (2006)
Calidad del lubricante	Menor acumulación de partículas sólidas suspendidas en el aceite.	Posible reducción de desgaste en anillos, camisas y cojinetes.	Dennis et al. (1999); Pulkrabek (2004)
Condiciones de combustión	Combustión más eficiente debido al aumento del contenido de oxígeno.	Mejora potencial de determinados parámetros de rendimiento, aunque con mayores cargas térmicas.	Heywood (2018); Bosch (2014)
Balance global de durabilidad	Coexisten efectos potencialmente favorables y desfavorables sobre diferentes componentes.	La influencia final depende de la calibración del motor, mantenimiento, combustible y condiciones de operación.	Heywood (2018); Johnson (2011); Bosch (2014)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

La evidencia científica revisada también indica que los diferentes componentes del motor presentan niveles de vulnerabilidad distintos frente a modificaciones en las condiciones de combustión, lubricación y control de emisiones. Los sistemas de inyección y sobrealimentación operan bajo elevadas exigencias térmicas y mecánicas, por lo que pueden resultar particularmente sensibles a variaciones en la calidad del combustible, la gestión electrónica y las estrategias de combustión (Bosch, 2014; Heywood, 2018). Por otra parte, componentes como anillos de pistón y camisas de cilindro muestran una relación más

estrecha con procesos de desgaste asociados a la contaminación del lubricante por partículas de hollín (Pulkrabek, 2004; Dennis et al., 1999).

Desde una perspectiva de confiabilidad mecánica, estos hallazgos sugieren que las modificaciones introducidas en los sistemas de control de emisiones no afectan de manera uniforme a todos los componentes del motor. Mientras determinados elementos presentan una mayor susceptibilidad frente a cargas térmicas elevadas, otros se encuentran más condicionados por fenómenos tribológicos y por la calidad de la lubricación. Esta diferenciación resulta relevante para comprender la complejidad de la relación entre los sistemas EGR, DPF y SCR y la durabilidad global del conjunto motriz. Los principales mecanismos de degradación identificados en la literatura se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Componentes del motor potencialmente afectados por modificaciones en las condiciones de combustión y control de emisiones.

Componente	Mecanismos de degradación reportados en la literatura	Posible relación con sistemas EGR, DPF y SCR	Referencias
Inyectores	Formación de depósitos, alteraciones en la inyección y calidad del combustible	Cambios en estrategias de combustión y gestión electrónica	Bosch (2014); Heywood (2018)
Turbocompresor	Elevadas temperaturas de escape y altas velocidades de rotación	Variaciones en la temperatura y contrapresión del sistema de escape	Bosch (2014); Heywood (2018)
Válvulas de escape	Fatiga térmica y exposición prolongada a altas temperaturas	Incremento de cargas térmicas asociadas a cambios en la combustión	Heywood (2018)
Pistones	Elevadas presiones y temperaturas de combustión	Modificaciones de las condiciones térmicas del cilindro	Pulkrabek (2004); Heywood (2018)
Camisas de cilindro	Desgaste abrasivo asociado a partículas de hollín	Contaminación del lubricante y desgaste tribológico	Dennis et al. (1999); Pulkrabek (2004)
Anillos de pistón	Abrasión y degradación del lubricante	Incremento de partículas carbonosas en el aceite	Dennis et al. (1999); Pulkrabek (2004)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

En conjunto, la evidencia analizada indica que la influencia del sistema EGR sobre los factores asociados a la vida útil del motor responde a un fenómeno multifactorial en el que interactúan procesos tribológicos, térmicos y operativos. Por ello, la evaluación de su

impacto debe considerar de manera integrada la contaminación del lubricante, las condiciones de combustión, las cargas térmicas y las estrategias de mantenimiento, especialmente en aplicaciones de transporte pesado sometidas a condiciones exigentes (Dennis et al., 1999; Majewski y Khair, 2006; Heywood, 2018; Bosch, 2014).

2.2 Influencia del Sistema DPF sobre el Funcionamiento y la Vida Útil del Motor Diésel

Los filtros de partículas diésel (DPF) fueron desarrollados para capturar y retener el material particulado generado durante la combustión, contribuyendo al cumplimiento de normativas ambientales cada vez más exigentes en materia de emisiones (Bosch, 2014). El funcionamiento eficiente de estos sistemas depende de procesos periódicos de regeneración destinados a oxidar y eliminar las partículas acumuladas en el filtro. Cuando dichos procesos son insuficientes o incompletos, puede producirse una acumulación progresiva de material particulado que incrementa la contrapresión en el sistema de escape (Majewski y Khair, 2006).

Desde una perspectiva termodinámica, el aumento de la contrapresión obliga al motor a realizar un mayor trabajo para evacuar los gases de combustión, lo que puede afectar la eficiencia global del ciclo y favorecer incrementos en el consumo específico de combustible. En consecuencia, la saturación excesiva del DPF puede generar efectos operativos que trascienden el propio sistema de postratamiento y repercuten sobre el desempeño general del motor (Majewski y Khair, 2006; Bosch, 2014).

La literatura científica coincide en que la relación entre el grado de saturación del filtro y el comportamiento operativo del motor se encuentra mediada principalmente por variaciones en la contrapresión del escape, la eficiencia de combustión y el consumo de combustible. Estos efectos se sintetizan en la Tabla 4.

Adicionalmente, diversos autores señalan que el incremento de la contrapresión en el sistema de escape puede modificar las condiciones térmicas de operación de componentes localizados aguas arriba del filtro. Entre ellos destacan el colector de escape y el turbocompresor, cuyos elementos internos se encuentran sometidos a elevadas temperaturas y velocidades de rotación durante el funcionamiento normal del motor (Bosch, 2014; Heywood, 2018).

