



UNIVERSIDAD · ECCI

EDITORIAL

POSTRATAMIENTO DE GASES DE ESCAPE

**Control de emisiones en el motor Diesel o
motor de encendido por compresión MEC**

Armando Alfredo Hernandez Martin



Postratamiento de Gases de Escape

Control de emisiones de motor Diésel o
motor de encendido por compresión MEC

Armando Alfredo Hernández Martín



Fernando Arturo Soler López
Rector de la Universidad ECCI

Víctor Romero Huertas
Vicerrector Académico

Carlos Enrique Masmela González
Vicerrector Administrativo

Hernando Curtidor Castellanos
Vicerrector de Investigación

Débora Lorena Ramírez Vargas
Decana de la Facultad de Ciencias Económicas y Administrativas

Angélica Rodríguez Vargas
Editora

Tatiana Román
Wilmer Ferney Núñez Méndez
Correctores de estilo

Bryam Esteban Nopia Murcia
Diagramador

Copyright © 2023 Armando Alfredo Hernández Martín
Todos los derechos reservados.
ISBN: 978-958-8817-73-6

Para mi madre, quien aún con el paso de los años sigue siendo una gran mujer; para mi esposa, compañera de alegrías, deseos, placeres y luchas; para mi hijo Cristian, hombre dedicado a la academia y al mundo; para Emmanuel, noble y amoroso hijo; y para Isa, el sueño hecho realidad.

RECONOCIMIENTOS

Este libro que tienen en sus manos es el resultado de un trabajo arduo de investigación que toma como base la información de marcas automotrices reconocidas, libros especializados y recursos educativos abiertos. Además, una variedad de fuentes que incluyen manuales digitales y físicos, sitios web especializados y libros especializados en la materia. Es importante destacar que nada de esto habría sido posible sin la generosidad de amigos, estudiantes y profesionales que tuvieron a bien dar de su tiempo y de su biblioteca personal.

Es gracias a la información recopilada de estas fuentes que he podido crear un recurso integral que abarca una amplia gama de temas relacionados con los elementos que forman el frente tecnológico de los sistemas de postratamiento de gases de escape para el motor diésel. Se ha explorado en este libro desde la arquitectura mecánica del motor diésel moderno hasta las últimas innovaciones que esta arquitectura ha sufrido en aras de la disminución su del impacto al medio ambiente. Espero que esta información les sea de utilidad tanto a entusiastas como a profesionales del sector.

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a todos aquellos que han contribuido a este proyecto, ya sea compartiendo su conocimiento en línea, publicando libros técnicos o creando manuales detallados. Su generosidad y dedicación han hecho posible la realización de este libro. La información técnica, las gráficas y las ideas primordiales, fueron tomadas de las siguientes empresas del sector automotriz. Para ellos mi más sincero agradecimiento y respeto por los aportes que realizan y la posibilidad de poder consultarlos y darlos a conocer a los interesados:

- Van Doorne's Automobiel Fabriek (DAF)
- Cummins Inc.
- Detroit Diesel Corporation (DDC)
- Mercedes-Benz AG
- MAHLE Aftermarket
- Volkswagen
- Bosch GmbH
- Denso
- Citroën
- Volvo
- Komatsu
- Delphi
- Scania
- Volvo

Con gratitud

Armando Alfredo Hernández Martín

CONTENIDO

INTRODUCCIÓN	1
1. EL MOTOR DIÉSEL MODERNO	3
1.1 Parámetros del constructivos en el motor diésel moderno	3
1.1.1. Novedades alternativas y tecnológicas del motor diésel moderno	4
2. COMBUSTIBLE PARA MOTOR DIÉSEL	10
2.1 Propiedades fisicoquímicas de los combustibles	12
2.1.1 Densidad	12
2.1.2 Viscosidad	13
2.1.3 Volatilidad	14
2.1.4 Estabilidad	14
2.1.5 Impurezas	15
2.1.6 Poder calorífico	15
2.2 Normas de calidad y de orden legal	17
2.2.1 Marco regulatorio colombiano	17
3. Sobrealimentación DE AIRE	20
3.1 Pilares Tecnológicos	20
3.2 Intercambiadores de calor para aire de carga del turbo	28
4. Sistemas de Inyección con Gestión Electrónica para Motor Diésel	30
4.1 Sistema de combustible	31
4.1.1 Sistema de inyección de riel común	33
4.2.2 Sistema de inyección unidad - inyector	35

5. PROCESO DE LA COMBUSTIÓN EN MOTOR DIÉSEL	37
5.1 Retardo de encendido	39
5.2 Elevación de presión o combustión rápida	39
5.3 Combustión lenta o combustión controlada	40
5.4 Formación de la mezcla	41
6. RETOS PARA EL CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES	43
6.1 Marco legal para el control de emisiones	43
6.1.1 Antecedentes, normatividad y legislación	43
6.1.2 Acciones en Bogotá para el mejoramiento de la calidad del aire y el control de emisiones	47
6.2 Formación de contaminantes producto de la combustión	50
6.2.1 Óxidos de nitrógeno	51
6.2.2 Monóxido de carbono	51
6.2.3 Hidrocarburos	52
6.2.4 Partículas en suspensión	53
6.2.5 Emisiones de efecto invernadero, aportantes y estrategias de mitigación	55
7. POSTRATAMIENTO DE GASES DE ESCAPE	57
7.1 Categorización de los sistemas de postratamiento de gases de escape	60
7.1.1 Reactores térmicos	60
7.1.2 Reactores catalíticos	61
7.1.3 Reactores químicos	63
7.1.4 Filtros químicos	64
7.1.5 Filtros físicos	64
REFERENCIAS	67

FIGURAS

Figura 1. Línea de motores DAF. Motorok _____	3
Figura 2. Motor Cummins ISF. Automotores-rev _____	4
Figura 3. Eyector de aceite. Cummins. _____	5
Figura 4. Motor Detroit Diésel. TurboSquid. _____	5
Figura 5. Pistón Monoherm. Detroit Diésel. _____	6
Figura 6. Múltiple de admisión. Heavytruckparts _____	6
Figura 7. Motor Br 500. Manufacturas, proveedores y productos de China. _____	7
Figura 8. Geometría de los anillos motor BR 500. Mercedes Benz (2022). _____	7
Figura 9. Disposición valvular de flujo cruzado. Mercedes Benz (2022). _____	8
Figura 10. Motor diésel DAF MX-11. Pinterest. _____	8
Figura 11. Turbo de geometría variable. DAF _____	9
Figura 12. Refinación del petróleo. Adaptado de Quora. freepik _____	10
Figura 13 . Fórmula de la densidad. Elaborado por el autor _____	12
Figura 14. Variables a tener en cuenta para la Viscosidad. Elaborado por el autor y adaptado de freepik _____	13
Figura 15. Contaminación en el combustible diésel. Fondear _____	15
Figura 16. Curvas de torque y potencia. Camionchileno _____	16
Figura 17. Calidad del aire. Adaptado de Departamento nacional de planeación (2018) _____	17
Figura 18. Gases de efecto invernadero. Obtenido y adaptado de El Tiempo. freepik _____	18
Figura 19. Motor Caterpillar Biturbo. My Little salesman. _____	20

Figura 20. Pasos para diagnosticar fallo en un turbo compresor. Cummins _____	21
Figura 21. Límites de Opacidad. Adaptado de la Resolución 910 de 2008. _____	22
Figura 22. Pistones con cámara de inyección en la corona e inyección directa. Mahle. _____	23
Figura 24. Componentes compresor tipo centrífugo. Adaptado de The Daily Drive. _____	25
Figura 25. Sistema de doble compresor tipo volumétrico. Elaborado por el autor. _____	26
Figura 26. Sistema de regulación de carga waste gate. Elaborado por el autor. _____	27
Figura 27. Turbo con actuador electrónico para regulación de geometría variable. Elaborado por el autor. _____	28
Figura 28. Ubicación del intercambiador de calor tipo aire-aire. Elaborado por el autor. _____	28
Figura 29. Intercambiador tipo aire - refrigerante. Elaborado por el autor. _____	29
Figura 30. Componentes de la gestión electrónica en un motor diésel. Adaptado de Bosch. _____	30
Figura 31. Sistema de combustible diésel. Elaborado por el autor. _____	31
Figura 32. Sistema de inyección HDI. Elaborado por el autor. _____	33
Figura 33. Bomba de alta presión para sistema riel común. Elaborado por el autor. _____	34
Figura 34. Riel de inyección de alta presión. Elaborado por el autor. _____	34
Figura 35. Inyector controlado electrónicamente para motor diésel. Elaborado por el autor. _____	35
Figura 36. Unidades inyectoras. Elaborado por el autor. _____	36
Figura 37. Cámara de combustión de inyección directa. Komatsu. _____	37
Figura 38. Movimiento del aire en cámara Swirl. Elaborado por el autor. _____	38
Figura 39. Movimiento del aire en la cámara de combustión Squish. Elaborado por el autor. _____	38
Figura 40. Fase de la combustión del motor diésel. Ortiz (2017) _____	39

Figura 41. Formación de la mezcla en un motor diésel de inyección directa. Research _____	41
Tabla 5. Gases de la combustión de motor diésel. MasterD. _____	50
Figura 42 . Óxidos de nitrógeno. SVI Industrial. _____	51
Figura 43. Estrategias para combatir la polución de los hidrocarburos. Sciencedirect _____	52
Figura 44. Partícula en suspensión y control. Sciencedirect.com _____	53
Figura 45. Emisiones de efecto invernadero discriminadas por sector. Ourworldinata _____	55
Figura 46. Componentes del sistema de postratamiento de gases de escape. Cummins _____	57
Figura 48. Partes del catalizador y conversión química. Adaptado de: cars.com _____	61
Figura 49. Presentación comercial de la urea de amonio. Adaptado de Amazon. _____	63
Figura 50. Filtro de partículas diésel dentro del proceso de limpieza. Adaptado de Researchgate. _____	64
Figura 51. Beneficios del filtro de partículas. Recambios de Desguace. _____	66

TABLAS

Tabla 1. Documentos gubernamentales. Elaborado por el autor. _____	44
Tabla 2. Documentos internacionales sobre emisiones. Elaborado por el autor. ____	45
Tabla 3. Objetivos de desarrollo sostenible. Organización de las Naciones Unidas (ONU). _____	46
Tabla 4. Operativos de control. Medio Ambiente (2023). _____	48
Tabla 6. Clasificación de sistemas de postratamiento de gases de escape. Casanova & Armas (2011)_____	60

INTRODUCCIÓN

Los sectores productores industriales nacionales, continentales y mundiales muestran preocupación desde diversos puntos de vista y/o intensidad por el impacto que puedan tener sus actividades en el medio ambiente como: la calidad del aire, la emisión de los gases de efecto invernadero, el calentamiento global y el cambio climático. Frente a lo anterior, existen organizaciones, documentos y acuerdos oficiales, que tienen el fin de unir esfuerzos de diversos países frente a este gran reto. Así, el Acuerdo de París, el Protocolo de Kyoto y la Convención Marco orientan las acciones para que todas las actividades hechas en pro del bienestar de la humanidad se controlen y den como resultado una mitigación al medio ambiente para beneficios en todo el mundo.

La Organización de las Naciones Unidas (ONU) establece objetivos de desarrollo sostenible que supervisan los sectores industriales generadores de emisiones. La ONU propone metas para efectuar cambios con resultados de impacto y fácilmente medibles. Entre estos objetivos se encuentra el número trece, conocido como ‘Acción por el clima’, cuyo objetivo principal es tomar medidas urgentes para enfrentar el cambio climático y sus consecuencias. Además, se destaca el objetivo once, ‘Ciudades y comunidades sostenibles’, que busca mejorar la inclusión, seguridad, resiliencia y sostenibilidad de las ciudades. Por último, el objetivo nueve, ‘Industria, innovación e infraestructuras’, se centra en desarrollar infraestructuras resilientes, fomentar la industrialización sostenible y promover la innovación (Naciones Unidas, 2018).

Uno de los sectores estratégicos para su cumplimiento es toda la cadena de valor aliada con el sector automotriz; desde la aplicación de vehículos familiares, transporte de carga y pasajeros, como equipos estacionarios, industrial naval y maquinaria amarilla, por nombrar algunos ejemplos. Y sobre todo, los que se desplazan por vías principales a diario, y por ende llevan el rótulo de contaminantes en alto nivel por su propio uso, los cuales deben someterse a revisiones legales de control de emisiones propias de cada país.

Derivado de lo anterior, se evidencia la necesidad de aplicar normativas ambientales en el control de emisiones de Gases de Efecto Invernadero (GEI), generadas por vehículos

que utilizan total o parcialmente combustibles derivados de los hidrocarburos, como las normas de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) para Estados Unidos y la norma Euro para la comunidad europea. Ambas referentes mundiales, lideran pautas de control en las exigencias tecnológicas que les exige a los fabricantes de motores niveles mínimos de contaminación, en este caso en función del año de producción del vehículo y/o motor diésel. Por consiguiente, estas normas se actualizan utilizando números arábigos o romanos. Por ejemplo, se tienen normas como Euro 6 y Norma EPA Tier IV, o incluso combinaciones de ambos, como Euro 6d. Así, cuanto más alto es el número de la norma o se use una letra más lejana a la letra A, más reciente es la normativa.

En este libro inicialmente se describen características del motor diésel moderno y se describen las características del combustible usado en este tipo de motores incluyendo el marco regulatorio en Colombia. Luego se aclaran los conceptos más importantes de la sobrealimentación de aire. Seguido a ello se realiza una caracterización de los sistemas de inyección controlados electrónicamente, enfocándose en las dos tecnologías más usadas. Posteriormente se hace un análisis del desarrollo de la combustión para finalizar con el sistema de postratamiento de gases de escape.

Armando Alfredo Hernández Martín

Docente Universitario

Universidad ECCI

Facultad de Ingeniería

Dirección de ingeniería Mecánica

Tecnología en Mecánica Automotriz

2024

1. EL MOTOR DIÉSEL MODERNO

1.1 Parámetros del constructivos en el motor diésel moderno

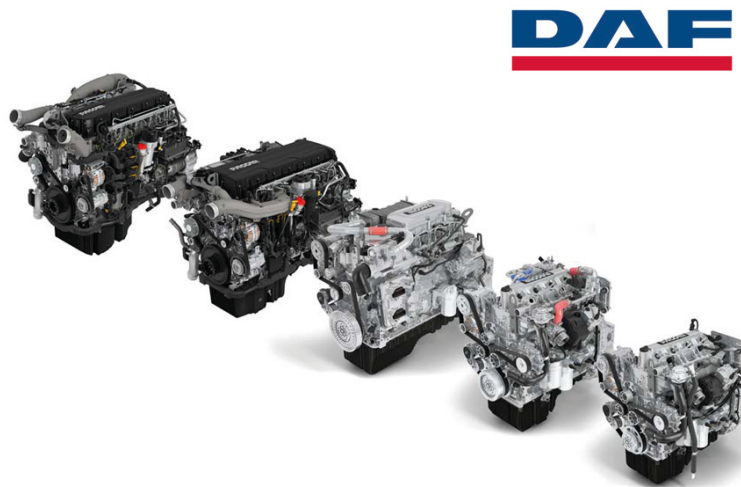


Figura 1. Línea de motores DAF. Motorok

Según Romero & Carranza (2005), el avance en la mejora de los motores contemporáneos, junto con la incorporación de nuevas opciones de diseño y tecnología, puede provocar alteraciones significativas en las leyes de similitud que se aplican a los motores clásicos. A propósito de la evolución de los motores de diésel o MEC (motor de encendido por compresión), en lo relacionado con los mecanismos y sistemas propios, desde la llamada ley de la semejanza y los parámetros geométricos, se ven envueltas variables como cilindrada, área del pistón, cantidad de cilindros, relación de diámetro de pistón y carrera. Unido a lo anterior, se resalta la ciencia de los materiales, los cuales influyen en aspectos como torque, potencia revoluciones del motor, entre otras. De la misma forma, los motores con geometría igual tienen aspectos como rendimiento mecánico y térmico similares. Adicionalmente de un idéntico consumo teórico específico de combustible, cargas térmicas y cargas específicas sobre la masa constructiva del motor (Romero & Carranza, 2005).

Un claro ejemplo de lo anterior es la familia de motores MX 11 y MX 13 (figura 1) la cual equipa los modelos de camión CF y XF, donde se resalta el rendimiento mecánico a bajas revoluciones, alineado con un consumo mínimo de combustible. Esta familia de motores, que abarca potencias que oscilan entre los 229 CV y los 449 CV, se compone de tres variantes distintas. Estas variantes se encuentran tanto en las líneas de camiones de tonelaje medio como en aquellas dedicadas al transporte de cargas voluminosas de poco peso. Asimismo, están disponibles en arquitecturas mecánicas de 11 litros y 12.9 litros (DAF, 2022).

1.1.1 Novedades alternativas y tecnológicas del motor diésel moderno

El medio ambiente es el impulso para que cada fabricante de motores diésel, esté en constante evolución; atendiendo aspectos como consumo de combustible, límites de emisiones producto de la combustión, así como emisiones sonoras producto del funcionamiento propio del motor. Seguidamente, se presentan algunos motores diésel de las marcas más destacadas y sus novedosas alternativas constructivas y tecnológicas.

Cummins

Motor Cummins ISF



Figura 2. Motor Cummins ISF. Automotores-rev

Como se aprecia en la figura 2, esta línea de motores diésel aplica para camiones ligeros y vehículos de pasajeros de la categoría “van”. Estos presentan 2 cilindradas de 2.8 litros y 3.8 litros. Inicialmente, se resalta el uso del eyector de aceite como se muestra en la figura 3. Este objeto direcciona el aceite hacia la corona del pistón que está desarrollado para refrigerar esta misma corona y así controlar la temperatura de la cámara de combustión. Al lograr el equilibrio térmico, se aumenta la vida útil del pistón, se mejora el proceso de combustión y el control de emisiones. Esto se debe a que, al aumentar la temperatura del gas en la cámara de combustión durante el funcionamiento, se produce una compresión

por el movimiento ascendente del pistón, que tiene una relación promedio de 15:1. Además, el gas se calienta debido a la energía liberada en la reacción de combustión. Este gas a alta temperatura transfiere calor a las paredes, que son mucho más frías debido al funcionamiento del sistema de refrigeración. (Martin, 2007).

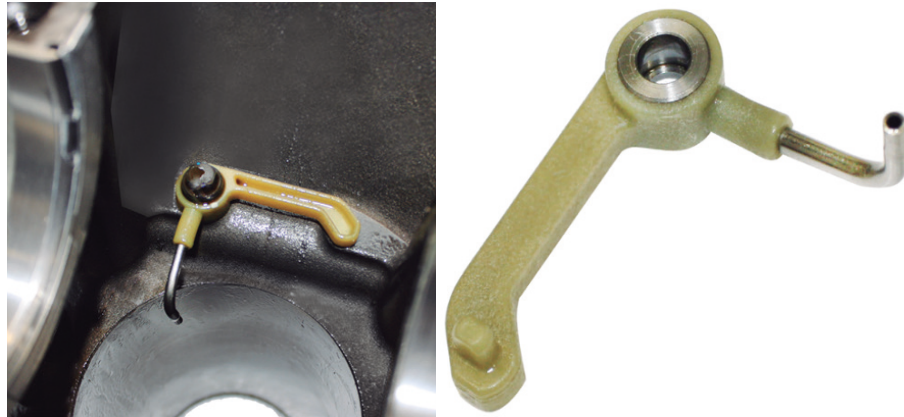


Figura 3. Eyector de aceite. Cummins.