Tabla 4. Principales efectos reportados en la literatura asociados al incremento de la saturación del filtro de partículas diésel (DPF).

Variable analizada	Efecto asociado al incremento de la saturación del DPF	Implicación potencial sobre el funcionamiento del motor	Referencias
Contrapresión del escape	Incremento progresivo de la resistencia al flujo de gases.	Mayor trabajo de bombeo y reducción de la eficiencia global del motor.	Majewski y Khair (2006); Bosch (2014)
Consumo específico de combustible	Incremento asociado a mayores pérdidas energéticas durante la evacuación de gases.	Aumento de costos operativos y disminución de eficiencia energética.	Majewski y Khair (2006)
Eficiencia de combustión	Alteración indirecta de las condiciones de operación del motor.	Posible reducción del rendimiento global bajo condiciones severas de saturación.	Bosch (2014)
Procesos de regeneración	Necesidad de regeneraciones más frecuentes conforme aumenta la acumulación de partículas.	Incremento de las exigencias térmicas del sistema de postratamiento.	Bosch (2014)
Desempeño operativo general	Mayor sensibilidad a condiciones de carga y mantenimiento.	Posible afectación del comportamiento operativo del vehículo.	Bosch (2014); Majewski y Khair (2006)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

La evidencia disponible indica que niveles elevados de saturación del DPF pueden favorecer incrementos de temperatura en los gases de escape y aumentar la exigencia operativa del sistema de sobrealimentación. Esta situación resulta particularmente relevante debido a que la confiabilidad del turbocompresor depende de la estabilidad térmica de sus componentes rotativos, de la calidad de la lubricación y del adecuado control de las condiciones de operación (Heywood, 2018).

Sin embargo, aunque la literatura reconoce la existencia de estos efectos operativos, los estudios revisados no permiten establecer una relación causal directa entre la presencia del DPF y una reducción de la vida útil del motor cuando los procedimientos de mantenimiento preventivo y los ciclos de regeneración son ejecutados de acuerdo con las especificaciones del fabricante (Bosch, 2014; Majewski y Khair, 2006). Por el contrario, la evidencia sugiere que los efectos potencialmente adversos sobre el desempeño y la confiabilidad del sistema suelen estar asociados a fallas en los procesos de regeneración,

niveles excesivos de saturación del filtro o condiciones inadecuadas de operación y mantenimiento.

Esta interpretación resulta consistente con la evidencia disponible, la cual indica que la influencia del DPF sobre la vida útil del motor depende principalmente de la interacción entre la gestión del sistema de postratamiento, el estado de mantenimiento del vehículo y las condiciones reales de operación. Los principales mecanismos identificados en la literatura se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Principales mecanismos mediante los cuales la saturación del DPF puede influir sobre componentes asociados a la vida útil del motor.

Componente o sistema	Mecanismo reportado en la literatura	Posible consecuencia operativa	Referencias
Sistema de escape	Incremento de contrapresión debido a acumulación de partículas.	Mayor esfuerzo para evacuar gases de combustión.	Majewski y Khair (2006)
Turbocompresor	Incremento de temperatura y exigencia operativa.	Mayor carga térmica sobre cojinetes, sellos y componentes rotativos.	Bosch (2014); Heywood (2018)
Sistema de postratamiento	Regeneraciones más frecuentes o incompletas.	Disminución de eficiencia operativa del DPF.	Bosch (2014)
Consumo de combustible	Incremento asociado a pérdidas energéticas del sistema de escape.	Mayor costo operativo y menor eficiencia energética.	Majewski y Khair (2006)
Vida útil del motor	Influencia indirecta condicionada por mantenimiento y operación.	No existe evidencia concluyente de reducción directa cuando el sistema funciona adecuadamente.	Bosch (2014); Majewski y Khair (2006)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

En síntesis, la evidencia científica analizada indica que la influencia del sistema DPF sobre la vida útil del motor no depende exclusivamente de la presencia del filtro, sino del estado de saturación, la eficacia de los procesos de regeneración y las condiciones de operación y mantenimiento. Por tanto, los posibles efectos sobre la confiabilidad y el desempeño del motor deben interpretarse como el resultado de la interacción entre variables térmicas, energéticas y operativas, más que como una consecuencia directa del sistema DPF en sí mismo (Bosch, 2014; Majewski y Khair, 2006).

2.3 Influencia del Sistema SCR sobre la Vida Útil del Motor Diésel

La reducción catalítica selectiva (SCR) constituye una de las tecnologías más eficientes para la reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno (NOx) en motores diésel de última generación. A diferencia del sistema de recirculación de gases de escape (EGR), el SCR actúa después del proceso de combustión mediante la inyección de una solución acuosa de urea comercialmente conocida como AdBlue, la cual permite transformar los NOx en nitrógeno y vapor de agua dentro de un catalizador especializado (Johnson, 2009). Debido a que el tratamiento de los gases se realiza aguas abajo del proceso de combustión, la influencia directa del sistema SCR sobre los mecanismos de desgaste interno del motor es considerablemente menor que la observada en tecnologías que modifican directamente las condiciones de combustión, como la recirculación de gases de escape (EGR).

Esta característica permite a los fabricantes optimizar parámetros de combustión orientados a mejorar la eficiencia térmica y el rendimiento energético del motor sin comprometer el cumplimiento de las normativas ambientales. Diversos estudios señalan que la incorporación del sistema SCR posibilita reducir la dependencia de elevadas tasas de recirculación de gases de escape para el control de NOx, favoreciendo condiciones de combustión más eficientes y reduciendo indirectamente la formación de partículas de hollín (Johnson, 2011; Bosch, 2014).

Desde una perspectiva de durabilidad, este aspecto resulta particularmente relevante debido a que una menor producción de hollín puede disminuir la contaminación del lubricante y reducir algunos mecanismos de desgaste abrasivo asociados a la operación de motores diésel. En consecuencia, la literatura especializada sugiere que la combinación de sistemas SCR y EGR permite alcanzar un equilibrio más favorable entre el control de emisiones, la eficiencia energética y la preservación de los componentes internos del motor, al distribuir las funciones de reducción de NOx entre estrategias aplicadas antes y después de la combustión (Miller y Tilch, 2016; Bosch, 2014).

La literatura especializada evidencia que los beneficios potenciales del sistema SCR sobre la vida útil del motor no se originan en una reducción directa del desgaste mecánico, sino en su capacidad para modificar favorablemente las estrategias de control de emisiones y las condiciones globales de combustión. Los principales efectos reportados en la literatura se sintetizan en la Tabla 6.

Tabla 6. Principales efectos asociados al sistema SCR reportados en la literatura y su posible relación con la vida útil del motor diésel.

Aspecto analizado	Evidencia reportada en la literatura	Posible implicación sobre la vida útil del motor	Referencias
Reducción de emisiones NOx	Conversión de NOx en nitrógeno y vapor de agua mediante reacción catalítica.	Cumplimiento de normativas ambientales sin modificar significativamente los mecanismos internos de desgaste.	Johnson (2011)
Menor dependencia del EGR	Permite reducir las tasas de recirculación requeridas para controlar NOx.	Disminución potencial de la contaminación del lubricante por hollín.	Bosch (2014); Miller y Tilch (2016)
Formación de partículas de hollín	Menor necesidad de estrategias intensivas de recirculación.	Reducción potencial del desgaste abrasivo asociado a partículas carbonosas.	Bosch (2014); Miller y Tilch (2016)
Eficiencia de combustión	Posibilita calibraciones orientadas a mejorar el rendimiento térmico.	Mejor aprovechamiento energético y condiciones operativas más estables.	Johnson (2011); Bosch (2014)
Influencia sobre componentes internos	Actuación posterior al proceso de combustión.	Influencia indirecta y generalmente limitada sobre los mecanismos de desgaste interno.	Johnson (2011)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

Por otra parte, los avances recientes en estrategias de control de emisiones han incorporado modelos predictivos, algoritmos de optimización y sistemas de control inteligente capaces de gestionar de manera integrada la operación del sistema SCR, la recirculación EGR y los parámetros de combustión. Estas herramientas permiten anticipar cambios en las condiciones operativas y ajustar dinámicamente variables de control orientadas a reducir las emisiones contaminantes y mejorar la eficiencia global del sistema, favoreciendo condiciones de operación más estables para el motor y los sistemas de postratamiento (Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2024).

La tendencia actual de desarrollo tecnológico se orienta hacia sistemas de gestión integrados capaces de optimizar simultáneamente objetivos ambientales y mecánicos. En este contexto, la interacción coordinada entre los sistemas SCR, EGR y los controles electrónicos del motor constituye un elemento determinante para minimizar los compromisos tradicionalmente existentes entre emisiones, rendimiento y durabilidad. Los principales aportes reportados por la literatura reciente se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7. Contribuciones de los sistemas de gestión inteligente al desempeño ambiental y a la vida útil del motor.

Desarrollo tecnológico	Función principal	Beneficio reportado	Referencias
Modelos predictivos de emisiones	Anticipación de condiciones operativas y ajuste de parámetros de control.	Optimización simultánea de emisiones y eficiencia energética.	Zhang et al. (2022); Zhang et al. (2024)
Control integrado SCR–EGR	Coordinación de sistemas de postratamiento y combustión.	Reducción de compromisos entre emisiones y desempeño mecánico.	Zhang et al. (2022); Zhang et al. (2024)
Algoritmos inteligentes de gestión	Ajuste dinámico de variables de operación.	Mayor estabilidad operativa, confiabilidad del sistema y adaptación a condiciones variables de funcionamiento.	Zhang et al. (2024)
Estrategias avanzadas de combustión	Optimización de temperatura, inyección y postratamiento.	Preservación de la eficiencia energética y reducción de esfuerzos térmicos y mecánicos sobre componentes críticos.	Zhang et al. (2022); Zhang et al. (2024)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

En síntesis, la evidencia científica disponible indica que el sistema SCR constituye una de las tecnologías de control de emisiones con menor impacto potencial sobre los mecanismos de desgaste interno del motor, debido a que su actuación se desarrolla principalmente en la etapa de postratamiento de los gases de escape y no modifica directamente los procesos de combustión dentro del cilindro (Johnson, 2011; Bosch, 2014). Su principal contribución a la preservación de la vida útil no radica en una acción directa sobre los componentes mecánicos, sino en la posibilidad de reducir la dependencia de estrategias de control que incrementan la formación de hollín o modifican significativamente las condiciones de combustión (Bosch, 2014; Miller y Tilch, 2016). Asimismo, la integración del SCR con sistemas avanzados de control electrónico representa una tendencia tecnológica orientada a compatibilizar el cumplimiento de las normativas ambientales con la eficiencia energética, la confiabilidad operativa y la preservación de la vida útil de los motores diésel modernos (Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2024).

2.4 Influencia de la Altitud sobre el Desempeño y la Vida Útil del Motor con Sistemas SCR, DPF y EGR Anulados

La altitud constituye uno de los factores operativos más relevantes para el desempeño y los factores asociados a la vida útil de los motores diésel utilizados en el transporte pesado, especialmente cuando los sistemas SCR, DPF y EGR han sido modificados o anulados. La disminución de la presión atmosférica y de la disponibilidad de oxígeno altera las condiciones de combustión originalmente consideradas durante el diseño y calibración del motor, modificando variables como la relación aire-combustible, la eficiencia volumétrica, la temperatura de combustión y la formación de emisiones contaminantes (Pulkrabek, 2004; Heywood, 2018).