Detroit Diésel

Motor Detroit Diésel Serie 60

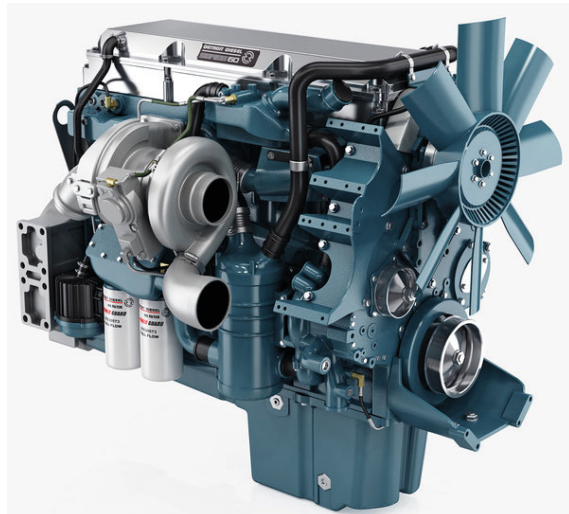


Figura 4. Motor Detroit Diésel. TurboSquid.

Con varios campos de aplicación, el motor Detroit Diésel de la figura 4 tiene en sus haberes tecnológicos aspectos como un rango de cilindradas desde 11.1 litros, 12.7 litros y 14 litros. Todos sobre la base de una disposición de seis cilindros en línea y una relación de compresión que va desde 15:1 hasta 16,5:1 (ver figura 4).

Para empezar a contemplar la tecnología de este motor está la cámara de combustión ubicada en el pistón del motor, propio de la inyección directa, como el denominado *monotherm* que se presenta en la figura 5. Este término se refiere a una sola pieza, fabricado en materiales que reducen la fricción, que contribuyen al desgaste en anillos y camisas, así como a la disminución de la ceniza producida por el aceite y un mejor arranque en frío (Demand Detroit, 2022). Los detalles anteriormente nombrados son determinantes para el control de la temperatura de la combustión y el desarrollo completo de la misma, más en estos motores que usan presiones de inyección por encima de 2000 bar.



Figura 5. Pistón Monotherm. Detroit Diésel.

Dentro de la figura 6 se expone el múltiple de admisión de un diseño de alta velocidad para minimizar la condensación, la cual es producto del agua presente en el aire. Así como para no crear fricción en el aire de admisión que aumentaría la temperatura y sería contraproducente para la función del intercooler. Además, para aumentar la resistencia a la corrosión, este viene con recubrimiento epóxido y finalmente una distribución geométrica de los tornillos para sellar altas presiones beneficiando la potencia del motor, con la disminución de presión de aire del turboalimentador (Olympia Power Systems, 2022).



Figura 6. Múltiple de admisión. Heavytruckparts

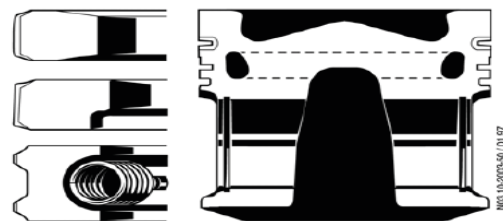
Mercedes Benz
Motor BR 500



Figura 7. Motor Br 500. Manufacturas, proveedores y productos de China.

Este motor que se refleja en la figura 7 es una unidad con un diseño de 6 y 8 cilindros en V, de 2 litros por cada cilindro, dando como resultado final cilindradas totales de 12 litros y 16 litros.

En tal sentido y a causa de las propuestas de tecnología de este motor, como en la geometría de los anillos que se exponen en la figura 8, el anillo superior denominado de compresión es del tipo doble trapecio o cónico con tecnología *Niresist*. Con capa de cromo metálica, tiene propiedades de resistencia a altas temperaturas y mínimo índice de desgaste. En la segunda ranura se incorpora un anillo de torsión inversa que sirve para aportar a la compresión y a la vez como rascador de aceite. Para terminar, está también en el tercer anillo de bordes achaflanados, con lo cual se garantiza un consumo reducido de aceite a largo plazo. Formando una triada tecnológica de anillos con índices reducidos de desgaste, un control de paso de gases al cárter desde la cámara de combustión y límites bajos de consumo de aceite (Mercedes Benz, 2022). Lo citado previamente es un aporte valioso en



Kolben und Kolbenringe (Motorenbaureihe 500)

Figura 8. Geometría de los anillos motor BR 500. Mercedes Benz (2022).

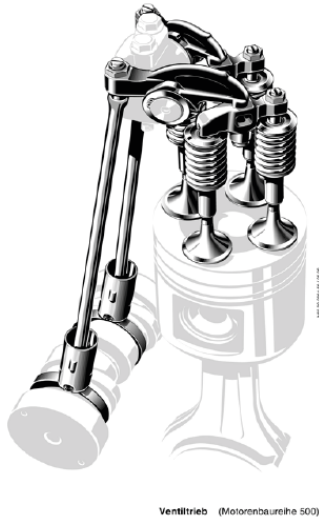


Figura 9. Disposición valvular de flujo cruzado.
Mercedes Benz (2022).

cuanto a la generación controlada de emisiones, ya que, al garantizar una compresión estable en los cilindros y un consumo mínimo de aceite motor, el impacto al medio ambiente es controlado dentro de los límites, de igual manera el aprovechamiento energético en este motor siempre estará cerca al 30%, siempre y cuando el motor esté dentro de los límites de su potencia y torque.

De esta forma, es importante considerar el cambio de carga- Y para ello se incluyen cuatro válvulas por cilindro, lo que beneficia el consumo de combustible en cuanto a la reducción y permite con una misma intención que las emisiones a través del sistema de escape sean más favorables. Lo anterior obliga a una arquitectura de un eje de levas en el bloque, apoyado de impulsores tipo rodillo, taqués y balancines para accionar las válvulas de admisión y escape por medio de puentes conectores, como es mostrado en la figura 9. Reduciendo así el desgaste entre dichos componentes, que en varios casos se les aplica temple por inducción. (Lehnert, 1979).

Daf
Motor MX-11



Figura 10. Motor diésel DAF MX-11. Pinterest.

La casa *Van Doorne's Aanhangwagen Fabriek*, conocida por sus siglas DAF, tiene en su inventario tecnológico el motor MX-11 Euro 6 de 10.8 litros de cilindrada total, el cual se aprecia en la figura 10. Para cumplir con dicha norma, este equipó un sistema de inyección riel y común acompañado de un turbo de geometría variable. Inicialmente el sistema de inyección maneja 2500 bares, presión máxima a la cual ingresa el combustible a la cámara; dicho sistema cuenta con dos unidades de bombeo independientes integradas en el bloque motor y operadas por sendas levas maquinadas en el eje de levas del motor con una geometría diferente, un flanco ascendente pronunciado y uno descendente lento, y achatado en razón a que la inyección de combustible debe realizarse de manera rápida.

En este mismo orden de ideas, para garantizar la potencia ofrecida se acompaña de un turbo de geometría variable con válvula de control que funciona a presión, el cual es gestionado electrónicamente gestión electrónica, como se refleja en la figura 11, este a su vez usa a un intercooler transversal, compuesto de una fila y aluminio. Estos dos elementos se complementan para entregar el torque y la potencia en función de las revoluciones del motor y el diseño de fábrica, si alguna de las dos opera de una forma incorrecta se evidenciará emisiones excesivas, pérdida de potencia y aumento del consumo de combustible, entre otros.

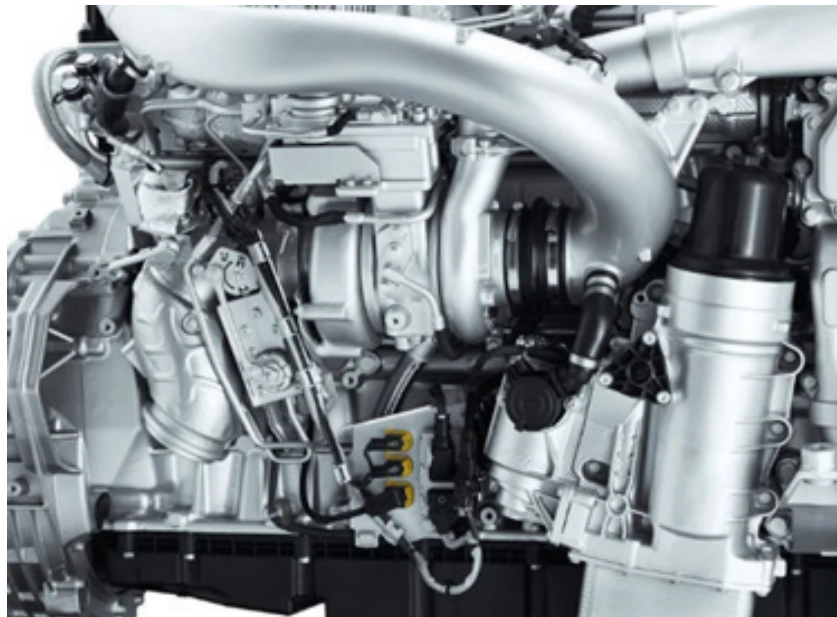


Figura 11. Turbo de geometría variable. DAF

2. COMBUSTIBLE PARA MOTOR DIÉSEL

En Bogotá se han tomado varias acciones para mejorar la calidad del combustible diésel y reducir las emisiones contaminantes que este genera. Las estrategias más preponderantes a nombrar son:

1) La adopción de combustibles más limpios. Desde el año 2000, se ha adoptado progresivamente el uso de combustibles diésel con un contenido menor de azufre. En la actualidad, el diésel que se comercializa en la ciudad tiene un contenido máximo de cincuenta partes por millón (ppm) de azufre, lo que ha permitido reducir las emisiones de óxidos de azufre (SOx) y material particulado (PM) generados por los motores diésel.

2) La regulación de la calidad del combustible. La Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá ha establecido una regulación para la calidad del combustible diésel, la cual contempla límites máximos para la cantidad de azufre y otros contaminantes que puede contener el combustible. Además, se han establecido requisitos para la etiquetación del combustible diésel y se realiza un monitoreo regular para verificar que se cumplan los estándares de calidad.

3) La promoción de tecnologías más limpias. La Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá ha promovido la adopción de tecnologías más limpias en los vehículos diésel, como la instalación de filtros de partículas y la adopción de tecnologías más eficientes en términos de consumo de combustible (Secretaría del Medio Ambiente, 2023).



Figura 12. Refinación del petróleo. Adaptado de Quora, freepik

Aunque se han hecho muchos avances tecnológicos, en esta guía se trata el combustible usado en los motores diésel, derivado del petróleo como se presenta en la figura 12, es así, con mucha ventaja, el único recurso utilizado para la obtención de energía mecánica como resultado del proceso de combustión. De lo anterior se deduce que los combustibles deben cumplir una serie de requisitos para satisfacer los requerimientos para obtención de energía mecánica, según Muñoz et al. (2008):

- La atomización del combustible en la cámara de combustión, es fundamental en los motores térmicos de encendido por compresión
- El combustible es un factor esencial para el arranque y puesta en marcha sin depender de la temperatura del medio ambiente en los motores térmicos de encendido por compresión
- Los resultados de la combustión no deben poner de manifiesto depósitos en las paredes de la cámara de combustión.
- El combustible es un agente participativo en la reducción del desgaste y corrosión de los elementos y sistemas internos del motor.
- La combustión completa es producto de las propiedades físico químicas del combustible, minimizando de esta forma la afectación al medio ambiente

Lo anterior es una ruta acompañada de unas variables claras que resaltan la importancia del combustible en las emisiones de productos contaminantes. Por consiguiente, cabe decir que los combustibles líquidos son la fuente principal de energía para los motores diésel, puesto que proporcionan una gran cantidad de energía por unidad de volumen y están acompañados de variables de seguridad en el manejo, almacenamiento y transporte (Muñoz et al., 2008). En cuanto a la tecnología, para los sistemas de alimentación de combustible se tiene una arquitectura básica donde en muchos casos el mismo combustible se usa para lubricación y refrigeración de los componentes; lo mencionado hace del combustible líquido el actor principal en aplicaciones donde se requiera un motor diésel.

De manera que la legislación sobre emisiones derivada de los países con economías desarrolladas son la ruta para que los fabricantes de motores desarrollen sistemas de combustión y de postratamiento de gases de escape más pertinentes. De la misma forma, la industria de los derivados del petróleo dirige esfuerzos para apoyar el cumplimiento de

estas legislaciones, mejorando continuamente la cadena de suministros en todas sus etapas, desde la refinación hasta la distribución al cliente final (Lombana et al. 2015). (Lombana et al, 2015)

2.1 Propiedades fisicoquímicas de los combustibles

2.1.1 Densidad

$$Densidad \rightarrow d = \frac{Masa}{Volumen}$$

Figura 13 . Fórmula de la densidad. Elaborado por el autor

Definida como la masa por unidad de fluido de volumen y representada (ρ) según la figura 13. La densidad es una propiedad que se mide de manera sencilla y se puede asociar con otras propiedades determinantes para evaluar el desempeño de los combustibles en los motores de encendido por compresión, eso significa el poder calorífico y el número de cetano (Benjumea et al., 2006). Para el caso de los motores diésel, los sistemas de inyección se basan en el volumen de entrega de combustible en las diferentes condiciones de operación del motor. Dicha entrega se realiza entre 120 bar a 350 bar en los sistemas de inyección con gestión mecánica y de 1300 bar a 2500 bar en sistema de inyección con gestión electrónica, que en la actualidad se concentran en las unidades inyectoras y los sistemas de conducto común. Unido a esto se encuentran las temperaturas alrededor de un inyector en la cámara de combustión producto de la compresión, cuyos límites están en un margen de 40 bar a 60 bar, del mismo modo en cuanto a temperaturas y/o regiones calientes, las cuales están en el rango de 700°C y 810°C (Sanz & Motores, 2022). Esto obliga a un diseño de galerías de enfriamiento en los pistones que se usan para lograr resultados de rendimiento y emisiones esperados. Todo ello son aspectos que invitan a considerar las variaciones de la densidad de los combustibles y su impacto en las emisiones contaminan-

tes: así como la afectación del arranque en frío o el incremento de las emisiones de HC y NOx como consecuencia del porcentaje de contenido de hidrocarburos aromáticos. Esto tiene una estrecha relación con la densidad de límites en muchos países; que para el caso de Colombia es el 20%.

2.1.2 Viscosidad

Esta propiedad permite comprobar el comportamiento del gasóleo en lo referente a la forma de fluir a través de un ducto o a través de una superficie (García Del Rio, 2017). La viscosidad es fundamental para la circulación del combustible en los circuitos de alimentación, tanto en las áreas de baja como de alta presión. Debe ser lo suficientemente alta para satisfacer las necesidades de lubricación de los sistemas de inyección, especialmente en las bombas que cumplen esta función. En la mayoría de las aplicaciones, las bombas de alta presión y los inyectores se lubrican y refrigeran con el mismo combustible. Una baja viscosidad del gasóleo genera desgastes por fricción en componentes del conjunto de generación de baja y alta presión de un sistema de combustible.

En torno al proceso de la combustión, la viscosidad del combustible afecta el desarrollo de esta; ya que un combustible con alta viscosidad genera una baja pulverización y una distancia de alcance larga. Este proceso da como resultado el aumento de la opacidad, puesto que, un escenario óptimo busca lograr una alta pulverización y una distancia de alcance corta; tal es el caso de los sistemas de inyección del tipo riel común que en la actualidad trabaja en rangos de 1800 a 2500 bares. En otras palabras, una alta viscosidad genera un grado de atomización bajo, desencadenando dilución del aceite, formación de carbón y lacas que afectan la operatividad de los inyectores.

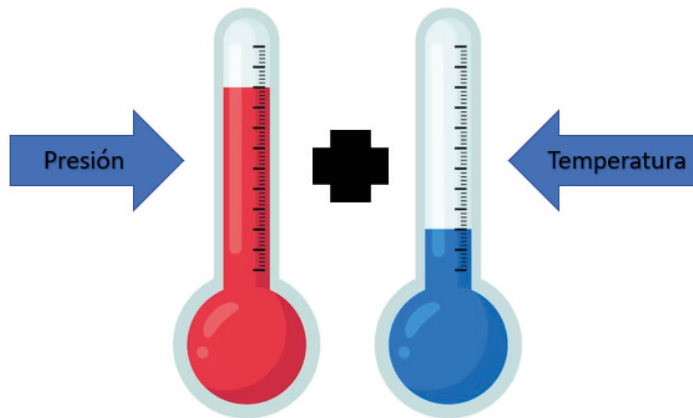


Figura 14. Variables a tener en cuenta para la Viscosidad. Elaborado por el autor y adaptado de freepik

Así las cosas, la viscosidad se ve afectada por las condiciones de presión y temperatura dadas en la cámara de combustión, así como de la relación de mezcla de combustible vaporizado y aire que se encuentra dentro de los límites de inflamabilidad. De tal modo que varía inversamente a su volatilidad, siendo más segura su manipulación y almacenamiento. Una característica asociada a la viscosidad es la resistencia a la auto inflamación de un combustible (número de cetano) (Fieser, 1985), esta se relaciona en torno a cuanto mayor es el número de cetano existe más afectación en el retraso del encendido. Dicho en otras palabras: si este se disminuye, de igual forma el ruido del motor se hace más suave. Cuando un motor funciona de forma suave se debe a una inflamación rápida y completa del combustible inyectado en condiciones del aire a alta presión y temperatura dentro de la cámara de combustión. De lo anterior se deriva la regulación del número de cetano en algunos países, por ejemplo, Argentina (cincuenta), México (entre cuarenta y cinco y cuarenta y ocho), Brasil (cuarenta), y en Chile y Colombia (cuarenta y cinco) (González, 2015).

2.1.3 Volatilidad

La volatilidad se relaciona con el consumo de combustible, la temperatura de los gases de escape y la opacidad, y esta se entiende como la celeridad con la cual un líquido pasa del estado líquido al de vapor. (Dietsche & Klingebiel, 2005), siendo esta menor en el diésel que en la gasolina, ya que su temperatura de evaporación es de 200° Celsius aproximadamente. Un ejemplo práctico diario se refleja en aspectos como la reposta de combustible, ya que cambia según sea verano o invierno, lo cual es una invitación a no realizar dicha operación a medio día y a pleno sol. De esta forma, una baja volatilidad se manifiesta en bajas emisiones de monóxido de carbono e hidrocarburos.

2.1.4 Estabilidad

Este aspecto está ligado a dos consideraciones de impacto en las emisiones, uno es el envejecimiento o pérdida de estabilidad, lo cual se mide durante largos periodos de almacenamiento, llamada estabilidad a la oxidación. El comportamiento de la estabilidad a altas temperaturas y/o presión durante el funcionamiento del motor es denominada estabilidad térmica. Observado este como un indicador cuando el combustible está en un entorno de altas temperatura por un corto tiempo, la cual es una condición dada en los sistemas de inyección diésel controlados electrónicamente y de gran aplicación en la actualidad (León et al." 2009). Al mismo tiempo y en línea, la estabilidad implica la duración de los elementos de la bomba de la principal, ya sea una bomba de inyección o una bomba de alta, pues si no

se degrada al volver del depósito luego de ser retornado, garantiza ello que la lubricación y la refrigeración del sistema de inyección sean los apropiados y esto aporta a la vida útil del mismo.

2.1.5 Impurezas

Ligadas a parámetros de calidad, y relacionadas con la contaminación durante el proceso productivo o por la contaminación durante la cadena de distribución y/o almacenamiento final como se conserva en la figura 15 (Lapuerta & Hernández, 2012). En el combustible diésel se encuentran impurezas abrasivas de constitución sólida como se muestra en la Figura 16, generando desgastes en componentes de elevación de presión o roce con alta fricción. De igual forma se encuentra el agua, la cual nace a razón de la forma como se almacena o acumula dentro del motor. Esto unido a la facilidad del combustible diésel de atrapar moléculas de agua en su interior debido a sus propiedades físicas, es decir, la hidroscofia. En conjunto, todo lo anterior es la principal consecuencia de la corrosión de diversos elementos del sistema de inyección, así como de afectaciones al desarrollo correcto de la combustión, que finalmente incide en los límites de emisiones permitidas (García del Río, 2017).