Diversos estudios han demostrado que la reducción de la densidad del aire asociada a la altitud puede afectar la eficiencia de combustión, incrementar la formación de material particulado y modificar el consumo de combustible y las emisiones generadas por el motor (Ghazikhani et al., 2013; Ceballos et al., 2021; Zheng et al., 2023). Asimismo, la menor disponibilidad de oxígeno obliga al turbocompresor a operar a mayores velocidades para compensar la reducción de masa de aire, incrementando las exigencias térmicas y mecánicas sobre sus componentes y afectando potencialmente su confiabilidad y durabilidad (Bosch, 2014; Ceballos et al., 2021).

De igual manera, componentes como pistones, válvulas de escape, colectores de escape e inyectores pueden estar sometidos a mayores cargas térmicas debido a modificaciones en la combustión y en la gestión térmica del motor. Estas condiciones podrían verse acentuadas cuando los sistemas SCR, DPF y EGR han sido modificados o anulados, debido a alteraciones en las estrategias de control de emisiones originalmente previstas por el fabricante (Johnson, 2011; Bosch, 2014).

Los estudios analizados muestran que la altitud influye simultáneamente sobre los procesos de combustión, lubricación, sobrealimentación y control de emisiones, generando modificaciones operativas que pueden afectar el comportamiento de motores diésel de transporte pesado cuando los sistemas SCR, DPF y EGR han sido anulados. Estas modificaciones pueden afectar variables relacionadas con la combustión, la gestión térmica, el consumo de combustible y las condiciones de operación de componentes críticos, con posibles implicaciones sobre la confiabilidad y durabilidad del sistema motriz. En este

contexto, la Tabla 8 sintetiza los principales efectos reportados en la literatura y sus posibles implicaciones sobre factores asociados a la vida útil del motor.

Tabla 8. Influencia de la altitud sobre variables operativas y factores asociados a la vida útil de motores diésel de transporte pesado con sistemas SCR, DPF y EGR anulados.

Variable afectada	Efecto asociado a la altitud	Posibles implicaciones sobre el motor	Referencias
Disponibilidad de oxígeno	Disminución de la masa de aire admitida debido a la reducción de la presión atmosférica.	Modificación de la combustión, reducción de la eficiencia volumétrica y alteración de las condiciones de funcionamiento previstas durante el diseño del motor.	Ceballos et al. (2021); Ghazikhani et al. (2013); Heywood (2018)
Temperatura de combustión	Variaciones en las condiciones de combustión y transferencia térmica.	Incremento potencial de las cargas térmicas sobre pistones, válvulas y componentes del sistema de escape.	Bosch (2014); Heywood (2018); Ceballos et al. (2021)
Turbocompresor	Incremento de la velocidad de operación para compensar la menor densidad del aire.	Mayor exigencia mecánica y térmica sobre cojinetes, sellos y componentes rotativos.	Bosch (2014); Ceballos et al. (2021); Zheng et al. (2023)
Sistema EGR anulado	Modificación de las condiciones de combustión y recirculación originalmente previstas.	Posibles cambios en la formación de NOx y partículas de hollín bajo condiciones de baja disponibilidad de oxígeno.	Bosch (2014); Heywood (2018); Zheng et al. (2023)
Sistema DPF anulado	Eliminación de los procesos de filtración y regeneración de partículas.	Alteración de las condiciones de control de emisiones y de la dinámica del sistema de escape.	Bosch (2014); Zheng et al. (2023)
Sistema SCR anulado	Pérdida de la capacidad de reducción catalítica de NOx y alteración de las estrategias de control de emisiones originalmente previstas.	Modificación de las estrategias de control de emisiones diseñadas para diferentes condiciones ambientales.	Bosch (2014); Zheng et al. (2023)
Consumo de combustible	Posibles variaciones en la eficiencia energética del motor debido a cambios en la combustión y la sobrealimentación.	Incremento del consumo específico y modificación de los costos operativos.	Ghazikhani et al. (2013); Ceballos et al. (2021); Zheng et al. (2023)
Lubricación	Alteración indirecta de las condiciones térmicas y de combustión.	Influencia potencial sobre la estabilidad del lubricante y los mecanismos de desgaste de componentes internos.	Bosch (2014); Heywood (2018); Zheng et al. (2023)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

Este aspecto adquiere especial relevancia en regiones situadas a más de 3.000 m s.n.m., donde las condiciones atmosféricas pueden modificar los procesos de combustión, sobrealimentación y control de emisiones respecto de aquellos considerados durante el diseño y la validación de motores Euro V y Euro VI (Heywood, 2018; Bosch, 2014). Aunque la evidencia científica disponible sugiere que estas condiciones pueden influir en los mecanismos de desgaste y degradación de componentes críticos del motor, aún son escasas las investigaciones desarrolladas bajo condiciones reales de operación que evalúen de manera simultánea los efectos de la altitud y la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR. En consecuencia, persisten vacíos de conocimiento respecto a la influencia combinada de ambos factores sobre la vida útil de los motores diésel utilizados en el transporte pesado (Ceballos et al., 2021; Heywood, 2018).

2.5 Relación entre la Anulación de Sistemas SCR, DPF y EGR y la Vida Útil del Motor Diésel

La evidencia científica recopilada permite identificar dos enfoques predominantes respecto a la anulación de los sistemas de postratamiento en motores diésel de transporte pesado. Por una parte, la literatura técnica y los estudios disponibles sobre el sector transporte describen beneficios operativos asociados a la eliminación de regeneraciones forzadas, la reducción de determinadas fallas electrónicas, la disminución de costos de mantenimiento y el incremento de la disponibilidad mecánica de los vehículos. Estas ventajas han contribuido a la expansión de prácticas de anulación en diferentes regiones de América Latina, especialmente en contextos donde existen limitaciones en el suministro de AdBlue, elevados costos de mantenimiento o dificultades para la regeneración adecuada de los sistemas de control de emisiones (Bosch, 2014; Dallmann y Minjares, 2020).