Figura 15. Contaminación en el combustible diésel. Fondear

2.1.6 Poder calorífico

Este se expresa como el contenido energético de un combustible; es decir, la cantidad de energía calorífica que se obtendría al quemar un kg de combustible. El combustible diésel se encuentra entre 42.000 – 43.000KJ/kg, lo cual es igual (equivale) a decir que entre

más alta sea la proporción de hidrógeno en el combustible en relación con el oxígeno, es directamente proporcional la cantidad de calor que una determinada masa de combustible puede proveer a la combustión (Angiolani, 1960). Al mismo tiempo, esto permite saber la cantidad de energía que se suministra al motor y determinar el rendimiento con el que el motor transforma dicha energía en trabajo.

De aquí que esta condición va ligada al rendimiento del motor, es decir, contribuye a cumplir con las curvas de torque y potencia, y de manera directa con las emisiones dadas al medio ambiente. Teniendo en mente lo anterior, en la figura 16 se describe las características de un motor V6 diésel con turbo, el cual entrega su torque entre 1400 rpm y 3500 rpm y la potencia máxima entre 3500 a 4000 rpm. Para el cumplimiento de estos valores se usa un combustible de poder calorífico entre 10.7 kcal/g a 11 kcal/g.

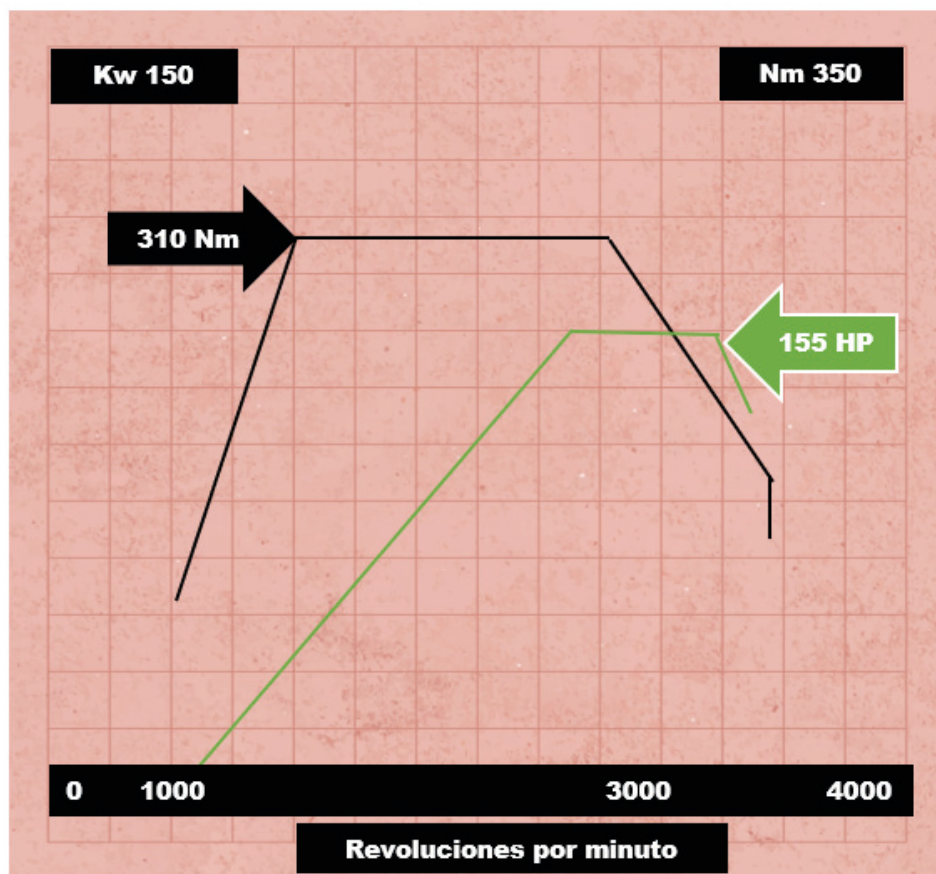


Figura 16. Curvas de torque y potencia. Camionchileno

2.2 Normas de calidad y de orden legal

El consumo de combustible está bajo normas de calidad y de orden legal. Las primeras además de ser vinculantes, delimitan los puntos máximos y mínimos en relación a las propiedades de los combustibles. Las segundas ejecutan las normas de calidad, presentan políticas de promoción, dan a conocer incentivos fiscales y establecen medidas en cuanto al consumo y producción (Lapuerta & Hernández, 2012).

2.2.1 Marco regulatorio colombiano

En este aspecto en Colombia se tienen cuatro tipos de combustible, cada uno soportado en una norma ASTM y EN (norma europea), de tal forma el primero es el diésel puro (ASTM D975 y EN-590), seguido por el denominado diésel renovado (ASTM D975 y EN 15940), en tercera casilla el biodiésel puro (ASTM D6751 y EN 14214) y finalmente las mezclas de biodiésel con rangos menores a 10% (EN 16734), entre 15% y 20% (ASTM D7467) y para cerrar entre 20% y 30%, (EN 16709). En esta misma intención, Colombia como país interesado en apoyar los objetivos de la ONU, da luz a documentos como el CONPES 3943 del 2019 de política para el mejoramiento de la calidad del aire. Se aprecia en la figura 17 que se contemplan las emisiones de las fuentes móviles donde aplican todos los vehículos diésel; además a este respecto, se proyectan metas a 2030 relacionadas con material particulado PM 2.5 y PM 10, ingreso de vehículos de cero y bajas emisiones y sistemas de transporte masivo operando con vehículos eléctricos y dedicados a gas natural (Departamento nacional de planeación, 2018).



Figura 17. Calidad del aire. Adaptado de Departamento nacional de planeación (2018)

Como documento complementario y que afirma la intención y compromiso del gobierno está el CONPES 4075 política de transición energética (Departamento nacional de planeación, 2018), donde se resalta que la transición hacia fuentes de energía más sostenibles es crucial para el desarrollo económico sostenible, el fortalecimiento de la seguridad energética y la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero, como se muestra en la ilustración 19. Esto ayuda a mitigar los impactos del cambio climático y a proteger la salud de la población.



Figura 18. Gases de efecto invernadero. Obtenido y adaptado de El Tiempo. freepik

En lo que atañe con el combustible, dicho documento resalta el compromiso del gobierno nacional. Un ejemplo de ello es el uso de movilidad eléctrica, debido a que el sector de los combustibles es uno de los sectores que más genera emisiones. Actualmente la Sociedad depende económica y energéticamente del carbono e hidrocarburos, pero se debe hacer una transición hacia las energías renovables como la energía eólica, solar y geotérmica. De esta manera se plantea un sistema energético de bajas emisiones GEI para disminuir las afectaciones climáticas, apoyados en lineamientos gubernamentales para el ascenso tecnológico en diferentes modos de transporte.

En este mismo orden de ideas y entendiendo el protagonismo del combustible como aportante de los GEI, se encuentran leyes, artículos y reglamentos con relación a:

- El uso de biocombustibles de origen animal o vegetal para motores diésel.
- Normas y criterios ambientales de calidad en el uso de los biocombustibles.
- Especificaciones de calidad en materia ambiental y técnica de los combustibles tanto nacionales como importados
- Porcentaje de la mezcla de los biocombustibles dentro de la mezcla de combustibles líquidos.
- Criterios ambientales de calidad de los combustibles líquidos usados en los motores de combustión interna y usados en vehículos automotores.
- Requisitos de calidad de los combustibles diésel, los biocombustibles y sus mezclas.
- Nivel de contenido máximo de cincuenta partes por millón ppm en masa de azufre.

En Colombia, los aspectos nombrados son importantes tenerlos en cuenta ya que están vinculados al combustible usado en motores diésel. Inicialmente, la reducción de emisiones contaminantes va en línea con el control en el aumento del número de cetano, la reducción del contenido de azufre y el control de temperatura T95. Así mismo, la demanda nacional del combustible diésel debe ser atendida con importaciones. También se considera la producción de lo que se puede considerar biocombustibles para motores diésel como los hidrocarburos sintéticos o mezclas a partir de biomasa. Se denomina Bio-diésel renovable al biocombustible sintético a partir de la transformación de los aceites de origen vegetal o animal basados en hidrotratamiento e isomerización (Ministerio de Minas y Energía; Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2021).

Sobre la base del marco regulatorio en Colombia, se suma la política de calidad del aire que involucra a los combustibles y biocombustibles comercializados en el país y los parámetros de calidad, visibilizando una considerable reducción del contenido máximo de azufre presente en el combustible diésel. A su vez se debe tener en cuenta:

- Parámetros de calidad de los biocombustibles para uso en motores diésel.
- Parámetros de calidad del combustible diésel ACPM y sus metas.

3. SOBREALIMENTACIÓN DE AIRE

3.1 Pilares Tecnológicos



Figura 19. Motor Caterpillar Biturbo. My Little salesman.

Los conceptos base para la sobrealimentación en un motor diésel como el que se muestra en la figura 19, el cual usa dos turbos del mismo tamaño y se denomina twin turbo, se deben tener en cuenta dos características del aire que se ven afectadas por la altitud, siendo estas la densidad y la presión. Como producto de lo dicho, al reducirse la densidad del aire existe menos cantidad de oxígeno incidiendo en el torque y la potencia del motor, por lo tanto, para un rendimiento óptimo un motor requiere el ingreso de aire frío, seco y con presión. Para que el rendimiento del motor se incremente, además del aumento de la densidad y presión de aire, se debe incrementar la cantidad de combustible, para tener un aumento lineal de la potencia (Payri & Serrano, 2011). Asimismo, el aire húmedo contiene menos oxígeno que el aire seco, lo que representa otra variable a considerar para el ren-

dimiento del motor. Esto puede impactar la potencia, el torque y las emisiones. A continuación, se presentan algunas de las consecuencias de una insuficiencia en el flujo de aire.

Restricción de aire en la entrada en el sistema de admisión de aire: Dado que, en la mayoría de casos, por el estado del filtro de aire en cuanto a su flujo de aire, también depende del escenario donde se desempeñe el motor, lo cual es muy asociado con la aplicación. De acuerdo a lo anterior se presenta el daño en mangueras que se contraen por deterioro a causa de las temperaturas de funcionamiento o que no tiene refuerzo interno en alambre.

Caída de la presión de carga del turbo: Una variable que depende del flujo de los gases de escape, es decir, que involucra ajustes y hermeticidad, en cuanto ajustes los torques del múltiple de admisión y el estado estructural del mismo, ya que cualquier fuga de gases de escape no permite alcanzar las máximas revoluciones del eje turbina. En cuanto a hermeticidad se ve desde la admisión de aire, el intercooler, mangueras y conexiones, ambas variables deben estar equilibradas para que la presión de carga del turbo este dentro del rango y el rendimiento, así como las emisiones y el consumo de combustible estén dentro de parámetros prometidos por el fabricante.

En la figura 20 se aprecia una propuesta adaptada de la casa Cummins con respecto al procedimiento en cuanto al análisis de falla del turbo, donde sobresale el proceso de implementación de mejora que se debe dar al conocer la causa raíz del problema partiendo del primer punto “definición del hecho observado”. Se inicia desde un análisis, pasando por hallazgos y causa raíz para generar una estrategia de mejora.



Figura 20. Pasos para diagnosticar fallo en un turbo compresor. Cummins

De las causas mostradas en la figura 21 se extrae que el Turboalimentador es un elemento mecánico de alto componente que aporta al consumo de aceite y está soportado entorno a desgastes, obstrucciones y escapes, partiendo de su principio de funcionamiento y condiciones térmicas y mecánicas propias. Al respecto se pueden contemplar los siguientes diagnósticos de falla:

- Aumento de la temperatura en el sistema de escape. Cuando se evidencia un cambio con la coloración del múltiple de escape y/o del caracol de escape del turbo, o sea, que se torna más claro, hay que asociarlo con el sistema de inyección, más específicamente con el momento de la inyección, en donde este debe estar muy adelantado o muy atrasado. También hay que atender a los límites mínimos y máximos dados por la información de fábrica relacionados con rutinas de mantenimiento en bancos de calibración.
- Combustiones con alto índice de emisiones y opacidad. En la figura 21 se dan a conocer los valores de opacidad promedio que rigen para el 2024 de acuerdo a la norma Euro VI, cuando estos valores rebasan los límites hay que dar la mirada desde el estado interno del motor, la calibración del sistema de inyección y el mantenimiento preventivo en relación a aceite de motor y filtros de aceite, combustible y aire.

Año/ Modelo	Opacidad %
1970 y anteriores	50
1971 – 1984	45
1985 – 1997	10
1998 y posterior	35

Figura 21. Límites de Opacidad. Adaptado de la Resolución 910 de 2008.

- Incremento del consumo de combustible. El turbo está ligado directamente al consumo de combustible, si no tiene una presión de carga en línea con las revoluciones donde se realiza la máxima entrega de combustible, no se llegará a la entrega de la potencia requerida. En otras palabras, a máxima entrega de combustible del sistema de inyección, máxima presión de carga del turbo.
- Pérdida de potencia. Este es un aspecto con diversas variables, pero en relación a la sobrealimentación de aire. En la actualidad se trabajan en algunas aplicaciones

de bajas cilindradas, lo que indica un menor peso del motor. Igualmente, los nuevos diseños incluyen más de un turbo, una versión desconocida como *dualboost* y la migración hacia los turbos eléctricos. Independientemente de los desarrollos, la pérdida de potencia está y estará ligada al correcto funcionamiento del sistema de sobrealimentación.

- Emisiones de humo blanco en el sistema de escape. Como el Turboalimentador tradicional requiere del uso de aceite para su lubricación y este proviene del motor, sumado a que hoy en día muchos motores tienen aplicaciones de biturbo o triturbo, lo anterior conlleva la posibilidad del consumo de aceite por daño o desgaste en los anillos de control de aceite ubicados en el turbo. Lo cual se evidencia en emisiones de humo blanco, aclarando que a veces también se asocian a cámaras de combustión frías o consumo de refrigerante.

Para concluir están las siguientes variables: 1) Limitar la vida útil de las válvulas de motor y pistones. 2) Incremento de los niveles de ruido del motor y 3) El aumento del consumo de aceite (Brady, 1999).

Como aspecto complementario de válida aclaración están los llamados enfriadores de aire del turbo. Estos intercambiadores de calor pueden usar líquido refrigerante o aire del medio ambiente para favorecer el control de la densidad del aire, cediendo el calor a la atmósfera. De esta forma, al comprimir el aire se incrementa la temperatura, llegando a rangos



Figura 22. Pistones con cámara de inyección en la corona e inyección directa. Mable.

entre 100°C y 200°C de conformidad con la temperatura ambiente y la relación de compresión que pueda tener el compresor. Sobre la base de lo anterior, las temperaturas del aire tienen incidencia en la combustión del motor diésel, la cual ocurre en la segunda etapa del

ciclo de 4 tiempos. Y claro está, también se incluye la dependencia de esta condición en elementos tecnológicos y de diseño como relación de compresión del motor, tipo de cámara de inyección, así como el diseño de la cámara en la corona del pistón independiente del material como se aprecia en la figura 22, y finalmente, el uso de intercambiadores de calor para enfriar el aire presurizado del turbo (Pardiñas & Feijoo, 2023).

Cuando las condiciones que rodean al aire son muy frías, las repercusiones se reflejan en la calidad de encendido, tomando para ello mayor tiempo. Ligado a ello está la geometría de la cámara de combustión la cual debe retener el calor generado en el ciclo de compresión, pues al llegar al punto muerto superior de la temperatura baja por la radiación, convección y conducción del aire comprimido, se transmite a la camisa del motor y posteriormente al sistema de refrigeración (Brady, 1999). Como resultado, el grado de ruido de la combustión después del arranque en frío viene dado por la temperatura del aire de admisión y la calidad del combustible (número de cetano).

De lo anterior se derivan síntomas como demora en el encendido, humo blanco en el arranque, presiones máximas en el cilindro incrementadas y dilución del combustible en el aceite. En el caso contrario, cuando el aire es muy caliente, la balanza se inclina hacia una pérdida de densidad del aire, lo cual en términos de porcentaje está alrededor de 1.5 %. En la figura 23 se muestra el ingreso de aire frío del medio ambiente, luego es presurizado para ir al enfriador y posteriormente al ocurrir la combustión los gases salen al medio ambiente por el múltiple de escape.

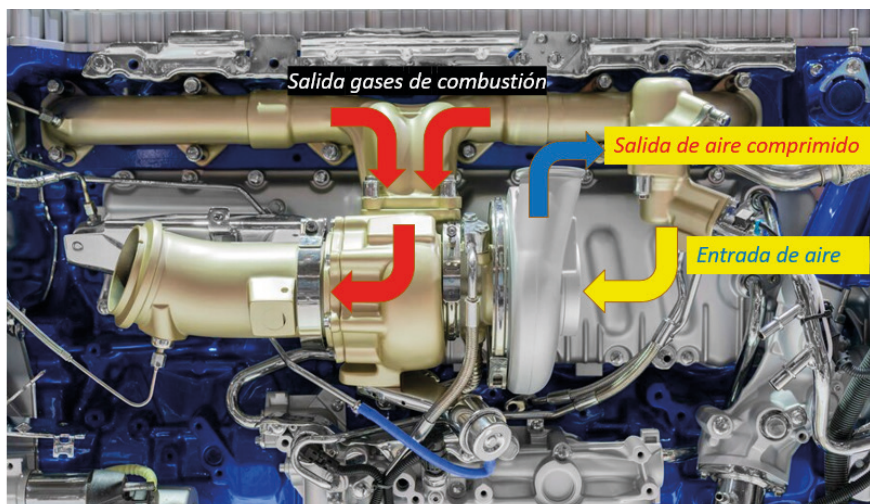


Figura 23. Flujo sistema de sobrealimentación de aire. Elaborado por el autor.

Como instancia final, mejorar la densidad del aire reduce la carga térmica del motor y desde otro punto de vista, pero muy bien relacionado, está que la sobrealimentación aumenta la potencia sin cambiar la cilindrada total, ni los diseños de construcción, ni las líneas de fabricación, lo que influye sobremanera los costos para los fabricantes (Hernández, 2021)

Por otro lado y siguiendo la construcción tecnológica, la incidencia en lo que respecta a combustión, rendimiento y emisiones parte del aumento de la densidad, lo cual aporta significativamente beneficios. En cuanto al rendimiento, al aumentar la presión y la temperatura se reduce el retraso al encendido, por su parte las pérdidas mecánicas se mantienen constantes cuando se usa un compresor del tipo centrífugo y se aprovecha la energía cinética de los gases de escape. En el mismo orden de ideas, en cuanto a las emisiones, producto del aumento de temperatura del aire comprimido a pesar que este pasa por un intercambiador de calor, se intensifica la producción de NOx. De otra parte, existe una mejor formación de la mezcla minimiza la formación de partículas de hollín y al existir una reducción del tiempo de retraso es causal de aminorar el ruido de la combustión (Payri & Serrano, 2011).

3.2 Normas de calidad y de orden legal



Figura 24. Componentes compresor tipo centrífugo. Adaptado de The Daily Drive.

Un motor equipado con sistema de sobrealimentación puede dar más del 40% de potencia en comparación con un motor de características iguales de aspiración natural. Para lograrlo, se debe hacer uso de un compresor, el cual se clasifica en dos grandes grupos: El centrífugo, como se aprecia en su despiece de componentes en la figura 24, cuya característica principal es su operación por medio de la energía cinética de los gases de escape. Así como el volumétrico, que se observa en la figura 25, donde se instalan dos compresores volumétricos en razón a ser un motor diésel de dos tiempos que para su operación usa la energía mecánica del motor y por ende se acopla a la distribución mecánica del mismo (Hernández, 2021).



Figura 25. Sistema de doble compresor tipo volumétrico. Elaborado por el autor.

Por no consumir energía del motor, el compresor centrífugo del tipo turbocompresor es el más utilizado en el diésel, puede girar en plena carga a velocidades por encima del 250.000 rpm, al trabajar con los gases de escape por el lado del eje turbina y por el lado de la rueda compresora al comprimir aire, las temperaturas que debe soportar están alrededor de 900° C. Es conveniente hablar aquí de la regulación de la presión de carga, la cual es imperativo limitar en línea con las condiciones de trabajo, solicitudes de carga y temperatura de aire, por nombrar algunas (Sánchez, 2009).

Sobre la base de la regulación de presión de carga se disponen de dos sistemas. El denominado waste gate, mostrado en la figura 26. el cual se fundamenta en desviar los gases provenientes del motor, para que momentáneamente no pasen por el eje turbina sino por un conducto anexo, de tal forma que se disminuyen las revoluciones del turbo.

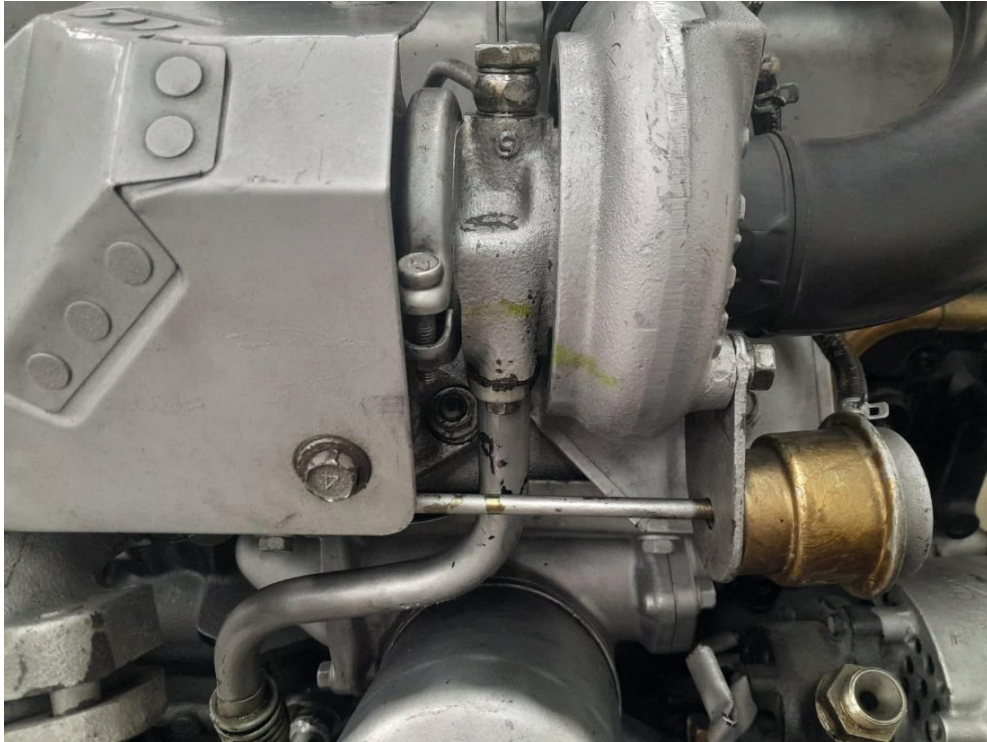


Figura 26. Sistema de regulación de carga waste gate. Elaborado por el autor.

En este mismo sentido, en la figura 27 se da a conocer el sistema de geometría variable VGT (por sus siglas en inglés) que se caracteriza por ser operado electrónicamente. La particularidad que lo resalta es el manejo de los gases de escape en el caracol destinado a esto; para ello usa un conjunto de álabes, los cuales, mediante el cambio del área de la sección libre, aumenta o disminuye el caudal de los gases incidiendo directamente en la velocidad del Turboalimentador. Esta forma de control de gases de escape tiene varias disposiciones, iniciando con los álabes fijados en una corona, los cuales rotan sobre su eje en un rango de 30° a 45°, conocida esta como control radial, y también se encuentra la disposición axial, donde varios álabes en posición fija obstruyen total o parcialmente el paso de los gases de escape.



Figura 27. Turbo con actuador electrónico para regulación de geometría variable. Elaborado por el autor.

Al respecto del control de estos dispositivos se presentan diversos tipos. Por un lado, está el control por medio de presión contra un diafragma en unión con un resorte; de este se puede ver el control con presión positiva y/o presión negativa (vacío). Por otro lado, está en el control electrónico por medio de una electroválvula que ha desplazado el uso de magnitudes directas para conseguir una respuesta más rápida y fiel, dando redites al desempeño de los motores diésel equipados con turbo (Hernández, 2021).

3.2 Intercambiadores de calor para aire de carga del turbo

Para el diésel, una temperatura ideal del aire está entre 30 a 40°C en función de la región y/o estación donde se encuentre. De sobrepasar dicho rango máximo en más de 10°C daría como resultado una pérdida de potencia de 7.5 kW. Es decir, a mayor temperatura ambiental, directamente proporcional es la expansión del aire y como consecuencia, un descenso de la potencia.



Figura 28. Ubicación del intercambiador de calor tipo aire-aire. Elaborado por el autor.

Como dice Brady (1999):

Un motor puede perder entre el 0.15% y 0.7% de potencia por cilindro por cada 6°C de aumento más allá de 32°C de aumento de la temperatura de admisión del aire arriba de 32°C (Pág. 573).

De lo anterior y desde varias décadas los intercambiadores se clasifican en varios tipos:

- De conformidad con la manera cómo transfieren calor del aire del turbo, sea por líquido o por fluido.
- En función de la ubicación con respecto al Turboalimentador.

En primera instancia está el intercambiador del tipo aire-aire o intercooler, como se aprecia en la figura 28. Este en algunas disposiciones se instala en la parte delantera del radiador del sistema de refrigeración. La función de este se evidencia en el aire de carga del turbo que va a ingresar al motor, pues este va a ser enfriado por el aire exterior, sea inducido por un ventilador o de forma natural aprovechando el desplazamiento del vehículo. Un segundo modelo es del tipo aire-refrigerante o watercooler mostrado en la figura 29, el cual aprovecha el líquido refrigerante del motor o de un sistema independiente para enfriar el aire de carga del turbo. Esta configuración actualmente utiliza un sistema diferente al sistema principal del motor para lograr los niveles esperados de enfriamiento (Hernández, 2021).



Figura 29. Intercambiador tipo aire - refrigerante. Elaborado por el autor.

4. SISTEMAS DE INYECCIÓN CON GESTIÓN ELECTRÓNICA PARA MOTOR DIÉSEL

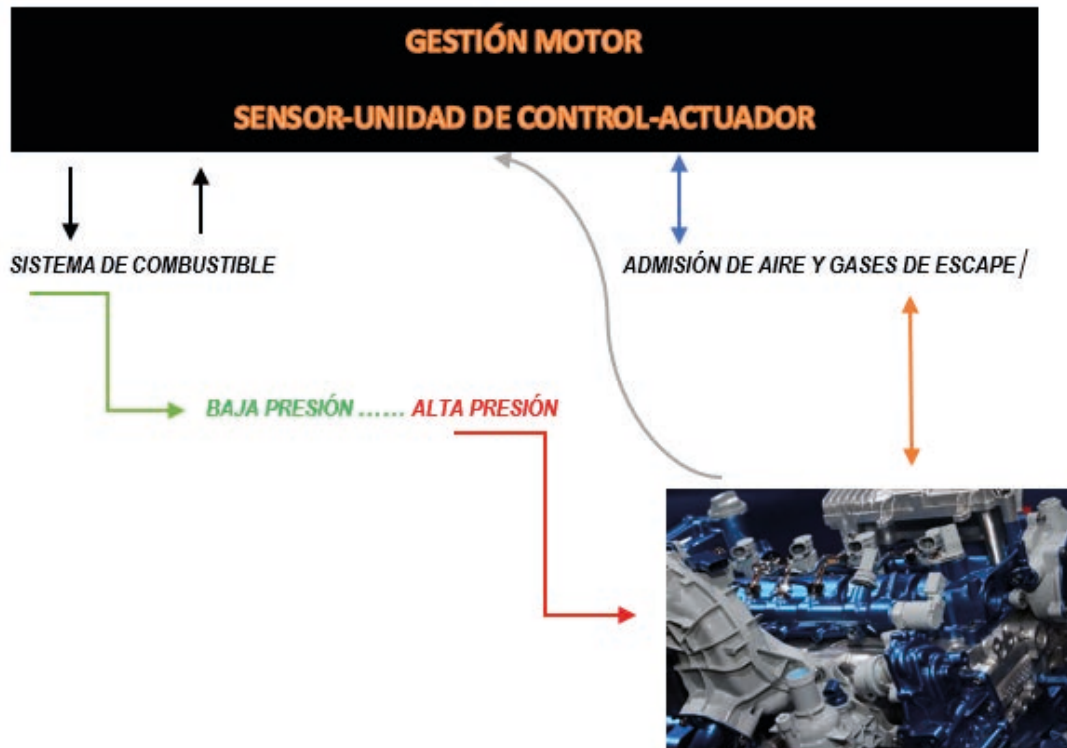


Figura 30. Componentes de la gestión electrónica en un motor diésel. Adaptado de Bosch.

El control de todas las variables y sistemas involucrados en la entrega de combustible diésel bajo las diversas condiciones, tales como arranque, ralentí, plena carga y corte, se soportan sobre la base de la dosificación y momento de entrega preciso, y en la actualidad se realizan mediante la gestión electrónica, como ejemplo se muestra la figura 30. Lo que quiere decir que se involucran los sensores para medir intervalos de variables físicas, las cuales son transformadas y procesadas para emitir órdenes por parte de la unidad de control hacia los actuadores (Pardiñas & Feijoo, 2018).

4.1 Sistema de combustible

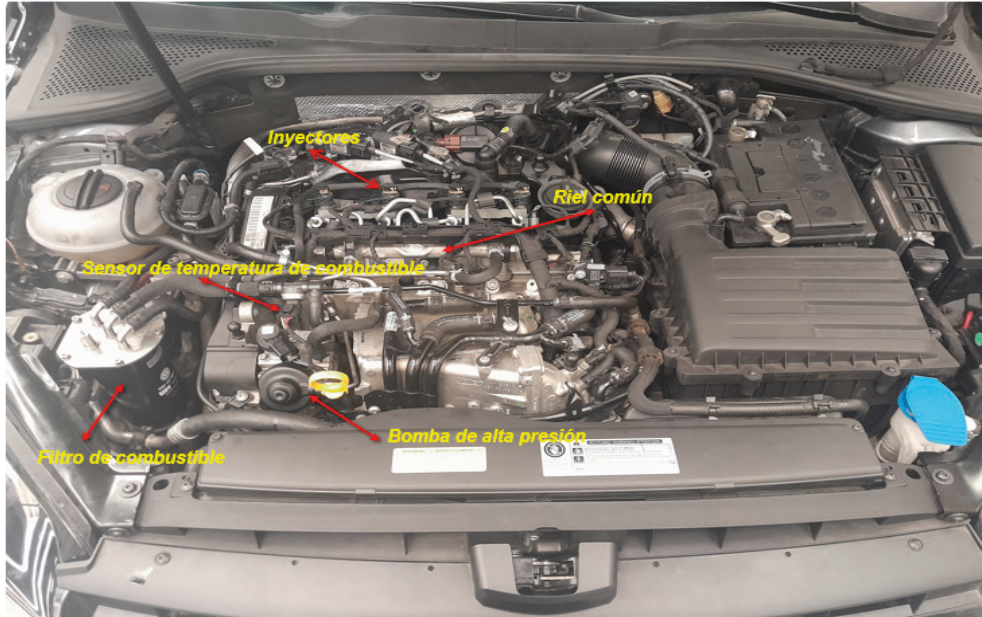


Figura 31. Sistema de combustible diésel. Elaborado por el autor.

En la figura 31, se muestran algunos componentes principales del sistema de combustible diésel. Partiendo de que el fluido en el sistema de combustión de un motor diésel es justamente el combustible, de manera que, en el momento, el uso de biodiesel sea generalizado por sobre el uso de diésel puro, en atención a emisiones GEI y generación de nuevos tipos de combustible que minimicen el consume de los derivados del petróleo. Al mismo tiempo, dicho combustible asume la función de lubricar y/o refrigerar todos los componentes. De esta forma, y en relación a lo expresado con anterioridad se establece una estructura de cuatro grupos que componen un sistema de combustible para motor diésel:

- Baja presión: integrado por los elementos de alimentación de combustible a baja presión (por debajo de 15 bar).
- Alta presión: conformado por los elementos generados de la alta presión (desde 1600 bar a 2500 bar).
- Retorno de combustible: constituido por los componentes que facilitan el retorno del sobrante al depósito (por debajo de 1 bar).

- Sistema de gestión electrónica: conformado por sensores, unidad de control, actuadores e interruptores (Hernández, 2021).

Los tres primeros grupos permiten toda la gestión del combustible apoyados y/o controlados por el último grupo, los cuales derivan las ocho funciones que cumplen un sistema de combustible en un motor diésel:

1. Almacena combustible, equipando un depósito de combustible en función de la autonomía que se requiera
2. Filtra combustible, con dos unidades funcionales; una para retención de contaminantes a nivel de micras denominado filtro, y la otra para separar el agua y partículas pesadas, presentes en el combustible
3. Traslada combustible desde dos circunstancias. Primero con el motor apagado se utiliza la bomba de cebado manual, y en segunda instancia, con el motor prendido está la función de la bomba de transferencia y/o alimentación
4. Dosifica combustible, con ello se logra la entrega de combustible en función de la carga y la operación del motor para la entrega de combustible.
5. Sincroniza la entrega de combustible, como el motor cambia de velocidad en función de las revoluciones de trabajo y ello se refleja en la velocidad del pistón, es relevante modificar el momento de la entrega de combustible en función del cambio de velocidad para no afectar el rendimiento del motor.
6. Aumenta la presión de combustible. Un combustible a alta presión ingresando a la cámara es uno de los aspectos necesarios para la combustión completa y un bajo nivel de emisiones, para ello se usa una bomba hidráulica tipo pistón, denominada cabezal hidráulico.
7. Distribuye el combustible en orden. El funcionamiento apropiado de un motor diésel obedece a un orden de encendido preestablecido, lo cual obliga a realizar la inyección de combustible en atención a este.
8. Interrumpe el paso de combustible. Finalmente, un motor diésel se pone en marcha y se apaga por el aporte de combustible, para ello se equipa un dispositivo de naturaleza eléctrica o electrónica.

En la actualidad se conocen dos diseños tecnológicos en cuanto a los sistemas de inyección: el sistema de riel común y el sistema de unidad inyectora. Puntualmente, este último se encuentra en el grupo de alta presión, es decir el sistema de combustible contiene al sistema de inyección. Cada diseño cumple con las funciones nombradas con anterioridad, ya sea de forma mecánica, electromecánica o electrónica. Aunque los sistemas de inyección han evolucionado, el cambio está en el control y la rapidez en la respuesta para mejorar el rendimiento, las emisiones y el consumo de combustible.

4.1.1 Sistema de inyección de riel común

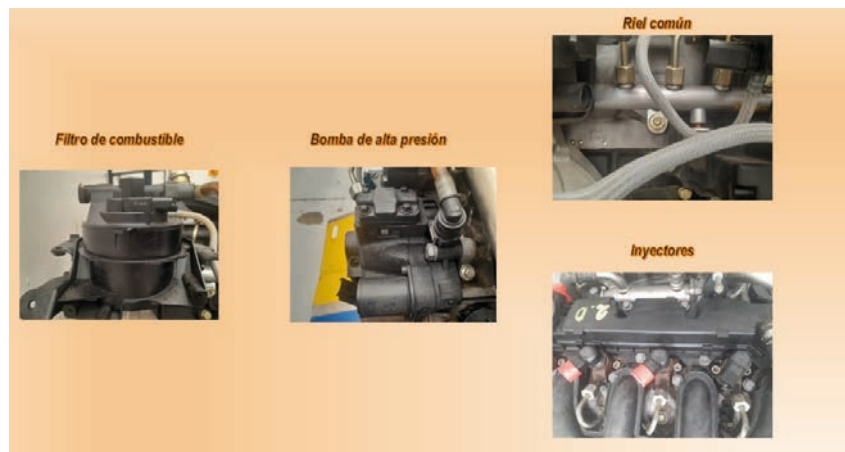


Figura 32. Sistema de inyección HDI. Elaborado por el autor.

El sistema riel común, como el que se da conocer en la figura 32, es una de las mejores opciones en lo que se refiere a los sistemas de inyección controlados electrónicamente, dando respuesta a las exigencias de normatividad en lo que concierne a límites de emisiones, conducción agradable, economía y fiabilidad (Automóviles Citroën de España, 2013). El sistema inicia de un depósito de combustible cuyo material utilizado normalmente es uno que no sea susceptible al óxido y humedad. Pasa luego al sistema de filtración que se encarga de decantar el agua presente en el combustible, calentar el combustible en épocas de invierno y obviamente retener partículas inferiores a 20 micras. Seguido a esto, se equipa una bomba de alta presión con una válvula de descarga y una bomba de alimentación, la cual finalmente, se encarga de enviar combustible al riel de inyectores donde es almacenado; como solo genera alta presión, esta bomba no requiere un calado en la distribución del motor. Su configuración puede ser mono émbolo o multi émbolo de acuerdo al diseño requerido, así como su configuración puede ser radial o lineal (Hernández, 2021).

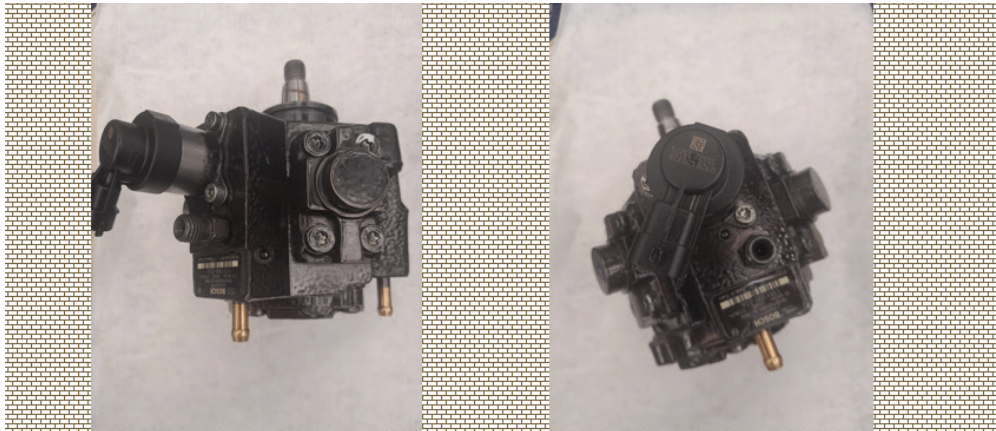


Figura 33. Bomba de alta presión para sistema riel común. Elaborado por el autor.

De esta forma, la bomba de alimentación va fijada a la bomba de alta presión mostrada en la figura 33, y es la encargada de trasladar el combustible desde el depósito hasta la bomba de alta presión. Esta bomba trabaja a succión entre 0.5 y 1 bar, con una presión de salida entre 4,5 y 6 bar. Se hace relevante aclarar que tanto la bomba de alta presión, como la bomba de alimentación son movidas por la distribución mecánica del motor y de igual manera ambas son lubricadas y refrigeradas por el mismo combustible. En la misma línea, se encuentra la rampa de inyección de alta presión o riel común evidenciado en la figura 34, de esta se deriva el almacenamiento de combustible a alta presión, a su vez, amortigua las pulsaciones nacidas del trabajo de la bomba de alta y conecta los elementos de alta presión.