Por otra parte, desde una perspectiva ingenieril, la eliminación de los sistemas SCR, DPF y EGR implica modificaciones sustanciales en las estrategias de control originalmente desarrolladas por los fabricantes. Dichas modificaciones pueden alterar parámetros críticos como la temperatura máxima de combustión, las presiones internas del cilindro, la contrapresión del sistema de escape, las condiciones de lubricación y el régimen térmico de componentes como pistones, válvulas de escape, turbocompresores e inyectores (Heywood, 2018; Bosch, 2014). Estos parámetros constituyen variables fundamentales en los procesos de desgaste mecánico, fatiga térmica y factores asociados a la vida útil de los

motores diésel modernos (Pulkrabek, 2004). La síntesis de los principales beneficios operativos y riesgos potenciales reportados en la literatura se presenta en la Tabla 9, evidenciando que las ventajas observadas por algunos operadores coexisten con posibles modificaciones en variables críticas consideradas durante el diseño original del motor.

Tabla 9. Beneficios operativos y riesgos potenciales asociados a la anulación de sistemas SCR, DPF y EGR reportados en la literatura.

Aspecto analizado	Beneficios potenciales reportados	Riesgos potenciales reportados	Referencias
Sistema DPF	Eliminación de regeneraciones forzadas y reducción de fallas asociadas al filtro.	Incremento de emisiones de material particulado y alteración del sistema de postratamiento.	Bosch (2014); Dallmann y Minjares (2020)
Sistema SCR	Eliminación del consumo de AdBlue y simplificación operativa.	Pérdida de capacidad de reducción de NOx y modificación de estrategias de control de emisiones.	Johnson (2011); Bosch (2014)
Sistema EGR	Disminución de la recirculación de partículas carbonosas.	Incremento de temperaturas de combustión y emisiones de NOx.	Heywood (2018); Majewski y Khair (2006)
Mantenimiento	Reducción de determinadas intervenciones correctivas.	Posible incremento de exigencias sobre componentes mecánicos y electrónicos.	Bosch (2014)
Disponibilidad operativa	Menor probabilidad de inmovilización asociada a fallas de postratamiento.	Alteración de parámetros de funcionamiento originalmente calibrados por el fabricante.	Dallmann y Minjares (2020); Johnson (2011)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

Investigaciones recientes han señalado que el envejecimiento de los sistemas de postratamiento y las modificaciones introducidas en las estrategias electrónicas de control pueden alterar las condiciones originalmente previstas para la gestión térmica, la dosificación de combustible y el control de emisiones (Yu et al., 2023). En este contexto, la interacción entre los sistemas SCR, DPF y EGR constituye un elemento fundamental en la gestión integral de emisiones de motores diésel modernos, ya que las modificaciones introducidas en cualquiera de estos subsistemas pueden afectar indirectamente variables asociadas al desempeño, la combustión y la vida útil de componentes críticos del motor (Bosch, 2014; Pardiñas y Feijoo, 2018; Yu et al., 2023). Asimismo, la reprogramación electrónica utilizada para desactivar estos sistemas puede modificar mapas de inyección,

estrategias de gestión térmica y algoritmos de control originalmente optimizados para garantizar desempeño, eficiencia energética, confiabilidad operativa y cumplimiento ambiental (Johnson, 2011).

Desde esta perspectiva, la literatura especializada identifica diversas variables potencialmente influenciadas por la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR, entre las que destacan la temperatura de combustión, la contaminación del lubricante por partículas de hollín, la contrapresión del escape, las estrategias de inyección y la gestión térmica. Estas variables interactúan entre sí y pueden modificar simultáneamente las condiciones de combustión, lubricación y evacuación de gases, influyendo indirectamente sobre factores asociados a la vida útil del motor. La Tabla 10 resume las principales variables identificadas en la literatura y sus posibles implicaciones sobre componentes críticos del motor.

Tabla 10. Variables potencialmente influenciadas por la anulación de sistemas SCR, DPF y EGR y su relación con la vida útil del motor.

Variable	Posible modificación asociada a la anulación	Implicación potencial sobre componentes del motor	Referencias
Temperatura de combustión	Incremento por reducción de EGR.	Mayor carga térmica sobre pistones y válvulas.	Heywood (2018); Bosch (2014)
Contaminación del lubricante	Disminución de partículas de hollín recirculadas.	Posible reducción de desgaste abrasivo en anillos y camisas.	Dennis et al. (1999)
Contrapresión del escape	Disminución por eliminación del DPF.	Modificación de las condiciones de operación del turbocompresor.	Majewski y Khair (2006)
Estrategias de inyección	Reprogramación electrónica del motor.	Alteración de patrones de combustión y consumo de combustible.	Johnson (2011); Yu et al. (2023)
Gestión térmica	Modificación de parámetros de control originales.	Cambios en la confiabilidad de componentes sometidos a altas temperaturas.	Bosch (2014); Yu et al. (2023)
Emisiones contaminantes	Incremento de NOx y material particulado.	Pérdida de conformidad ambiental y alteración del diseño original del sistema.	Johnson (2011); Dallmann y Minjares (2020)

Fuente: Elaboración propia a partir de la literatura científica revisada.