Figura 34. Riel de inyección de alta presión. Elaborado por el autor.

Finalmente, están las líneas de alta presión y los inyectores. Las primeras están sometidas a presiones superiores de 1000 bar, que garantizan hermeticidad y transferencia rápida de combustible al inyector como el puesto en la figura 35. Por otro lado, los inyectores son controlados electrónicamente mediante electroválvula o válvula piezoeléctrica; de esta forma, el uso del control electrónico en el inyector permite condiciones de preinyección, inyección principal y post inyección. Como lo anterior se controla sobre la base de la cantidad de combustible inyectada, los parámetros a tener en cuenta son: duración de la señal para determinar la cantidad, velocidad de actuación del inyector y caudal hidráulico del inyector que se relaciona con el número y el diámetro de los ta-ladros de pulverización (Automóviles Citroën de España, 2013).



Figura 35. Inyector controlado electrónicamente para motor diésel. Elaborado por el autor.

4.2.2 Sistema de inyección unidad - inyector

Este constituye un bastión para el ahorro de combustible y la disminución de emisiones producto de la combustión. Es de estructura compacta y liviana, logrando una presión de inyección de hasta 2400 bar. El diseño es de una unidad por cilindro de motor como el puesto en evidencia en la figura 36. Además, este puede ser operado por una leva adicional colocada en el eje de levas del motor (PLD o PDE); sin embargo, también puede usar presión hidráulica, usando el mismo aceite del motor (HEUI). Así mismo, las galeras del sistema de baja presión están maquinadas en la culata y no usan lineal de alta presión en el diseño HEUI y PDE. Todos los formatos equipan un control electrónico dando flexibilidad en el desarrollo de los ciclos de preinyección, inyección principal y post inyección, donde el control se hace mediante válvula electromagnética y en la actualidad con válvula piezoeléctrica, que brinda características de rapidez y control superiores (Hernández, 2021).



Figura 36. Unidades inyectoras. Elaborado por el autor.

Esta configuración se compone de tres elementos principales: una válvula electrónica de control, un émbolo de bombeo de alta presión y una tobera. El principio de operación inicia con el cierre de la válvula electrónica de control, lo cual hace que el combustible que ha ingresado a la unidad quede atrapado en la cámara de alta presión, y así empiece a ser presurizado y enviado hacia la tobera, para que ingrese a la cámara de combustión. Cada uno de los parámetros preponderantes para que la unidad funcione de manera apropiada (dosificación de combustible, regulación y presión máxima de inyección) son determinantes para el control de emisiones y el rendimiento del motor (Delphi Diesel Systems, 2005).

5. PROCESO DE LA COMBUSTIÓN EN MOTOR DIÉSEL



Figura 37. Cámara de combustión de inyección directa. Komatsu.

Algunos aspectos a considerar para entender el proceso de la combustión están relacionados con la presión de compresión en la fase de compresión, la cual está alrededor de 30 a 50 bar en motores de aspiración natural y de 80 a 110 bar en motores sobrealimentados; relacionado así con la temperatura promedio entre 700 a 900°C. En consonancia con el tiempo (Robert Bosch GmbH), son hasta dos milisegundos para el autoencendido en un motor diésel, lo cual facilita la combustión.

Adicionalmente la evaporación y mezcla se desarrollan dentro del cilindro en las proximidades del punto muerto superior en la carrera de compresión. Hoy por hoy se utiliza en todos los motores diésel con gestión electrónica el diseño de cámara directa dado a conocer en la figura 37. Esto se refiere a un aporte de combustible directamente en el cilindro, más específicamente en la cámara de combustión ubicada en la corona del pistón.

Al respecto de esta cámara, se puede decir que utiliza un inyector con tobera de múltiples orificios a una presión superior a 2000 bar, repartido y atomizado de manera pertinente con el fin de garantizar la formación de la mezcla con el aire. Retomando estas ideas, está el movimiento de rotación alrededor del eje del cilindro llamado swirl o turbulencia espiroidal mostrado en la figura 38. Sumado al encerramiento del aire en la cavidad del pistón cuando está en compresión, denominado squish o diminutos remolinos dados por geometrías determinadas en la corona del pistón mostrado en la figura 39. Es aquí donde se generan las condiciones de velocidad y turbulencia para apoyar la realización de la combustión.

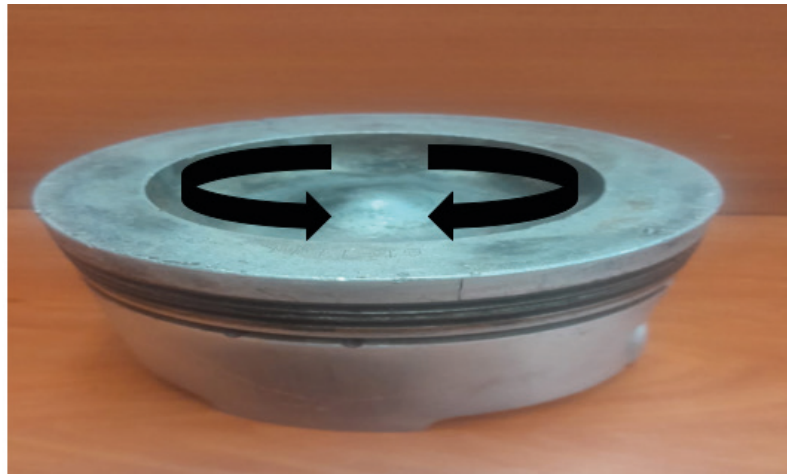


Figura 38. Movimiento del aire en cámara Swirl. Elaborado por el autor.

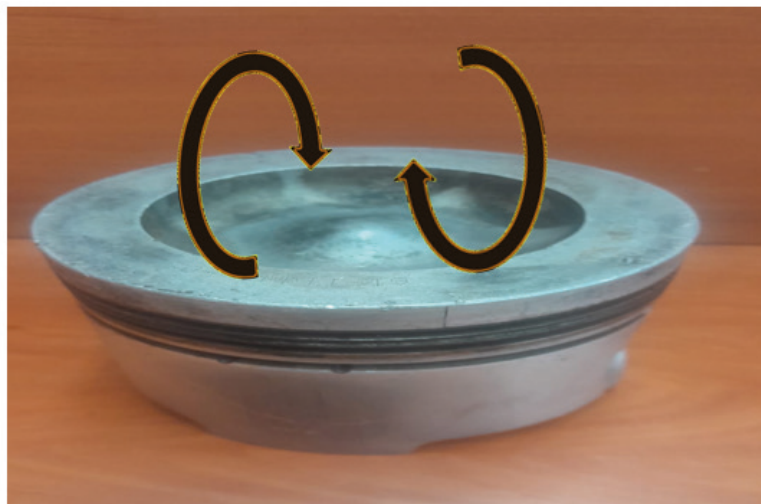


Figura 39. Movimiento del aire en la cámara de combustión Squish. Elaborado por el autor.

5.1 Retardo de encendido

Esta fase de la combustión está demarcada por el tiempo en que emplean las partículas de combustible para calentarse, vaporizarse e iniciar la combustión (Fygueroa & Araque, 2005). La calidad del combustible, en relación con el índice de cetano y la velocidad del motor, propicia una mezcla más rápida del aire, además, está asociada a la turbulencia generada por la arquitectura de la cámara de combustión y la relación de compresión; de esta manera, si esta es alta, el calor generado en la compresión calienta más el aire. Estos son factores que inciden en el retardo de encendido, que en motores modernos de gestión electrónica tienen una duración inferior a un milisegundo (Lichty, 1967)

5.2 Elevación de presión o combustión rápida

La elevación de presión o combustión rápida es un fenómeno que ocurre durante la fase de combustión en un motor de combustión interna. Durante esta fase, la mezcla de aire y combustible se quema y libera una gran cantidad de energía. La elevación de presión se produce cuando esta liberación de energía es muy rápida y la presión dentro de la cámara de combustión aumenta bruscamente. En un motor de combustión interna, la elevación de presión (Álvarez et al., 2005) se desarrolla en varias etapas, como se muestra a continuación en la figura 40:

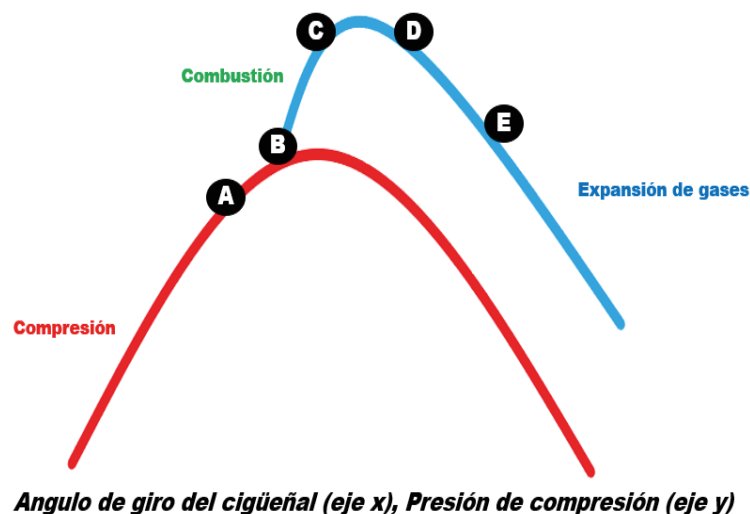


Figura 40. Fase de la combustión del motor diésel. Ortiz (2017)

En el punto A se da el comienzo de la inyección, y llegando al punto B ocurre el encendido e inflamación, esto dentro de la compresión. Paso seguido desde el punto B hasta el punto C ocurre la combustión, cerca del punto muerto superior. Luego la inyección finaliza en el punto D y finalmente en el punto E acaba la combustión, dando paso a la expansión. Lo anterior con fases de encendido a razón de alta temperatura y presión, liberación de energía y aumento de presión en la cámara de combustión debido a la alta relación de compresión (Desantes & Molina, 2011).

Para el caso de un motor de encendido por compresión o motor diésel, la elevación de presión es más controlada debido a la alta relación de compresión, que permite una combustión más completa y eficiente. La elevación de presión en un motor diésel puede ser beneficiosa para la eficiencia del motor y el rendimiento del vehículo. En otras palabras, la elevación de presión o combustión rápida se produce durante la fase de combustión en un motor de combustión interna, cuando la liberación de energía es muy rápida y la presión dentro de la cámara de combustión aumenta bruscamente. Este fenómeno puede ser beneficioso o perjudicial, dependiendo del tipo de motor y de cómo se maneje la combustión (Heywood, 2011).

5.3 Combustión lenta o combustión controlada

Así las cosas, para lo anterior se debe tener en cuenta la temperatura; si es alta, la velocidad de la combustión es mayor. Se tiene en cuenta la presión de la mezcla dada por la presión de inyección y la presión de compresión, lo cual implica que entre mayor sean éstas, mayor es la proporción de la llama y la geometría de la cámara de combustión, estos tres aspectos son determinantes para la velocidad de la combustión (Pardiñas & Feijoo, 2018).

La combustión lenta, combustión controlada o también conocida como combustión por difusión es un proceso de ignición que ocurre en la fase final de la combustión en un motor diésel. En esta fase lenta, el combustible diésel restante que no se quemó durante la combustión inicial se quema gradualmente y de manera controlada a medida que se mezcla con el aire en la cámara de combustión. Después de que la combustión inicial ocurre en la fase de combustión rápida, el calor y la energía liberados durante esta fase aumentan la temperatura de la mezcla de aire y combustible diésel restante en la cámara de combustión. La alta temperatura y la presión permiten que los componentes de hidrocarburos en el combustible diésel se descompongan y se quemen gradualmente, produciendo una combustión lenta y controlada. Este proceso produce una mayor eficiencia y reduce las emisiones de escape (Heywood, 2011).

La combustión lenta en un motor diésel es un proceso altamente controlado y optimizado mediante la inyección de combustible, la mezcla de aire y combustible, además de la forma de la cámara de combustión y el momento de la inyección de combustible. Todo esto se hace para controlar la velocidad y la cantidad de la combustión lenta y para maximizar la eficiencia del motor y reducir las emisiones de escape (Lichty, 1967).

5.4 Formación de la mezcla

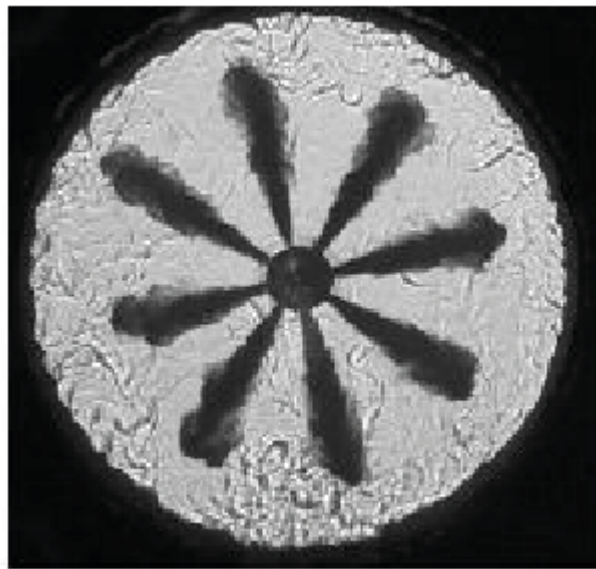


Figura 41. Formación de la mezcla en un motor diésel de inyección directa. Research

La formación de la mezcla mostrada en la figura 41, en un motor de combustión interna, incluyendo un motor diésel, se refiere al proceso de mezclar el combustible y el aire antes de la combustión. En un motor diésel, la formación de la mezcla es un proceso crucial para lograr una combustión eficiente y reducir las emisiones de escape (Fygueroa & Araque, 2005). La formación de la mezcla en un motor de este tipo se produce en tres etapas principales:

1. Entrada de aire: el aire se aspira a través del filtro de aire y se comprime en la cámara de combustión. La cantidad de aire que entra en la cámara de combustión está determinada por el tamaño del motor y la velocidad a la que se está operando.

2. Inyección de combustible: el combustible diésel se inyecta en la cámara de combustión a alta presión mediante un inyector de combustible. El momento y la cantidad de combustible que se inyecta están controlados por el sistema de inyección de combustible.
3. Mezcla de aire y combustible: el combustible diésel se mezcla con el aire en la cámara de combustión para formar una mezcla de combustible y aire. Esta mezcla se vaporiza y se distribuye uniformemente en la cámara de combustión para permitir una combustión eficiente.

El proceso de formación de la mezcla en un motor diésel es crítico para lograr una combustión eficiente y reducir las emisiones de escape. La cantidad y el momento de la inyección de combustible, la velocidad del aire y la forma de la cámara de combustión son factores importantes que influyen en la formación de la mezcla y deben ser cuidadosamente controlados para obtener la mejor eficiencia y reducir las emisiones (Pulkrabek, 2004).

6. RETOS PARA EL CONTROL DE EMISIONES CONTAMINANTES

6.1 Marco legal para el control de emisiones

Toda nación en sus deberes y sus derechos contempla diferentes legislaciones para el cuidado del medio ambiente, ya que en ello se vinculan los seres vivos, los presupuestos en salud, la renovación del parque automotor y el control en ellos límites de contaminación.

6.1.1 Antecedentes, normatividad y legislación

El acuerdo de París fue propuesto durante la XXI conferencia sobre el cambio climático (COP 21) entre los años 2015 y 2016 se adoptó y ratificó dicho acuerdo. En este magno evento 195 países se tranzaron en grandes deliberaciones, llegando a un acuerdo de voluntades y esfuerzos por el bien común para atenuar el calentamiento global en 2°C teniendo como referente la era preindustrial. Al final se logró mirar en conjunto la generación de propuestas y las puestas en marcha de las mismas para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero a través de la mitigación, adaptación y resiliencia.

Así, Colombia como participante activo de este acuerdo ha tomado medidas en todos los niveles; en especial con la vista puesta en regular las emisiones vehiculares en los últimos años. Sin embargo, cada gobierno de turno sabe que es un esfuerzo constante y que debe ser vigilado para superar desafíos importantes en la implementación y aplicación efectiva de estas regulaciones (Naciones Unidas, 2023).

Frente a lo anterior, como muestra de voluntad colaborativa y como muestra de respaldo a la denominada acción por el clima en 2015, Colombia adoptó la norma técnica colombiana NTC 6125, que establece límites máximos de emisiones de escape para vehículos nuevos y usados. Esta norma se basa en los estándares internacionales de la Organización de las Naciones Unidas (ONU) y la Unión Europea. Además, en 2018 Colombia adoptó la norma EURO VI para camiones y buses, que establece límites aún más estrictos para las emisiones de escape. De ello se ha hecho visible en todo el país la renovación de la flota vehicular del

sistema integrado de transporte donde en su batería de buses troncales y zonales, existen motores de combustión interna a diésel y gas con normatividad Euro VI más aún los buses eléctricos ya en Bogotá están cerca a los 1500 rodando y aportando a la acción por el clima, más específicamente en la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero.

Por otro lado, y con una visión objetiva y de equidad y responsabilidad social desde la acera del propietario, existen aún un número de vehículos que, a pesar de estos esfuerzos regulatorios, y la implementación y la aplicación efectiva de estas regulaciones no cumplen con las solicitudes. Muchos vehículos en circulación en el país no cumplen con los estándares de emisiones, y la falta de inspecciones y controles efectivos significa que muchos vehículos siguen emitiendo más gases contaminantes de lo que deberían.

En Colombia, las emisiones de los motores diésel están reguladas por varias agencias gubernamentales, y hay varios documentos oficiales relacionados con el control de emisiones. Algunos de los más importantes se dan a conocer en la tabla 1:

Tabla 1. Documentos gubernamentales. Elaborado por el autor.

Denominación	Alcance
Ley 769 de 2002	El Código Nacional de Tránsito establece las normas para el control de emisiones de los vehículos en Colombia.
Resolución 910 de 2008	Esta resolución establece las normas de emisiones para vehículos nuevos y usados.
Resolución 3615 de 2019	Esta resolución establece los requisitos para la homologación de sistemas de control de emisiones de vehículos a motor.
Resolución 1055 de 2010	Esta resolución establece las especificaciones técnicas para la instalación y operación de equipos de medición y monitoreo de emisiones.
Decreto 1076 de 2015	Este decreto establece los estándares de emisiones para vehículos nuevos y usados, así como los procedimientos de inspección y certificación de emisiones.

Estos documentos gubernamentales son fundamentales para regular y controlar las emisiones de los vehículos en Colombia, y asegurar que los vehículos en circulación cumplan con los estándares ambientales establecidos por el gobierno.

Adicionalmente, a nivel internacional existen documentos y regulaciones relacionados con el control de emisiones del motor diésel. Algunos de los más relevantes se presentan en la tabla 2:

Tabla 2. Documentos internacionales sobre emisiones. Elaborado por el autor.

Denominación	Alcance
Normas Euro	La Unión Europea establece las normas Euro de emisiones para vehículos nuevos. Estas normas establecen límites para las emisiones de gases de escape de vehículos diésel y gasolina, incluyendo límites para el monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrógeno (NOx), partículas (PM) e hidrocarburos (HC).
Regulación de la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE. UU.	La EPA establece regulaciones de emisiones para los vehículos nuevos y motores diésel en los Estados Unidos. Estas regulaciones establecen límites para las emisiones de gases de escape, incluyendo límites para los NOx, PM y otros contaminantes.
Convenio de las Naciones Unidas sobre la contaminación del aire transfronteriza a larga distancia	Este convenio tiene como objetivo proteger la salud humana y el medio ambiente de los efectos adversos de la contaminación del aire transfronteriza. El convenio incluye disposiciones para reducir las emisiones de motores diésel.
Normas de la Organización Mundial de la Salud (OMS)	La OMS establece directrices sobre la calidad del aire para proteger la salud humana. Las directrices establecen límites para los contaminantes en el aire, incluyendo los emitidos por los motores diésel.

Estos documentos y regulaciones internacionales establecen normas y límites para las emisiones de los motores diésel y otros contaminantes, y son importantes para proteger la salud humana y el medio ambiente en todo el mundo.

Finalmente, en la tabla 3, se relacionan los *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)* de la ONU que tienen como objetivo promover un desarrollo sostenible en todo el mundo, y varios de ellos están directamente relacionados con el control de emisiones de motores de combustión y la protección del medio ambiente. Algunos de los objetivos relevantes con la contaminación y su regulación son:

Tabla 3. Objetivos de desarrollo sostenible. Organización de las Naciones Unidas (ONU).

Objetivo	Alcance
ODS 7: Energía asequible y no contaminante	Garantizar el acceso a una energía asequible, confiable, sostenible y moderna para todos. El control de las emisiones de los motores de combustión es fundamental para reducir la contaminación del aire y lograr este objetivo
ODS 11: Ciudades y comunidades sostenibles	Lograr ciudades y comunidades más seguras, resilientes y sostenibles, lo que incluye reducir la contaminación del aire y promover la movilidad sostenible
ODS 13: Acción por el clima	Tomar medidas urgentes para combatir el cambio climático y sus efectos, incluyendo la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero producidas por los motores de combustión
ODS 14: Vida submarina	Conservar y utilizar de manera sostenible los océanos, mares y recursos marinos para el desarrollo sostenible. La reducción de las emisiones de los motores de combustión es importante para prevenir la contaminación del agua y proteger la vida marina
ODS 15: Vida de ecosistemas terrestres	Proteger, restaurar y promover el uso sostenible de los ecosistemas terrestres, lo que incluye reducir la contaminación del aire y prevenir la degradación ambiental.

En pocas palabras, varios de los *Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS)* de la ONU están directamente relacionados con el control de emisiones de motores de combustión y la protección del medio ambiente, ya que son esenciales para lograr un desarrollo sostenible y proteger la salud humana y el medio ambiente.

6.1.2 Acciones en Bogotá para el mejoramiento de la calidad del aire y el control de emisiones

En Bogotá, el control de las emisiones de los motores diésel se ha llevado a cabo desde hace varios años, partiendo de la redacción de documentos para su posterior aprobación y ejecución. De ello se evidencian algunos hitos: en 2009 se implementó el programa de restricción vehicular denominado “Pico y Placa”, la cual restringe la circulación de vehículos de acuerdo con el último dígito de la placa, incluyendo los vehículos diésel. Más adelante en el año 2012, la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá comenzó a realizar inspecciones técnicas a los vehículos diésel para medir sus emisiones contaminantes y garantizar que cumplan con los estándares establecidos por la normativa ambiental. Así mismo, para el 2019 se implementó el programa “Bogotá a Cielo Abierto”, el cual restringe la circulación de vehículos pesados con motores diésel en determinadas zonas de la ciudad, como medida para reducir la contaminación del aire. Todo lo enunciado es una demostración de la actitud de los entes gubernamentales frente al control de emisiones de fuentes móviles, en especial del objetivo de este material y son los motores diésel para lograr mantener y/o mejorar la calidad del aire en la ciudad (Secretaría del Medio Ambiente, 2023).

Como complemento a lo que se viene mostrando se integra el Plan Aire 2023, en un contexto de integralidad para mejorar la calidad del aire, para ello se plantea reducir de manera significativa la contaminación del aire para el año 2023. El ente que construyó el documento y lideró la iniciativa fue la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, y se basa en un enfoque de 4 pilares: en primera instancia la reducción de emisiones enfocado a la renovación del parque automotor. En segunda instancia, el cambio de la cultura ciudadana promoviendo el uso de diferentes medios de transporte de índole grupal e individual. En tercera instancia, el monitoreo y seguimiento para tomar acciones y medir avances. Y en última instancia, la articulación y la coordinación de todas las organizaciones públicas y privadas.

Por otro lado, algunas de las medidas incluidas en el Plan Aire 2030 son: primero, la promoción del uso de transporte sostenible como caminar, andar en bicicleta y el uso del transporte público eléctrico, como una forma de reducir las emisiones de los motores de

combustión. Segundo, la modernización del sistema de transporte público para hacerlo más eficiente y reducir las emisiones de los vehículos. Tercero, la reducción de emisiones de la industria y los edificios, a través de la implementación de tecnologías más limpias y eficientes. Cuarto, la educación y concientización ciudadana, fomentando una cultura de ciudad que promueva la reducción de la contaminación del aire y la adopción de hábitos más sostenibles. Y por último quinto, la creación de una red de monitoreo de calidad del aire, para realizar un seguimiento y controlar la calidad de este dentro de la ciudad (Secretaría del Medio Ambiente, 2023).

De acuerdo al portal *bogotacomovamos.org* para el año 2022 en Bogotá había 2.400.000 vehículos, distribuidos de la siguiente forma: el 5% era transporte servicio público, el 2% equivalía a taxis, el 14% estaba constituido por camionetas, el 50% era automóviles y el 20% estaba conformado por motocicletas. De tal forma que, por cada tres habitantes, hay un vehículo a motor, y por cada motocicleta cuatro carros; tales cifras sin duda alguna van en crecimiento e implican generar actividades de control a todo nivel para aportar a la mejora de la calidad del aire. En tono con lo anterior, la Secretaría del Medio Ambiente, apoyado en su grupo de fuentes móviles, realiza labores de evaluación, control y seguimiento mediante diversos programas tales como los operativos de control en vía y el programa de Requerimientos Ambientales. Además, desde lo ambiental, las acciones de autorregulación y las revisiones de los sistemas del automóvil para garantizar el cumplimiento de los límites de emisiones establecidos para fuentes móviles en la capital (Secretaría del Medio Ambiente, 2023). Normalmente un plan de mejora del medio ambiente lleva intrínsecamente un objetivo y una misión, y para este caso la Secretaría de Medio Ambiente apunta que la normatividad sea vigilada, controlada y cumplida a través de operativos, y así ejercer por parte de las autoridades competentes los controles ambientales respectivamente.

Tabla 4. Operativos de control. Medio Ambiente (2023).

Operativo	Alcance
Atención a PQR'S	Atender las solicitudes de la comunidad o demás entidades, allegadas a través de derechos de petición, quejas, reclamos, solicitudes o peticiones en general; exponiendo casos de presunta contaminación ambiental derivadas de fuentes móviles.

<p>Operativos a vehículos de carga</p>	<p>Están enfocados al tipo de vehículos que circulan permanente o transitoriamente por las vías de la ciudad, los cuales se consideran grandes emisores de contaminación ambiental, estos vehículos pueden ser de servicio público o particular.</p> <p>Operativos a vehículos de carga: estos operativos están enfocados al tipo de vehículos que circulan permanente o transitoriamente por las vías de la ciudad, los cuales se consideran grandes emisores de contaminación ambiental. Estos vehículos pueden ser de servicio público o particular.</p>
<p>Operativos a motocicletas</p>	<p>Enfocados a verificar las condiciones de operación y el cumplimiento de los límites de emisiones establecidos en este tipo de vehículos.</p>
<p>Vehículos de transporte especial y/o escolares</p>	<p>Comprobar las condiciones técnico mecánicas y el cumplimiento en materia de emisiones, así como los requisitos de seguridad vial de los vehículos que prestan el servicio de transporte al área de turismo y escolar. Para esto se cuenta con el apoyo de la Secretaría Distrital de Movilidad a través del programa Ruta Pila.</p>
<p>Operativos a vehículos de transporte intermunicipal</p>	<p>Direccionados a la flota vehicular que circula transitoriamente por las principales vías de la ciudad. Su punto de control en ocasiones son los terminales de transporte y en las salidas del Distrito Capital.</p>

Para dar cierre a esta sesión se hace muy válido recordar el día “Sin carro” en Bogotá, el cual tiene su génesis en el año 2000 como una medida para reducir la contaminación del aire y fomentar el uso de medios de transporte alternativos al automóvil. Originalmente, se estableció como una jornada anual, que se celebra el primer jueves del mes de febrero; sin embargo, a partir del año 2019, se implementó una medida denominada ‘Día sin carro y sin moto’, que se realiza dos veces al año. En esta jornada, se restringe la circulación de vehículos particulares y motocicletas en la ciudad, con el objetivo de mejorar la calidad del aire y

fomentar la movilidad sostenible. Durante el Día sin carro y sin moto, se promueve el uso de medios de transporte alternativos como la bicicleta, el transporte público y la caminata, además de alternativas como el teletrabajo. La medida ha tenido resultados positivos en la reducción de la contaminación del aire y en la promoción de hábitos de transporte más sostenibles y amigables con el medio ambiente (Secretaría del Medio Ambiente, 2023).

6.2 Formación de contaminantes producto de la combustión

Un motor diésel propiamente tiene una reacción de combustión y/o termoquímica para generar torque y potencia. Inicialmente desde una visión teórica se toma como una combustión perfecta que da como resultado oxígeno y vapor de agua. Adicionalmente, se desprende de esta reacción una gran cantidad de energía por lo cual es una reacción exotérmica.

Ahora, en función de una combustión real, entendiendo que el aire tiene oxígeno, nitrógeno y gases raros, así como el combustible posee hidrógeno y carbono, esto da como resultado otros gases; mostrados en la siguiente tabla:

Tabla 5. Gases de la combustión de motor diésel. MasterD.

Gases			
Inofensivos	Contaminantes no tóxicos	Contaminantes tóxicos	Partículas en suspensión
No afectan al medio ambiente ni a los seres vivos	Contaminan al medio ambiente pero no son tóxicos	Contaminan al medio ambiente y son tóxicos	Afectan al medio ambiente y los seres vivos
Nitrógeno Oxígeno Vapor de agua Hidrógeno	Dióxido de carbono	Monóxido de carbono Hidrocarburos no quemados Óxidos de nitrógeno Dióxido de azufre	Se trata de corpúsculos sólidos (o también micro gotas) de tamaño muy pequeño que se encuentran dispersos en el aire.

6.2.1 Óxidos de nitrógeno

Su creación parte de condiciones reinantes en la cámara de combustión como lo son la temperatura y las revoluciones del motor por encima del 1500. Este es un componente de grave riesgo para la salud y con un alto porcentaje de nocividad para el medio ambiente. Se emplean varias técnicas para su reducción, un ejemplo de ellas es la reducción catalítica selectiva, acompañada de agentes reductores. Los catalizadores que tienen mejor eficiencia en este proceso son las zeolitas, la mordenita y la beta.

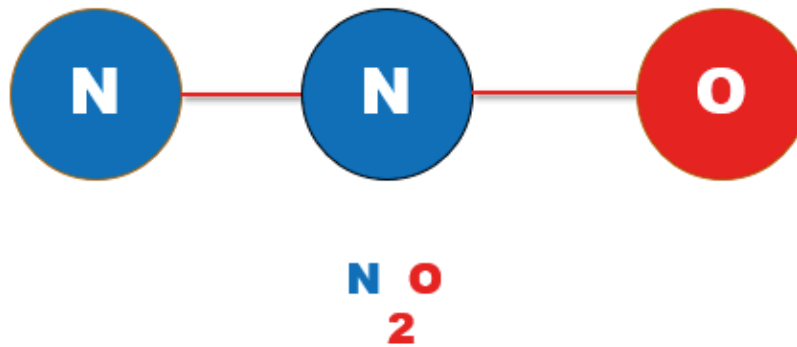


Figura 42 . Óxidos de nitrógeno. SVI Industrial.

6.2.2 Monóxido de carbono

El monóxido de carbono (CO) se forma como un subproducto de la combustión incompleta de cualquier material orgánico, incluyendo el combustible diésel. Durante la combustión diésel, el oxígeno se agrupa con el carbono en el combustible para producir dióxido de carbono (CO₂) y vapor de agua. No obstante, si no hay suficiente oxígeno disponible para completar la reacción, se produce monóxido de carbono en lugar de CO₂. Esto puede ocurrir si la mezcla aire-combustible no es adecuada o si hay una mala combustión debido a una falla en el motor o en el sistema de combustión. Para controlar la formación de CO en la combustión diésel, se pueden tomar varias medidas. Para empezar, el mantenimiento adecuado del motor y el sistema de combustión es fundamental para asegurar una combustión eficiente. Por otro lado, el uso de tecnologías avanzadas, como sistemas de inyección de combustible más precisos y sistemas de postratamiento de gases de escape, pueden ayudar a reducir las emisiones de CO.

La calidad del combustible diésel también es considerable, ya que un combustible de baja calidad puede producir mayores emisiones de CO (Dietsche & Klingebiel, 2005). El monóxido de carbono es un gas inodoro e incoloro que puede ser muy peligroso para la salud humana y el medio ambiente. De esta forma, cuando se inhala, el CO se une a la hemoglobina en la sangre y reduce la cantidad de oxígeno que puede transportar la sangre; las evidencias de envenenamiento por CO incluyen dolores de cabeza, náuseas, mareos y pérdida de conciencia. A su vez, la exposición prolongada al CO puede provocar daños persistentes en el sistema nervioso central y en otros órganos.

En definitiva, además de los riesgos para la salud humana, las emisiones de CO también tienen consecuencias ambientales. El CO contribuye a la formación de smog y la contaminación del aire, lo que puede tener efectos negativos en la calidad del aire, el clima y el medio ambiente en general (Arias et al., 2018).

6.2.3 Hidrocarburos

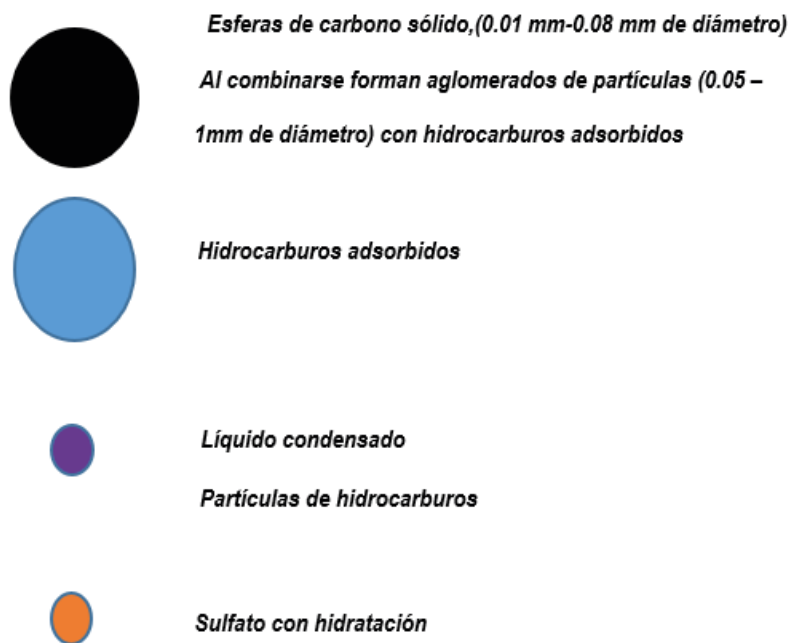


Figura 43. Estrategias para combatir la polución de los hidrocarburos. Sciencedirect

Los hidrocarburos presentes en el combustible diésel y en los productos de la combustión diésel se establecen a través del proceso de refinación del petróleo crudo. Durante este proceso, se separan los hidrocarburos del petróleo crudo en diferentes fracciones, incluyendo el diésel. Los hidrocarburos en el combustible diésel y en los productos de la combustión de este mismo pueden tener un impacto negativo en la salud humana y en el

medio ambiente (Pérez, 2011). En cuanto a la salud humana, los hidrocarburos pueden causar problemas respiratorios, como tos y dificultad para respirar, y pueden contribuir a la formación de smog y de partículas finas en el aire, lo que puede tener efectos negativos en la salud del corazón y de los pulmones. En el medio ambiente, los hidrocarburos pueden aportar a la contaminación del aire, el agua y el suelo, y pueden tener un impacto negativo en la vida silvestre. Además, los hidrocarburos también pueden contribuir al cambio climático (Rogel et al., 2019), ya que la combustión de diésel libera dióxido de carbono y otros gases de efecto invernadero a la atmósfera. Para controlar los niveles de hidrocarburos presentes en el combustible diésel y en los productos de la combustión diésel, se han implementado regulaciones ambientales y de calidad del aire que establecen límites para las emisiones de los vehículos y las emisiones industriales. Además, la investigación y el desarrollo de tecnologías de vehículos más limpios, como los vehículos eléctricos y los vehículos híbridos, están ayudando a reducir las emisiones de hidrocarburos.

6.2.4 Partículas en suspensión



Sulfato con hidratación

Figura 44. Partícula en suspensión y control. Sciencedirect.com

La combustión de diésel produce partículas en suspensión debido a la incompleta quema del combustible. Dichas partículas son pequeñas, pueden presentarse como partículas sólidas o líquidas, las cuales se encuentran en el aire y pueden ser inhaladas por los seres humanos y animales. Estas pueden ser tan pequeñas como 2.5 micrómetros (PM2.5) y pueden penetrar profundamente en los pulmones, causando daños a largo plazo a la salud. Las partículas se forman cuando el diésel se quema en presencia del oxígeno. A medida que se produce la combustión, los hidrocarburos y otros componentes del combustible diésel se descomponen en partículas más pequeñas (Robert Bosch GmbH). Estas partículas se condensan en el aire y se combinan con otros contaminantes del aire, como óxidos de nitrógeno y compuestos orgánicos volátiles, para formar partículas en suspensión. La formación de estas se puede reducir mediante el uso de tecnologías de control de emisiones, como filtros de partículas diésel y sistemas de reducción de emisiones de óxidos de nitrógeno; estas tecnologías ayudan a reducir la cantidad de partículas emitidas al aire. Las consecuencias de las partículas en suspensión en la salud humana pueden incluir irritación de los ojos y la garganta, tos y dificultad para respirar. También pueden causar enfermedades respiratorias crónicas, como el asma y la enfermedad pulmonar obstructiva crónica (EPOC) (Díaz et al., 2007). A largo plazo, la exposición a estas partículas puede aumentar el riesgo de enfermedades cardíacas y cáncer. Además, las partículas en suspensión del diésel también pueden tener un impacto negativo en el medio ambiente, pues pueden contribuir a la lluvia ácida, el smog y la contaminación del agua y del suelo. De igual forma, pueden afectar la calidad del aire en las ciudades y los entornos urbanos, lo que puede afectar la calidad de vida de las personas que viven en esas áreas.