La evidencia revisada indica que la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR no afecta una única variable de funcionamiento, sino un conjunto de procesos interrelacionados que involucran la combustión, la lubricación, el sistema de escape y la gestión térmica del motor. Estas modificaciones pueden alterar la temperatura de combustión, la formación de

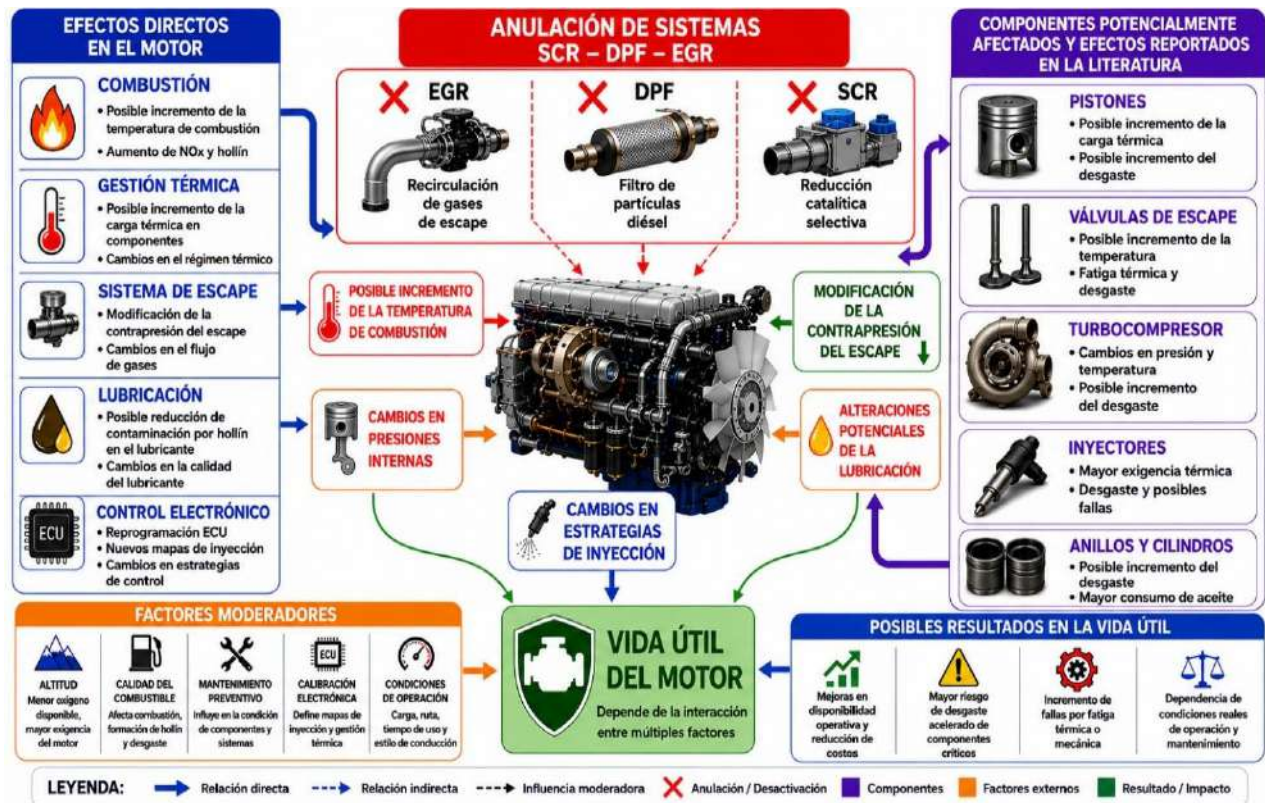
hollín, la contrapresión del escape y las estrategias de inyección, influyendo potencialmente sobre mecanismos de desgaste, fatiga térmica y degradación de componentes críticos (Bosch, 2014; Heywood, 2018; Pulkrabek, 2004). Asimismo, sus efectos dependen de factores como la calidad del combustible, las prácticas de mantenimiento, la calibración electrónica y las condiciones de operación del motor, variables cuya interacción puede modificar significativamente la magnitud de los efectos observados (Bosch, 2014; Heywood, 2018).

Con el propósito de integrar los principales mecanismos identificados en la literatura, la Figura 2 presenta un modelo conceptual que sintetiza la relación entre la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR, las variables operativas del motor y los factores asociados a la vida útil de motores diésel de transporte pesado. El modelo incorpora además factores moderadores, como la altitud, la calidad del combustible, el mantenimiento y las estrategias de calibración electrónica, que pueden intensificar o atenuar los efectos observados (Bosch, 2014; Johnson, 2011; Zheng et al., 2023).

Asimismo, los efectos derivados de la anulación de estos sistemas pueden adquirir una mayor relevancia en condiciones de gran altitud, donde la menor disponibilidad de oxígeno y las mayores exigencias sobre el sistema de sobrealimentación modifican las condiciones de combustión y operación del motor. Diversos estudios han señalado que estas condiciones pueden afectar la eficiencia de combustión, el desempeño del turbocompresor, el consumo de combustible y las estrategias de control electrónico, generando escenarios operativos distintos a los considerados durante el diseño y calibración originales del motor (Ceballos et al., 2021; Ghazikhani et al., 2013; Zheng et al., 2023).

La revisión realizada evidencia que la mayoría de las investigaciones disponibles analizan de forma independiente los sistemas EGR, DPF o SCR, mientras que son escasos los estudios que evalúan de manera integral los efectos de su anulación simultánea sobre los factores asociados a la vida útil del motor. Asimismo, existe una limitada evidencia científica desarrollada bajo condiciones reales de operación en regiones de gran altitud, lo que dificulta la comparación de resultados y contribuye a las discrepancias observadas en la literatura especializada (Ceballos et al., 2021; Zheng et al., 2023).

Figura 2. Modelo conceptual integrado de la relación entre la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR y los factores asociados a la vida útil de motores diésel de transporte pesado.



Fuente: Elaboración propia a partir de Dennis et al. (1999), Majewski y Khair (2006), Bosch (2014), Johnson (2011), Pulkrabek (2004), Heywood (2018), Ceballos et al. (2021), Ghazikhani et al. (2013), Yu et al. (2023), Zheng et al. (2023), Zhang et al. (2022) y Zhang et al. (2024).

En consecuencia, la evidencia científica disponible no permite afirmar de manera concluyente que la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR incremente o reduzca la vida útil del motor de forma generalizada. Los efectos observados dependen de la interacción de factores técnicos, operativos, ambientales y de mantenimiento; por ello, esta relación debe interpretarse como un fenómeno multifactorial que continúa constituyendo un campo de investigación abierto. Esta situación resulta especialmente relevante en contextos de gran altitud, como los presentes en Bolivia, donde las condiciones atmosféricas pueden modificar simultáneamente los procesos de combustión, sobrealimentación y control de emisiones (Johnson, 2011; Bosch, 2014; Ceballos et al., 2021; Zheng et al., 2023).

3. Brechas de Investigación en el Estudio de la Vida Útil de Motores Diésel con Sistemas de Postratamiento

La revisión de la literatura evidencia importantes limitaciones en el conocimiento disponible sobre la relación entre la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR y los factores asociados a la vida útil de motores diésel utilizados en el transporte pesado. Aunque existe una amplia producción científica sobre tecnologías de control de emisiones, la mayoría de las investigaciones se ha centrado en evaluar de forma independiente el desempeño de los sistemas EGR, DPF y SCR y su capacidad para cumplir las normativas ambientales, mientras que son escasas las investigaciones que analizan integralmente los efectos de su anulación sobre la durabilidad mecánica del motor (Johnson, 2011; Bosch, 2014).

Asimismo, la evidencia disponible resulta insuficiente para establecer relaciones concluyentes entre la eliminación de estos sistemas y los mecanismos de desgaste que afectan componentes críticos del motor. Si bien algunos estudios han documentado la influencia del EGR sobre la contaminación del lubricante y el desgaste asociado a partículas de hollín, persisten incertidumbres respecto a los efectos combinados derivados de la anulación simultánea de los sistemas SCR, DPF y EGR sobre la vida útil del conjunto motriz (Dennis et al., 1999; Heywood, 2018).

Otra limitación relevante es que gran parte de la literatura se ha desarrollado sobre motores Euro III, Euro IV y Euro V, cuyas características difieren significativamente de las tecnologías Euro VI actualmente utilizadas en el transporte pesado (Bosch, 2014; Heywood, 2018). Del mismo modo, siguen siendo escasos los estudios que evalúan directamente la influencia de la anulación de estos sistemas en condiciones reales de operación y bajo diferentes escenarios de altitud (Zheng et al., 2023; Zhang et al., 2022; Zhang et al., 2024).

Adicionalmente, la mayor parte de la evidencia científica proviene de investigaciones realizadas en regiones cercanas al nivel del mar, existiendo escasos estudios desarrollados en entornos de gran altitud, donde las condiciones atmosféricas modifican los procesos de combustión, la operación del turbocompresor y el comportamiento de los sistemas de control de emisiones (Pulkrabek, 2004; Bosch, 2014). Esta brecha resulta particularmente relevante para Bolivia, donde una parte importante del transporte pesado opera entre 2.500 y 4.500 m s.n.m.

Finalmente, la revisión realizada evidenció una limitada integración de variables técnicas, económicas y ambientales en los estudios disponibles, así como una escasez de investigaciones desarrolladas bajo condiciones reales de operación y en entornos de gran altitud (Ceballos et al., 2021; Zheng et al., 2023). En consecuencia, persisten vacíos de conocimiento que justifican el desarrollo de investigaciones empíricas orientadas a evaluar la influencia de la anulación de sistemas SCR, DPF y EGR sobre los factores asociados a la vida útil de motores diésel de transporte pesado en condiciones operativas representativas del contexto boliviano.

Conclusiones

La revisión documental realizada permitió analizar la evidencia científica disponible sobre la relación entre la anulación de los sistemas de postratamiento SCR, DPF y EGR y la vida útil de motores diésel utilizados en el transporte pesado. Los resultados muestran que estas tecnologías constituyen componentes fundamentales para el control de emisiones contaminantes, contribuyendo significativamente a la reducción de óxidos de nitrógeno (NOx) y material particulado exigida por las normativas ambientales internacionales.

La evidencia revisada indica que el sistema EGR presenta la relación más directa con los mecanismos de desgaste interno del motor, debido al incremento de partículas de hollín en el lubricante, las cuales pueden favorecer procesos de desgaste abrasivo en componentes críticos como anillos de pistón, camisas de cilindro y cojinetes. Por su parte, los sistemas DPF y SCR ejercen una influencia principalmente indirecta sobre la durabilidad del motor, estando sus efectos asociados al control de emisiones, la contrapresión del sistema de escape y las estrategias de gestión térmica y electrónica del motor.

Asimismo, se identificó que la anulación de los sistemas SCR, DPF y EGR modifica las condiciones de funcionamiento originalmente previstas por los fabricantes, pudiendo alterar variables fundamentales como la temperatura de combustión, las presiones internas del cilindro, la calidad de la lubricación, la contrapresión del escape y las condiciones de operación de componentes como inyectores, válvulas y turbocompresores. Sin embargo, la literatura científica actualmente disponible no permite afirmar de manera concluyente que la anulación de dichos sistemas incremente o reduzca la vida útil del motor, debido a que los resultados observados dependen de múltiples factores relacionados con el diseño del motor,

la calibración electrónica, la calidad del combustible, las prácticas de mantenimiento, las condiciones de carga y el entorno operativo.