6.2.5 Emisiones de efecto invernadero, aportantes y estrategias de mitigación

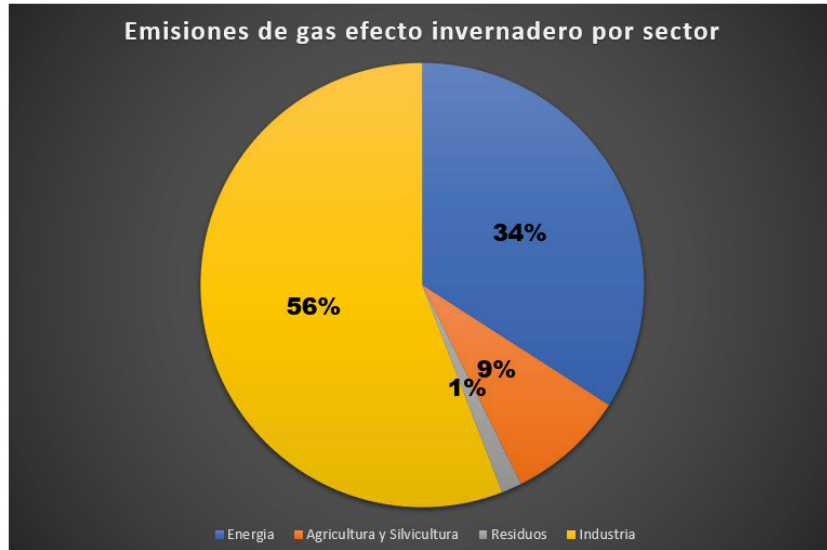


Figura 45. Emisiones de efecto invernadero discriminadas por sector. Ourworldinata

Los gases de efecto invernadero son emitidos por diversos sectores industriales, y cada uno contribuye de manera diferente en términos de porcentaje (Faust, 2009). A continuación, se presenta una breve descripción de los sectores y su contribución aproximada:

- **Energía:** este sector es el principal emisor de gases de efecto invernadero y contribuye con alrededor del 72% de las emisiones globales. La mayoría de las emisiones provienen de la quema de combustibles fósiles para generar electricidad y calor.
- **Agricultura, silvicultura y otros usos del suelo:** este sector contribuye con alrededor del 10% de las emisiones globales. Las emisiones provienen principalmente del ganado, la producción de arroz, la quema de biomasa y la deforestación.
- **Industria:** este sector contribuye con alrededor del 9% de las emisiones globales. Las emisiones provienen principalmente de la producción de cemento, acero, aluminio y químicos.
- **Transporte:** este sector contribuye con alrededor del 14% de las emisiones globales. Las emisiones provienen principalmente de la quema de combustibles fósiles en

vehículos de carretera, trenes, barcos y aviones (Redondo, 2009).

Para mitigar el impacto de los gases de efecto invernadero (Gates, 2021), se están implementando diversas medidas en los sectores mencionados anteriormente, como:

- **Energía:** se están adoptando fuentes de energía renovable, como la solar y la eólica, y se están implementando tecnologías de almacenamiento de energía para reducir la dependencia de combustibles fósiles. Además, se están adoptando políticas y regulaciones para fomentar la eficiencia energética y la reducción de emisiones en la generación de energía.
- **Agricultura, silvicultura y otros usos del suelo:** se están implementando prácticas agrícolas y forestales sostenibles para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero y aumentar la capacidad de absorción de carbono. Además, se están adoptando prácticas de gestión de residuos para reducir las emisiones de metano.
- **Industria:** se están implementando tecnologías más limpias y eficientes para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en la producción de cemento, acero, aluminio y químicos. Además, se están adoptando políticas y regulaciones para fomentar la adopción de tecnologías limpias y reducir las emisiones de dichos gases.
- **Transporte:** se están adoptando vehículos eléctricos y de combustible alternativo, como el hidrógeno, para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero en el transporte. Además, se están adoptando políticas y regulaciones para fomentar la eficiencia energética y la reducción de emisiones en el transporte.

En general, se están implementando medidas en todos los sectores para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, y mitigar su impacto en el clima y el medio ambiente (Gates, 2021)

7. POSTRATAMIENTO DE GASES DE ESCAPE

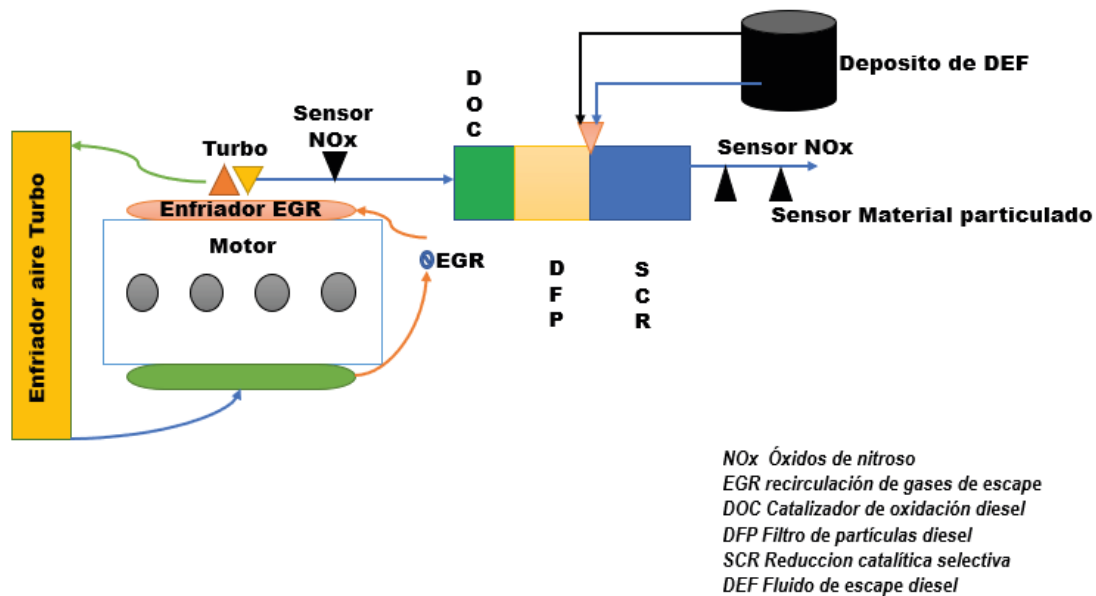


Figura 46. Componentes del sistema de postratamiento de gases de escape. Cummins

En esencia un sistema de postratamiento de gases de escape se encarga de limpiar los gases que han salido de la cámara de combustión, ya sea por medio mecánicos, catalíticos o químicos para asegurar que los motores diésel cumplan con las normativas de emisiones.

La página del fabricante de motores Diésel Cummins, cuyo fundador fue el señor Clessie Cummins dice al respecto que Este conjunto de componentes incluye un filtro de partículas (DPF), un catalizador de oxidación diésel (DOC) y un sistema de atomización de urea de amonio (DEF o AdBlue). Estos elementos trabajan en conjunto para eliminar las partículas, disminuir los óxidos de nitrógeno y liberar nitrógeno puro y vapor de agua al entorno, contribuyendo así a la limpieza ambiental (Cummins, 2022).

Por otro lado, y como complemento la página de Volvo en Italia, el motor diésel Volvo D11 se caracteriza por tener emisiones reducidas tanto de gases de escape como de ruido. El sistema de tratamiento de gases de escape ubicado en el silenciador incluye un catalizador de oxidación diésel (DOC), un filtro de partículas diésel (DPF), un sistema de reducción catalítica selectiva (SCR) y un catalizador de síntesis de amoníaco (ASC) (Volvo, 2022)

Otro fabricante del viejo continente, más específicamente HELLA, en referencia al sistema de postratamiento de gases expresa que el tratamiento posterior de los gases de escape emplea métodos mecánicos, químicos y catalíticos para reducir las emisiones derivadas de la combustión. Este proceso se enfoca en los gases y en las partículas sólidas para convertirlos en emisiones benignas. Los componentes mecánicos y químicos del sistema de tratamiento posterior son las tecnologías más utilizadas en la actualidad, conocidas específicamente como catalizador de oxidación, filtro de partículas, trampa de NOx y catalizador (Hella, 2022).

La marca automotriz sueca Scania al respecto de los sistemas de postratamiento manifiesta que la solución Scania Euro 6 es compacta, adaptable y requiere un mantenimiento mínimo. Integrando tecnologías bien conocidas de Scania como el turbocompresor de geometría variable (VGT), el turbocompresor de geometría fija (FGT) y la recirculación de gases de escape (EGR), junto con la reducción catalítica selectiva (SCR), se logra mantener los niveles de NOx bajos. Esta configuración no solo optimiza el ahorro de combustible, sino que también asegura una conducción suave y cumple con los exigentes estándares de Scania (Scania, 2015)

Finalmente, un fabricante de Norte América llamado Caterpillar, cuyo fundador lleva el apellido Holt, respecto del postratamiento de gases de escape afirma, desde 1996, la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de EE.UU. ha implementado progresivamente regulaciones de emisiones “por niveles” para reducir las emisiones nocivas de escape de equipos diésel utilizados en aplicaciones móviles fuera de carretera. Las normativas más recientes requieren reducciones significativas en las emisiones de material particulado (MP) y óxidos de nitrógeno (NOx). La última normativa, Tier 4 final, exige la incorporación de sistemas de postratamiento que reduzcan las emisiones a niveles de cumplimiento para todos los motores. Las aplicaciones de alquiler son frecuentemente empleadas en condiciones de carga baja, y se han desarrollado estrategias específicas para cumplir con estos requisitos, como la combinación de un filtro de partículas diésel (DPF) con un sistema de recuperación avanzado (fuente y página no especificadas). Caterpillar usa una tecnología de recu-

peración activa exclusiva para maximizar la confiabilidad y durabilidad del motor, mientras que la competencia agrega un costoso banco de carga automática a un grupo electrógeno.

Al revisar con detenimiento cada uno de los aspectos expuestos por los fabricantes mostrados con anterioridad, se puede ver similitudes en lo que se expresa y por ende en su funcionamiento, haciendo la salvedad que sobre una misma base tecnológica, se desea lograr lo mismo. Así las cosas, entonces un sistema de postratamiento de gases de escape en un motor diésel es un conjunto de dispositivos y procesos que se utilizan para reducir las emisiones de gases contaminantes que se generan como resultado de la combustión en el motor diésel.

Los sistemas de postratamiento de gases de escape suelen estar compuestos por varios constituyentes, tales como catalizadores, filtros de partículas, sistemas de recirculación de gases de escape, sistemas de inyección de urea (SCR), entre otros. Cada uno de estos componentes se utiliza para reducir una cierta clase de contaminantes en los gases de escape. Por ejemplo, un catalizador se utiliza para convertir los gases de escape nocivos en gases menos dañinos mediante reacciones químicas. Mientras que un filtro de partículas se utiliza para atrapar partículas sólidas presentes en los gases de escape. Asimismo, un sistema SCR utiliza urea para reducir la cantidad de óxidos de nitrógeno (NOx) en los gases de escape. Así, el objetivo principal de un sistema de postratamiento de gases de escape en un motor diésel es reducir las emisiones de gases contaminantes para cumplir con las normas y regulaciones ambientales, y de esta forma proteger la salud humana y el medio ambiente (Nova & Tronconi, 2014).

Los dispositivos de postratamiento de gases de escape cumplen con su función bajo variados principios. La primera de ellas se da por activación de reacciones químicas a bajas temperaturas presentes en el sistema de escape que funcionan para restaurar el equilibrio químico, en este caso se aplica para CO y NO para conseguir un equilibrio de CO₂, N₂ y O₂. También por medio de mecanismos de oxidación y reducción (DOC Catalizador de oxidación diésel y SCR reducción catalítica selectiva). En último término, otros sistemas obstaculizan la salida a la atmósfera de ciertos componentes del escape, acumulándolos y reteniéndolos por vía química y física durante ciertos periodos, como el caso del filtro de partículas diésel DPF (Casanova & Armas, 2011).

7.1 Categorización de los sistemas de postratamiento de gases de escape

Dentro de la tipología que se encuentra en la actualidad y es la más predominante, se pueden vislumbrar según sus bases operativas:

Tabla 6. Clasificación de sistemas de postratamiento de gases de escape. Casanova & Armas (2011)

Tipo	Principio de funcionamiento
Reactor térmico	Incineración térmica de partículas atrapadas.
Reactor catalítico	Efecto catalítico de ciertos metales y compuestos sobre los gases de escape para equilibrio térmico.
Reactores químicos	Reacción química de un reactante añadido, elimina producto contaminante SCR, urea de amonio.
Filtros químicos	Retención y acumulación de productos contaminantes en forma de compuestos químicos, se aplica regeneración cada lapso de tiempo.
Filtros físicos	Retiene partículas sólidas y líquidas presentes en los gases de escape. Obliga a una limpieza por regeneración DPF.

La tabla anterior expresa muy puntualmente el principio de funcionamiento, por ello se hace prioritario describir con mayor profundidad cada una de estas tecnologías y así dar un mejor entendimiento al respecto.

7.1.1 Reactores térmicos

Por un lado, un reactor térmico es un dispositivo diseñado para llevar a cabo una reacción química en un entorno controlado y a alta temperatura. Los reactores térmicos se utilizan para producir una amplia variedad de productos químicos, como plásticos, resinas, adhesivos, combustibles, entre otros. Aunque ambos dispositivos tienen en común el uso de calor residual, los recuperadores térmicos se enfocan en recuperar el calor residual para reducir el consumo de combustible y las emisiones, mientras que los reactores térmicos se enfocan en usar el calor residual para llevar a cabo reacciones químicas y producir productos químicos. En los sistemas de postratamiento de gases de escape, un reactor térmico se utiliza para llevar a cabo reacciones químicas que transforman los contaminantes presentes en los gases de escape en sustancias menos nocivas o no nocivas para el medio ambiente (Ramaswamy, 1997).

Cuando estos se diseñaron, su tarea primordial era oxidar el monóxido de carbono (CO) y los hidrocarburos (HC), llevándolos por medio de reacciones de postcombustión a CO_2 y H_2O en un escenario de liberación de calor acompañado de temperaturas altas dentro de un margen de tiempo; en otras palabras, a mayor temperatura, menor tiempo dará un rendimiento por encima del 90%, por ejemplo a 850°C y 50 ms el rendimiento es de 90% pero a 750°C serían necesarios 100 ms para lograr el mismo rendimiento. De tal manera que se garantiza un funcionamiento apropiado, y este reactor se ubica cerca del motor para lograr los niveles de temperatura deseables. Su elevado coste hace de este desarrollo tecnológico una opción poco usada. Tal así, que desde la década de los años 70's se empezó a discontinuar del mercado, pues para mezclas ricas se requiera la inyección de aire al escape y con un escenario rico en oxígeno, por el contrario, con mezclas pobres el rendimiento de conversión está por debajo del 30% aproximadamente (Casanova & Armas, 2011).

7.1.2 Reactores catalíticos

Ubicado en el sistema de escape, estos tienen como objetivo acelerar las reacciones químicas de oxidación o reducción que no han alcanzado el equilibrio térmico de los gases a la salida de escape. Se acompañan de una sustancia catalizadora que aumenta el rendimiento y disminuye la temperatura de operación (Lombardo et al.2016). El agente catalizador se aplica sobre el sustrato o soporte por donde circulan los gases de escape, logrando así un contacto estrecho con el catalizador. En cuanto a su arquitectura, se encuentra sobre la base de una triada, iniciando por el soporte, el recubrimiento y los metales nobles (componente catalizador), como se observa en la figura 48

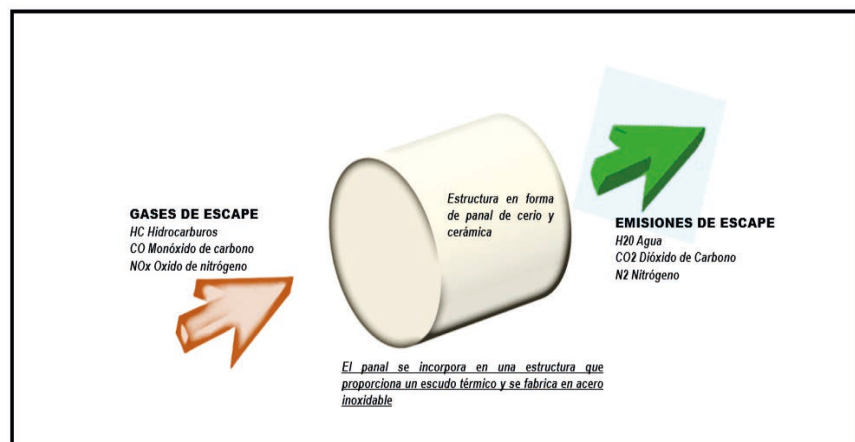


Figura 48. Partes del catalizador y conversión química. Adaptado de: cars.com

Soporte: como base de su funcionamiento, este está diseñado para soportar altas temperaturas y acoger las sustancias activas. Además, posee tolerancia a gradientes térmicos elevados, a los flujos pulsatorios y a las vibraciones mecánicas, entre otros. A partir de lo anterior, el soporte debe tener, por un lado, baja inercia térmica, por otro lado, tolerancia a las temperaturas por arriba de 1000°C, asimismo alta resistencia térmica, también, una alta porosidad y finalmente, mínima pérdida de carga frente a el flujo de los gases de escape (Casanova & Armas, 2011). En cuanto a los materiales inicialmente se usaban esferas de alúmina sinterizada, que con el tiempo quedaron obsoletas y dieron paso al monolito cerámico o los de matriz metálica. Estos elementos ayudan a garantizar el flujo laminar interno con un promedio de celdas por cm² que ronda los 60. De esta manera se garantiza una superficie de contacto gas-catalizador apropiada y una reducción de la inercia térmica. El otro tipo de soporte es el metálico, cuya estructura es del tipo panal de abeja, formado por milimétricas láminas de acero inoxidable corrugado, con una densidad de celdas mayor que en los monolitos cerámicos. En cuanto a su peso e inercia térmica, el soporte cerámico tiene mayor peso y es de menor inercia, lo que obliga a instalarse lo más cerca posible del escape del motor (Gaona, 2019).

Recubrimiento: es una sustancia activa que se deposita sobre las superficies del soporte, ya sea cerámico o metálico. Una de las aplicaciones más comunes de esta sustancia activa es el óxido de aluminio, óxido de cerio y ciertos aditivos como Níquel, Hierro y Zirconio. Todo lo anterior para lograr el aumento de la superficie de contacto con los gases de escape y disminuir la oxidación por azufre (Ahak, 2009).

Componente catalizador: los más aplicados en la actualidad son los llamados materiales preciosos, como el platino, paladio y rodio, así como las combinaciones entre ellos. Cada uno de los anteriores con propiedades muy intrínsecas; por ejemplo, el paladio oxida de mejor forma las parafinas, el platino para la oxidación de aromáticos y el rodio es muy apropiado en la reducción de óxidos nitrosos (Ramos, 2002). En función de la composición de los gases de escape, el dosado de la mezcla y la posible inyección de aire, además del contenido de oxígeno en los gases de escape, se encuentran tres tipos de catalizadores.

- **Catalizador de Oxidación:** con aplicación en mayor porcentaje en los motores de encendido por compresión o motor diésel, ya desarrollados plenamente. Estos son de un costo bajo, sin rutinas de mantenimiento, con poca incidencia en el consumo y que aportan a la reducción en las emisiones auditivas del motor. Son comúnmente conocidos hoy en día como DOC (Diesel Oxidation Catalyst) y su ubicación en el

sistema de postratamiento de gases de escape se encuentra cerca al turbocompresor para garantizar temperaturas entre 100 y 550°C (Casanova & Armas, 2011). A razón de su comportamiento térmico, entre este rango se incrementa la producción de óxidos de azufre, lo que ha obligado al uso de combustibles de muy bajo contenido de azufre (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática, 2002).

- Catalizador de Reducción opera con una mezcla rica para reducir los niveles de NO_x, es decir, una mezcla que no contenga oxígeno. La operación óptima de esta tecnología se logra en ocasiones mediante una inyección de aire intermedia. El metal más usado para esta operación es el rodio, que viene acompañado de rangos de operación amplios y que no genera NH₃.
- Catalizador de tres vías: dado para trabajar sobre un gas de escape proveniente de una mezcla estequiométrica, este es un catalizador que opera sobre NO_x, HC y CO, con limitantes como el dosado relativo. El catalizador puede generar un rendimiento en la conversión de los tres contaminantes superior al 80%, lo que deriva su uso en motores de encendido provocado o motor a gasolina. Este catalizador debe estar equipado de un control electrónico de la inyección en un bucle cerrado, un sensor de oxígeno o una sonda lambda. En su arquitectura tiene metales preciosos como cerio, renio, bario o circonio, los cuales permiten almacenar oxígeno y así facilitar el enriquecimiento o empobrecimiento de la mezcla; del mismo modo y para lograr un completo resultado, su rango de operación está entre 300 y 600°C (González et al., 2002).

7.1.3 Reactores químicos

Estos reactores están basados en las reacciones químicas para minimizar la concentración de gases contaminantes. Hoy en día la tecnología más aplicada es la reducción catalítica selectiva (SCR), cuyo objetivo principal es la atenuación de los NO_x cuando la reducción convencional no es viable en razón a la abundancia de oxígeno. Esta tecnología usa en la actualidad urea de amonio, la cual no es tóxica, como se observa en la figura 49, pues es biodegradable y además, de bajo coste. Adicionalmente, el consumo de urea está alrededor del 2% y el 9% del consumo de combustible.



Figura 49. Presentación comercial de la urea de amonio. Adaptado de Amazon.

En lo que tiene que ver con el tamaño del catalizador para un motor diésel, este es de mayor tamaño que un catalizador para un motor a gasolina. La razón de ello está en lograr más de un 90% de conversión de NO_x, lo cual implica en realidad que dentro de la estructura exista un catalizador de oxidación, catalizador de hidrólisis de urea y un catalizador de limpieza (Casanova & Armas, 2011).

7.1.4 Filtros químicos

Una alternativa a la par de los SCR, implica la reducción de NO_x. De esta forma, bajo condiciones de mezclas pobres, estos se atrapan para liberarse bajo mezclas ricas. Dicha preservación se vale de materiales como el bario, los cuales se encuentran en el recubrimiento. Cuando ocurre una saturación química, en los motores a gasolina se inicia el periodo de conversión del NO_x. Para el caso de los motores diésel, al no haber condiciones de mezcla rica, que sean apropiadas a su principio de funcionamiento, se aplican la inyección de combustible, valiéndose así del control electrónico con un inyector en el escape o usando la postinyección en la fase de expansión (Desantes & Molina, 2011).

7.1.5 Filtros físicos

Este desarrollo se fija en las denominadas PM o Material Particulado, cuya composición está dada por hollín, hidrocarburos, sulfatos, agua y cenizas en baja proporción.

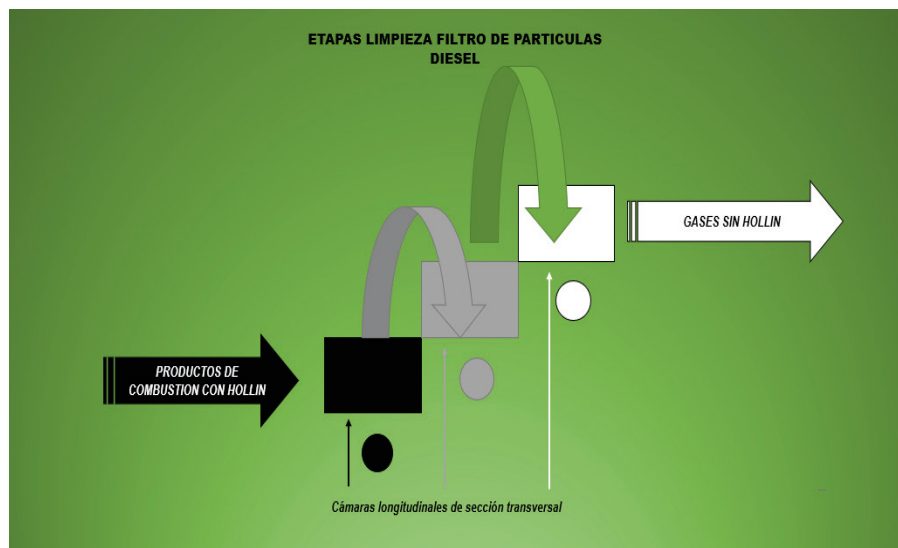


Figura 50. Filtro de partículas diésel dentro del proceso de limpieza. Adaptado de Researchgate.

De esta forma, la norma en la actualidad para muchas aplicaciones, como se muestra en la figura 50, se trata de que los gases han de dejar el material particulado en el filtro por medio de diminutas cámaras longitudinales de sección transversal. Las cuales están selladas alternativamente, obligando a las partículas a atravesar la pared porosa del monolito que actúa como material filtrante, disminuyendo así la opacidad y por ende el impacto al medio ambiente y a la salud de los seres vivos. El monolito está elaborado en materiales cerámicos y porosos como cordierita y carburo de silicio, los cuales están recubiertos normalmente por platino; siendo este el mejor escenario para aplicar la regeneración.

En el diseño del DPF, además de la alta capacidad de retención de hollín y de la baja contrapresión de escape, también cuenta la temperatura de inicio de oxidación de forma que se logre mantener un adecuado equilibrio dentro del filtro, entre la acumulación y la oxidación de hollín, ya que durante el funcionamiento del DPF ocurre una colmatación en razón a las partículas retenidas. Esto afecta la restricción de los gases de escape y/o aumenta la contrapresión, la renovación de los gases y el consumo de combustible. Dado lo que antecede, se hace obligatorio aplicar la regeneración que es la oxidación del hollín acumulado en el filtro de partículas dentro de unos valores de temperatura entre 500°C y 600°C (Casanova & Armas, 2011).

Existen varias técnicas de regeneración que se pueden clasificar en:

- Regeneración activa: esta apunta a lograr la temperatura mínima de oxidación del hollín mediante el aporte energético adicional. Para ello, el procedimiento más usado es la post inyección de combustible mediante la variación de estrategias de inyección monitoreadas por la unidad de control del motor, lo cual es posible en los sistemas de inyección diésel controlados electrónicamente como el riel común o las unidades inyectoras (Pardiñas & Feijoo, 2023).
- Regeneración pasiva: esta regeneración opera en condiciones normales de trabajo con baja temperatura de escape, sobre la base de la disminución de la temperatura de inicio de la reacción de oxidación del hollín, dando curso así a la autooxidación de esta partícula (Casanova & Armas, 2011). Para llevar esto a cabo, se puede incorporar ya sea, un catalizador al filtro de partículas con un aporte de aditivos en el combustible, también el uso del NOx que oxide el hollín (DOC+DPF) o finalmente, una combinación de los mecanismos nombrados anteriormente (Pardiñas & Feijoo, 2023).

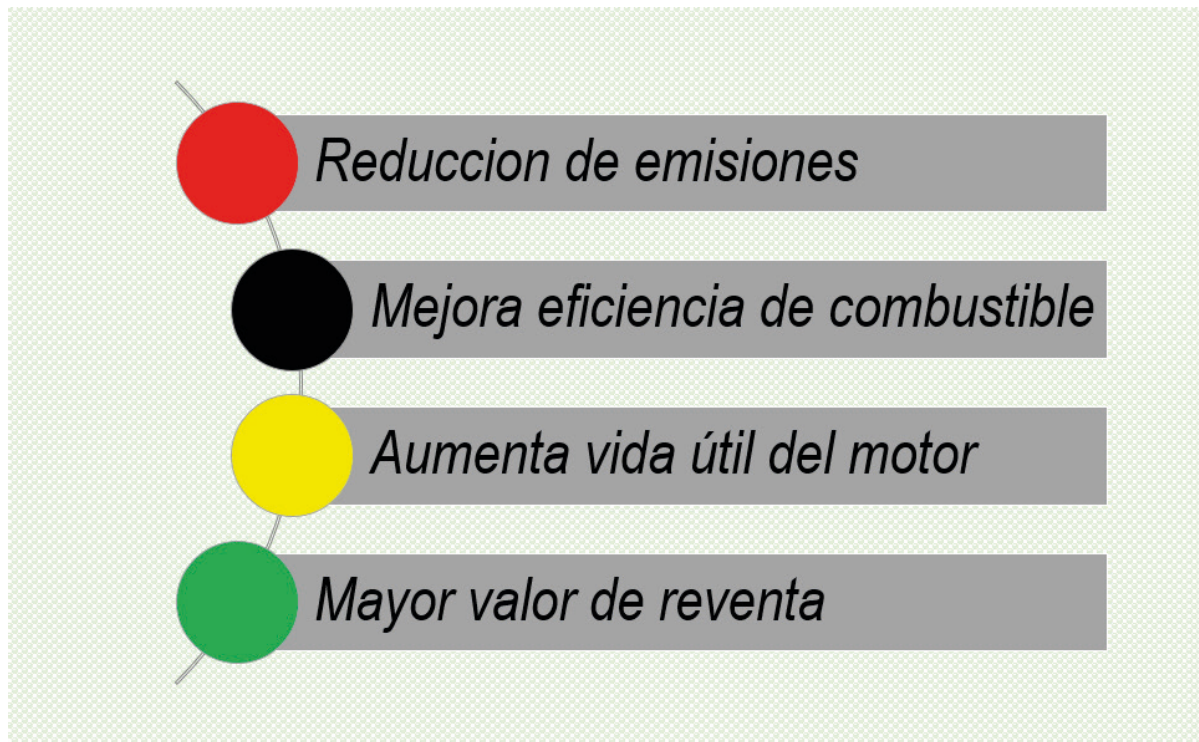


Figura 51. Beneficios del filtro de partículas. Recambios de Desguace.

REFERENCIAS

- Ahak, M. (2009). El efecto de la carga de Zr en el rendimiento del catalizador monolítico de nido de abeja para la eliminación de NO, CO e hidrocarburos de los gases de escape. *Revista de ingeniería y tecnología*, 1915-1936.
- Alcaldía Mayor de Bogotá. Secretaria del Medio Ambiente (s.f.). *Secretaria del Medio Ambiente*. http://ambientebogota.gov.co/c/document_library/get_file?uuid=6c2814c9-5c7c-4836-9d53-de832d33a63c&groupId=18757
- Alonso, J. (2001). *Técnicas del Automóvil. Sistemas de inyección de combustible en los motores diesel*. Thomson Paraninfo.
- Álvarez, J., Callejón I., Forns, S., Balsells, D., Casanova, J., Bonet, O., Carrera, X., Carreras, R., Sánchez, D., Miret, S., Liesa, F., Isidro, L., Espada, I., Costa, R., Forcadell, C., Serrano, A., Soldevila, X. & Villa, J., (2005). *Motores alternativos de combustión interna*. Ediciones PUC.
- Angiolani, A. (1960). *Introducción a la química industrial*. Andrés Bello.
- Arias, R., Berenguer, M., Vasquez, J., Silveira, Y. & Alfaro, C. (2018). Disminución de las emisiones de monóxido de carbono con el tratamiento magnético de combustible. *Revista centro Azúcar* 45, 21-31
<http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v45n1/caz03118.pdf>
- Automóviles Citroen de España. (2013). *Sistema de inyección HDI BOSCH EDC 16 C3 para motor DV4TD*. Citroen.
- Benjumea, P., Chaves, G. & Vargas, C. (2006). Efecto de la temperatura sobre la densidad del biodiesel de aceite de palma y sus mezclas con diesel convencional. *Revista Energética* 36, 41-50.
- Brady, R. (1997). *Manual moderno de tecnología diésel*. Hall hispanoamericana S:A.
- Brady, R. (1999). *Manual Moderno de tecnología diésel (Vol. I)*.: Prentice-Hall Hispanoamericana, S.A.

- Casanova, J. & Armas, O. (2011). Técnicas para reducir emisiones. Normativas. En J. Desantes, & R. Payri, *Motores de combustión interna alternativos* (pág. 656-686). Editorial Reverté.
- Cummins. (2021). *cumminsfiltration.com*.
<https://www.cumminsfiltration.com/es/nanonetdesigns>
- Cummins. (29 de Febrero de 2022). *Cummin Corporation web site*.
<https://www.cummins.com/>
- DAF. (15 de abril de 2022). *DAF España*. <https://www.daf.es/>
- Delphi Diesel Systems. (2005). *Manual de taller Inyector Bomba Electrónico EUI*. Delphi Diesel Systems.
- Demand Detroit. (2022). *Detroit*. <https://demanddetroit.com/>
- Departamento nacional de planeación. (2018). *Acerca de nosotros: Departamento nacional de planeación*. <https://www.dnp.gov.co/>
- Desantes, J., & Molina, S. (2011). Introducción a la combustión. En J. Desantes, & R. Payri, *Motores de combustión interna alternativos* (354-388). Editorial Reverte.
- Díaz, E., López, D. & Ancochea, J. (2007). Herencia y ambiente en la EPOC. Herencia y ambiente en la enfermedad pulmonar obstructiva crónica. *Sociedad española de Neumología y Cirugía Torácica Vol. 43*, 10-17. DOI: [10.1016/S0210-5705\(09\)71003-9](https://doi.org/10.1016/S0210-5705(09)71003-9)
- Dietsche, H. & Klingebiel, M. (2005). *Manual de la técnica del automóvil*. Robert Bosch GmbH.
- Faust, D. (2009). *Cambio climático. Los gases de efecto invernadero y la capa de ozono*. Rosen Publishing.
- Fernández, R. & Roman, J. (2015). El papel de los óxidos de nitrógeno en el cambio climático. Efectos sobre la salud. [*Trabajo de grado*. Universidad Complutense de Madrid]. Docta Complutense. <https://docta.ucm.es/entities/publication/dc-d6821e-1257-49de-b1af-be8909255c9b>
- Fieser. (1985). *Química orgánica fundamental*. Editorial Reverte.

- Figueroa, S. & Araque, J. (2005). *Problemas de motores de combustión interna*. Universidad de la Andes.
- Gaona, P. (2019). Manufactura de un catalizador para la captación de emisiones contaminantes. [Tesis Instituto Politécnico Nacional]. Unidad Azcapotzalco.
- García del Río, A. (2017). *Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo diésel*: Editorial Elearning S.L.
- García Del río, A. (2017). *Mantenimiento de sistemas auxiliares del motor de ciclo diésel*. Elearning S.L.
- Gates, B. (2021). *Cómo evitar un desastre climático*. Vintageespañol.
- Gil, H. (2020). *Técnicas de sobrealimentación*. Ediciones Ceac.
- González, J., Gutiérrez, M., & González, P. B. (2002). Catálisis, automóvil y medio ambiente. *Anales de la Sociedad Real Española de Química* 24, 24-35
https://www.researchgate.net/publication/28204882_Catalisis_automovil_y_medio_ambiente
- González, D. (2015). *Motores térmicos y sus sistemas auxiliares*. Ediciones Paraninfo, SA.
- Hella. (15 de Octubre de 2022). *HELLA GmbH & Co. KGaA*.
<https://www.hella.com/>
- Hernández, A. (2021). *Ajuste y calibración de sistemas de inyección diésel*. Editorial ECCI.
- Heywood, J. (2011). Combustion in Compression-Ignition Engines. En H. John, *Internal Combustion Engine Fundamentals* (491-558). Mac Graw Hill.
- Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática. (2002). *Estadísticas del medio ambiente del distrito federal y zona metropolitana 2002*. Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática.
- Kates, E. & Luck, W. (1982). *Motores diésel y de gas de alta compresión*. Reverté. S.A.
- Lapuerta, M. & Hernández, J. (2012). Combustibles. En J. Desantes & F. Payri: *Motores de combustión interna alternativos* (pág. 390-417). Editorial Reverté.
- Lehnert, R. (1979). *La construcción de herramientas*. Editorial Reverté.

- León, J., Gasparini, R., Rodríguez, M., Huarte, G., Estrada, J. & Filgueiras, E. (2009). *Manual de biocombustibles*. Arpel.
- Lichty, L. (1967). *Combustion engine processes*. McGraw hill.
- Lombana, J., Vega, J., Britton, E. & Herrera, S. (2015). *Análisis del sector biodiésel en Colombia y su cadena de suministro*. Editorial Universidad del Norte.
- Lombardo, E., Miro, E., Camji, D. & Vasallo, J. (2016). *Vinculación de las Universidades con los sectores productivos*. Fundación para el Análisis Estratégico y Desarrollo de la Pyme.
- Ltda, D. (2005). *Manual de taller Inyector Bomba electrónico EUI*. Delphi Diesel Aftermarket, Spartan Close & Warwick.
- Martin, J. (2007). Aportación al diagnóstico de la combustión en motores Diésel de inyección directa [Tesis Doctoral. Universidad Politécnica de Valencia].
- Mercedes Benz. (2022). *Mercedes Benz*. <https://www.mercedes-benz.com/en/>
- Ministerio de Minas y Energía & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021). *Acerca de nosotros: Fedebiocombustibles*. <https://fedebiocombustibles.com/Normatividad/>
- Molina, S. & Valdés del Fresno, M. (2011). *Motores de combustión interna alternativos*. Reverté S.A.
- Muñoz, M., Moreno, F. & Morea, J. (2008). *Motores alternativos de combustión interna*. Zaragoza: Servicio de publicaciones, Universidad Zaragoza.
- Naciones Unidas. (Enero de 2018). *Organización de las Naciones Unidas*. <https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/objetivos-de-desarrollo-sostenible/>
- Naciones Unidas. (14 de marzo de 2023). *Acerca de nosotros: Naciones Unidas*. <https://www.un.org/es/climatechange/paris-agreement>
- Nova, I. & Tronconi, E. (2014). *Urea-SCR Technology for the NO_x After Treatment of Diesel Exhausts*. Springer.
- Olympia Power Systems. (2022). *Olympia Power Systems*. <https://svfmexico.com/2016/04/12/detroit/>

- Ortiz, J. (2017). Motor Diesel implementado con Gas Natural. [Tesis de pregrado. Universidad Autónoma de México]. Ptolomeo Unal:
<http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12856/Tesis.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Pardiñas, J. & Feijoo, R. (2018). *Sistemas auxiliares del motor*. Editorial Editex.
- Pardiñas, J. & Feijoo, R. (2023). *Sistemas auxiliares del motor. Libro electrónico*. Editex.
- Payri, R. & Serrano, J. (2011). Sobrealimentación. En: En J. Desantes, & R. Payri, *Motores de combustión interna alternativos* (272). Editorial Reverté.
- Perez, M. (2011). *Sistemas auxiliares del motor*. Paraninfo S.A.
- Pulkrabek, W. (2004). *Engineering fundamentals of the internal combustion engine*. Prentice Hall.
- Ramaswamy, M. (1997). *I.C ENGINES AND COMBUSTION*. Allied Publishers Limited.
- Ramos, P. (2002). *Medio ambiente, calidad de ambiente*. Ediciones Universidad de Salamanca.
- Redondo, O. (2009). *Cambio climático y energía, una perspectiva del transporte y la edificación*. Ediciones Universidad Salamanca.
- Robert Bosch GmbH. (s.f.). *Manual de la técnica del automóvil*. Robert Bosch GmbH.
- Rogel, E., Pineda, I. & Jarrin, M. (2019). Política económica de la Unión Europea en la disminución del consumo de hidrocarburos desde el 2020. *Revista Universidad y Sociedad*, Universidad y Sociedad 11 (2). 15-30.
- Romero, C. & Carranza, Y. (2005). Leyes de semejanza de los motores diésel modernos. *Scientia Et Technica*, 151-155.
- Sanchez, E. (2009). *Sistemas auxiliares del motor. Ebook*. Macmillan Professional, S.A.
- Sanchez, E. (2009). *Sistemas auxiliares del motor*. Macmillan profesional.
- Sanz, S. (2018). *Motores*. Editex.
- Sanz, S. (2022). *Motores*. Editex.

Scania. (10 de marzo de 2015). *Scania*. <https://www.scania.com/>

Secretaria del Medio Ambiente. (5 de Febrero de 2023).
<https://www.ambientebogota.gov.co/es/inicio>

Volvo. (28 de enero de 2022). *Volvo Italia*. <https://stpi.it.volvo.com/>

Volvo Parts Corporation. (2007). *Descripción, construcción y función motor D13B500*.

Yei.com. (Abril de 2001). Tecnología del plástico.
<https://www.plastico.com/temas/Tanques-de-combustible-hechos-con-plastico-de-alta-barrera+3005069>