De igual manera, se evidenció una importante brecha de conocimiento respecto al comportamiento de motores diésel equipados con sistemas de postratamiento en condiciones de gran altitud. Esta situación adquiere especial relevancia para Bolivia, donde gran parte del transporte pesado opera por encima de los 3.500 m s.n.m., bajo condiciones significativamente diferentes a aquellas consideradas en la mayoría de los estudios internacionales desarrollados cerca del nivel del mar.

En consecuencia, se concluye que existe la necesidad de desarrollar investigaciones empíricas bajo condiciones reales de operación que permitan comparar motores con sistemas de postratamiento activos y motores con sistemas anulados, incorporando análisis tribológicos, evaluación del desgaste de componentes críticos, monitoreo de parámetros operativos y análisis de confiabilidad mecánica. Asimismo, resulta necesario integrar variables técnicas, económicas y ambientales, tales como consumo de combustible, costos de mantenimiento, costos de reparación, disponibilidad operativa y emisiones contaminantes, con el fin de generar evidencia científica que contribuya a la toma de decisiones en el sector del transporte pesado. Finalmente, se recomienda priorizar investigaciones desarrolladas en condiciones representativas de Bolivia y otros países andinos, donde la altitud, la calidad del combustible y las condiciones particulares de operación pueden influir significativamente en la relación entre los sistemas de postratamiento y la vida útil de los motores diésel.

Referencias

- Ceballos, J. J., Melgar, A. y Tinaut, F. V. (2021). Influence of environmental changes due to altitude on performance, fuel consumption and emissions of a naturally aspirated diesel engine. *Energies*, 14(17), 5346. <https://doi.org/10.3390/en14175346>
- Dallmann, T. y Minjares, R. (2020). *Fuel efficiency and climate impacts of soot-free heavy-duty diesel engines*. International Council on Clean Transportation (ICCT). June 2020. <http://www.theicct.org/>
- Dennis, A., Garner, C. y Taylor, D. (1999). The effect of EGR on diesel engine wear. *SAE Technical Paper 1999-01-0839*. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0839>

Ghazikhani, M., Feyz, M. E., Mahian, O. y Sabazadeh, A. (2013). Effects of altitude on the soot emission and fuel consumption of a light-duty diesel engine. *Transport*, 28(2), 130–139. <https://doi.org/10.3846/16484142.2013.815134>

Heywood, J. B. (2018). *Internal combustion engine fundamentals* (2nd ed.). McGraw-Hill Education.

Johnson, T. V. (2009). Review of diesel emissions and control. *International Journal of Engine Research*, 10(5), 275–285. <https://doi.org/10.1243/14680874JER04009>

Johnson, T. V. (2011). Diesel emission control in review. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 143–157. <https://doi.org/10.4271/2011-01-0304>

Majewski, W. A. y Khair, M. K. (2006). *Diesel emissions and their control*. SAE International.

Merkisz, J. y Pielecha, J. (2016). *Emissions from modern diesel engines*. *Transportation Research Procedia*, Volume 14, 2016, Springer. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2016.05.452>

Miller, J. y Tilch, B. (2016). *Strategies for NOx reduction in diesel engines using SCR and EGR systems*. SAE Technical Paper 2016-01-0900. <https://doi.org/10.4271/2016-01-0900>

Pardiñas, J. y Feijoo, M. (2018). *Tecnologías de postratamiento de gases de escape en el motor diésel*. Universidade da Coruña.

Pulkrabek, W. W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine* (2nd ed.). Pearson Prentice Hall.

Robert Bosch GmbH. (2014). *Diesel engine management: Systems and components* (5th ed.). Robert Bosch GmbH.

Yu, T., Zhang, Y., Li, J. y Wang, H. (2023). Diesel engine emission aftertreatment device aging characteristics and corresponding control technologies: A review. *Atmosphere*, 14(2), 314. <https://doi.org/10.3390/atmos14020314>

Zhang, J., Li, X., Amini, M. R., Kolmanovsky, I., Tsutsumi, M. y Nakada, H. (2022). Development of a model predictive airpath controller for a diesel engine on a high-fidelity engine model with transient thermal dynamics. *IFAC-PapersOnLine*, 55(37), 493–498. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2022.09.290>

Zhang, J., Li, X., Kolmanovsky, I., Tsutsumi, M. y Nakada, H. (2024). Model predictive control of diesel engine emissions based on neural network modeling. In *Proceedings of the 2024 American Control Conference (ACC)*. IEEE.

Zheng, Y. M., Xie, L. B., Liu, D. Y., Ji, J. L., Li, S. F., Zhao, L. L. y Zeng, X. H. (2023). Emission characteristics of heavy-duty vehicle diesel engines at high altitudes. *Journal of Applied Fluid Mechanics*, 16(12), 2329–2343. <https://doi.org/10.47176/jafm.16.12.1981>

Conflicto de interés

El autor de este manuscrito declara no tener ningún conflicto de interés.

Declaración ética

El autor declara que el proceso de investigación que dio lugar al presente manuscrito se desarrolló siguiendo criterios éticos, por lo que fueron empleadas en forma racional y profesional las herramientas tecnológicas asociadas a la generación del conocimiento.

Copyright

La **Revista Latinoamericana de Difusión Científica** declara que reconoce los derechos de los autores de los trabajos originales que en ella se publican; dichos trabajos son propiedad intelectual de sus autores. Los autores preservan sus derechos de autoría y comparten sin propósitos comerciales, según la licencia adoptada por la revista.

Licencia CreativeCommons

Esta obra está bajo una Licencia CreativeCommons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional

