



*La gestión de la inyección electrónica de combustible para los motores de encendido por compresión modernos (CRDI)*

*The management of electronic fuel injection for modern compression ignition engines (CRDI)*

*O gerenciamento de injeção eletrônica de combustível para motores modernos de ignição por compressão (CRDI)*

José Israel Guerra-Naranjo<sup>I</sup>  
[iguerra@tecnocuatoriano.edu.ec](mailto:iguerra@tecnocuatoriano.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0001-9563-3887>

Alexis Oswaldo Morillo-Solorzano<sup>III</sup>  
[alexismorillo1997@gmail.com](mailto:alexismorillo1997@gmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-0849-7173>

Jairo Edison Guasumba-Maila<sup>II</sup>  
[jguasumba@tecnocuatoriano.edu.ec](mailto:jguasumba@tecnocuatoriano.edu.ec)  
<https://orcid.org/0000-0002-0533-0397>  
Jefferson Javier Guamán-Salcedo<sup>IV</sup>  
[jeffersong1996@hotmail.com](mailto:jeffersong1996@hotmail.com)  
<https://orcid.org/0000-0003-1186-4413>

**Correspondencia:** [iguerra@tecnocuatoriano.edu.ec](mailto:iguerra@tecnocuatoriano.edu.ec)

Ciencias de la salud  
Artículos de investigación

\***Recibido:** 19 de junio de 2021 \***Aceptado:** 15 de julio de 2021 \* **Publicado:** 10 de agosto de 2021

- I. Magister en Administración de Empresas, Docente Investigador, Instituto Superior Tecnológico, Ecuador.
- II. Magister en Diseño Mecánico, Docente Investigador, Coordinador de Carrera de Mecánica Y Electromecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano, Ecuador.
- III. Participante Investigador, Estudiante Tecnología Superior en Electromecánica Automotriz, Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano, Ecuador.
- IV. Participante Investigador, Estudiante Tecnología Superior en Electromecánica Automotriz. Instituto Superior Tecnológico Tecnoecuatoriano, Ecuador.

## Resumen

El sistema de control es un sistema no lineal, donde se desarrolla varios modos de operación como arranque, funcionamiento en frío, funcionamiento normal, funcionamiento con fallos, etc., que son aspectos primordiales en la operación del motor. El objetivo de este artículo fue mostrar las características principales en el desempeño de la inyección electrónica directa riel común, sus variaciones en los procesos de admisión de aire comprimido, inyección de combustible y de los gases contaminantes en los contextos de aplicación de software de simulación y lógica de trabajo como de resultados de varios autores. En conclusión, el control de la inyección electrónica del motor, debe ser capaz de mejorar el rendimiento del motor, la combustión y controlar las emisiones de los motores de encendido por compresión, la tecnología de inyección directa riel común ofrece posibilidades ilimitadas al controlar los parámetros de inyección de combustible, para la flexibilización de los motores modernos.

**Palabras clave:** Vehículo; automotriz; sistema CRDI; características de combustión; emisiones; control electrónico.

## Abstract

The control system is a non-linear system, where various operating modes such as starting, cold running, normal operation, faulty operation, etc. are developed, which are essential aspects in the operation of the engine. The objective of this article was to show the main characteristics in the performance of the common rail direct electronic injection, its variations in the processes of admission of compressed air, fuel injection and of polluting gases in the contexts of application of simulation software and logic of work and results of various authors. In conclusion, the control of the electronic injection of the engine, must be able to improve the performance of the engine, the combustion and control the emissions of the compression ignition engines, the common rail direct injection technology offers unlimited possibilities when controlling the parameters fuel injection, for the flexibility of modern engines.

**Keywords:** Vehicle; automotive; CRDI system; combustion characteristics; emissions; electronic control.

## Resumo

O sistema de controle é um sistema não linear, onde são desenvolvidos vários modos de operação, como partida, funcionamento a frio, operação normal, operação defeituosa, etc., que são aspectos essenciais no funcionamento do motor. O objetivo deste artigo foi mostrar as principais características no desempenho da injeção eletrônica direta common rail, suas variações nos processos de admissão de ar comprimido, injeção de combustível e de gases poluentes em contextos de aplicação de softwares de simulação e lógica de trabalho e resultados de vários autores. Em conclusão, o controle da injeção eletrônica do motor, deve ser capaz de melhorar o desempenho do motor, a combustão e controlar as emissões dos motores de ignição por compressão, a tecnologia de injeção direta common rail oferece possibilidades ilimitadas no controle dos parâmetros combustível injeção, para a flexibilidade dos motores modernos.

**Palavras-chave:** Veículo; automotivo; Sistema CRDI; características de combustão; emissões; controle eletrônico

## Introducción

La creciente demanda de energía y el hecho de que el petróleo, que es la fuente de energía más utilizada, tiene una reserva limitada, ha llevado a los investigadores a buscar fuentes de energía nuevas y renovables. En este contexto, los biocombustibles como el biodiésel y los bioalcoholes se han estudiado y utilizado en motores de combustión interna durante mucho tiempo. Sin embargo, con los avances tecnológicos, la producción y el uso de dichos combustibles alternativos en diferentes tecnologías de motores sigue siendo un tema de investigación (İlçin & Altun, 2021). El ahorro de energía y la reducción de emisiones son muy urgentes para los motores de combustión interna. Las tecnologías de turbo compresión y recirculación de gases de escape son muy importantes para las emisiones y el ahorro de combustible de los motores de combustión interna. Varias tecnologías de pos tratamiento en motores de combustión interna tienen diferentes requisitos para las tasas de recirculación de gases de escape (Zhu et al., 2020). El objetivo propuesto por la UE de reducir en aproximadamente un 4% / año las emisiones de CO<sub>2</sub> de los motores de combustión interna durante los próximos años hasta 2030, requiere aumentar la eficiencia del motor y, en consecuencia, mejorar la tecnología (Ortenzi et al., 2018).

La reducción del tamaño del motor a través de la turbo alimentación es un método probado para mejorar el ahorro de combustible mediante el uso de un motor más pequeño que opera a niveles más altos de carga específica del motor y mayor eficiencia (Tang et al., 2015). El turbo compuesto es una tecnología clave para satisfacer los requisitos futuros de ahorro de combustible y reducción de emisiones del motor diésel (Yin et al., 2016). La turbo alimentación es más desafiante para el motor de gasolina que para el motor diésel debido a la mayor variabilidad en el caudal de aire y la mayor temperatura de los gases de escape.

Los futuros motores diésel HD deben tener sistemas de combustión e inyección de combustible mejorados y utilizar tecnologías adecuadas como recirculación de gases de escape (EGR), sistemas de turbocompresor de turbina de geometría variable (VGT) y sistemas de postratamiento de gases de escape (Pfeifer et al., 2002). Para los problemas ambientales mundiales y las preocupaciones sobre el ahorro de combustible, los turbocompresores se han convertido en una tecnología esencial para los motores diésel. Ha aumentado el número de turbinas de turbocompresor de geometría variable que se utilizan para motores diésel en lugar de turbinas convencionales de geometría fija o de descargue (Tange et al., 2003). Un turbocompresor es básicamente un dispositivo que mejora la eficiencia de un motor al suministrar aire comprimido al cilindro mediante el uso de una turbina que gira con la ayuda de los gases de escape enviados por el puerto de escape del cilindro (Joshua et al., 2020).

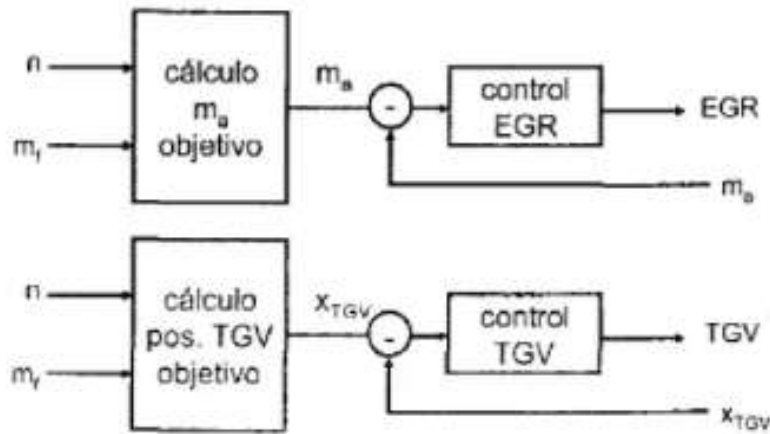
Para mejorar el rendimiento del motor, la combustión y controlar las emisiones de los motores de encendido por compresión (CI), la tecnología de inyección directa common rail (CRDI) ofrece posibilidades ilimitadas al controlar los parámetros de inyección de combustible (Karolys et al., 2019), como la presión de inyección de combustible, el tiempo de inicio de la inyección (SOI), la tasa de combustible, inyección y duración de la inyección. Los sistemas CRDI disponibles comercialmente son bastante complejos y utilizan una gran cantidad de sensores, hardware y circuitos analíticos, lo que los hace muy costosos e inviables para motores monocilíndricos más baratos, típicamente utilizados en el sector agrícola y el sector energético descentralizado (Agarwal, Gupta, et al., 2015). En este trabajo se describe varias estrategias de control de las importantes variables en los sistemas de inyección de riel común (CRDI) de los motores diésel desde los sistemas de aire de admisión hasta la propia gestión de combustible en la inyección y como resultante las emisiones derivadas de la combustión.

### **Características del sistema de gestión del aire en sistemas CRDI**

La relación de control de aire en los motores de encendido a compresión se realiza por medio de varias estrategias: la mariposa de admisión, turbina de geometría variable, válvula de EGR, wastegate, sistemas de sobrealimentación secuenciales que benefician de forma individual o en conjunto mejorando la potencia y reduciendo las emisiones contaminantes. A medida que las regulaciones de emisiones se vuelven cada vez más exigentes, los requisitos de motores de mayor densidad de potencia (reducidos / reducidos de velocidad y cada vez más del tamaño adecuado) están impulsando el desarrollo de sistemas de turbocompresor. Actualmente, los TGV ofrecen opciones significativas o complementariedad con respecto a opciones de turbocompresor más avanzadas. Esta revisión detalla la gama de tecnologías prominentes de geometría variable que están disponibles comercialmente o están en desarrollo abiertamente, tanto para turbinas como para compresores, y analiza los méritos relativos de cada una. Junto con los prominentes sistemas de refuerzo de motores diésel, se presta atención a los esquemas de control empleados y los sistemas de actuación requeridos para operar dispositivos de geometría variable, y los desafíos específicos asociados con las turbinas diseñadas para motores de gasolina (Feneley et al., 2017).

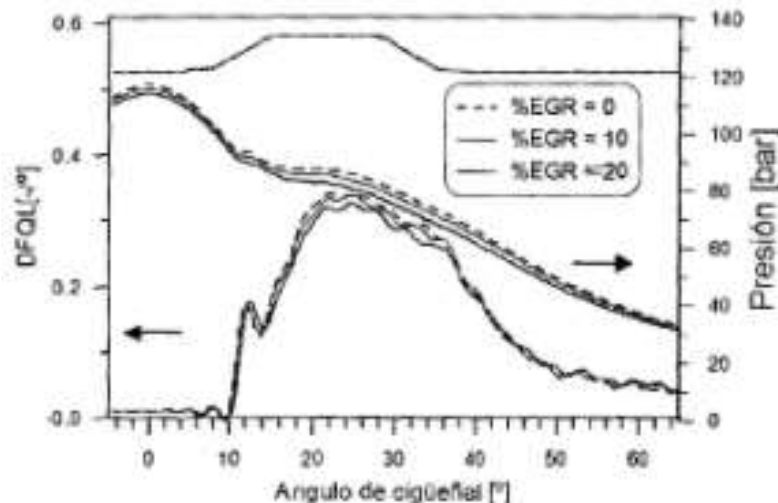
Un sistema principal es la válvula de EGR que en combinación de turbina de geometría variable alternan estrategias de éxito. Como se aprecia en la figura 1, se controla la cantidad de EGR en bucle cerrado y la turbina se actúa en bucle abierto. Dado que no es posible la medida directa del gasto de EGR y la medida de la concentración de oxígeno en el colector de admisión no está extendida, la determinación de la cantidad de EGR que va a producirse en el motor se hace indirectamente a través del gasto de aire medido, y además se complementa con la turbina de geometría variable (TGV) (Payri y Desantes, 2011).

**Figura 1:** Control con EGR Y TGV (Payri y Desantes, 2011)



En la figura 2 se muestra dos situaciones de EGR, cuando aumenta la presión de sobrealimentación toda la combustión se acelera globalmente, pues el proceso de mezcla es más rápido como consecuencia del aumento de la densidad en el cilindro. Por otro lado, cuando aumenta la tasa de EGR, el tiempo de retraso se alarga como consecuencia de la menor reactivación de la mezcla, y la tasa de liberación de calor es menor (Payri y Desantes, 2011). Ahora, el problema que surge aquí es la acumulación de presión excesiva en un bloque del motor debido al turbocompresor. Este análisis ayudará a aumentar la eficiencia volumétrica general del turbocompresor. Ayudará a reducir la contrapresión general. La selección del turbocompresor sería más precisa. También hemos auto calculado los valores de la rueda del compresor y la rueda de la turbina para tener un parámetro de diseño eficiente (Joshua et al., 2020).

**Figura 2:** Influencia de la tasa de EGR sobre la tasa de liberación de calor (Payri y Desantes, 2011)





Se han probado diferentes sistemas para lograr EGR refrigerado de ruta corta en motores diésel de servicio pesado turboalimentados y pos enfriados en un motor de 315 kW de 12 litros con 4 válvulas por cilindro y un sistema de inyección de combustible de bomba unitaria controlada electrónicamente. En todos estos sistemas, el gas de escape se extrajo antes de la turbina, se enfrió y se mezcló con el aire de admisión después del compresor y el post enfriador. El comportamiento de las emisiones y la eficiencia con estos diferentes sistemas de EGR se probaron en varios puntos de trabajo del motor, incluidos los puntos clave de la simulación de ciclo AVL de 8 modos de FTP de EE. UU. Los resultados indican que, para alcanzar los niveles de emisiones de 1998, un VNT solo sería la solución más eficiente. Para lograr los niveles de emisiones de 2004, la combinación del VNT con un mezclador venturi podría proporcionar un beneficio adicional en el consumo de combustible. Sin embargo, las emisiones de material Particulado serán inaceptables, por lo que será necesario el uso de tecnología adicional de reducción de partículas. Se propone una medida de la eficiencia del mezclador venturi y se presenta un diseño nuevo, compacto y eficiente de mezclador venturi. Los resultados de las pruebas de flujo se proporcionan y se comparan con los resultados de los cálculos de CFD (Baert et al., 1999). Por otro lado, se evaluó tres métodos EGR a un motor diésel DI turboalimentado e intercooler de 12 litros, y se compararon las características de emisión de escape y consumo de combustible. Uno de los dos sistemas EGR de ruta de alta presión tiene una válvula de contrapresión ubicada aguas abajo de la turbina y el otro usa un turbocompresor de geometría variable (VG). Se descubrió que el sistema EGR de ruta de alta presión con turbocompresor VG era el más eficaz y práctico. Con este método, el área de EGR podría ampliarse y el NOx se podría reducir en un 22% sin aumentar el consumo de humo o combustible mientras se mantiene una proporción de exceso de aire adecuada (Kohketsu et al., 1997). Por último, los sistemas futuros requieren EGR controlado con precisión en combinación con un turbocompresor VGT durante la operación transitoria. Esto requerirá nuevas estrategias y calibración para la unidad de control electrónico del motor (ECU). Este documento se centra en un nuevo enfoque para el desarrollo de un concepto avanzado de control de motor diésel HD que mejorará el comportamiento del motor durante la operación transitoria. Además, este nuevo enfoque reducirá el tiempo necesario para la optimización del motor y la calibración de la ECU (Pfeifer et al., 2002)

El sistema turbo compuesto incluye una turbina de potencia, que se instala aguas abajo de una turbina de turbocompresor de geometría variable (VGT). Se estudiaron los impactos de la posición del bastidor VGT en el rendimiento del motor turbo compuesto. Se determinó una estrategia óptima de control de VGT. Los resultados experimentales muestran que el motor turbo compuesto que utiliza la estrategia de control VGT óptima logra un mejor rendimiento que el motor original en todas las condiciones de funcionamiento a plena carga. Las reducciones medias y máximas del consumo de combustible específico de los frenos (BSFC) son del 3% y el 8%, respectivamente (Yin et al., 2016). También, se refiere a la modificación de un motor diésel convencional de dos cilindros en línea (440 cm<sup>3</sup>) añadiendo una turbina de geometría variable (VGT) acoplada a un generador. es reducir el consumo de combustible mediante la sustitución del alternador por una especie de sistema turbo compuesto eléctrico para impulsar los auxiliares del vehículo. Los resultados muestran una reducción del consumo de combustible del 6 al 9%, según el tamaño de la VGT. De hecho, se han analizado cuatro tamaños diferentes de VGT para elegir la configuración óptima que refleje un compromiso entre la recuperación de energía y la reducción del consumo de combustible (Ortenzi et al., 2018). Recientemente, el turbocompresor de geometría variable (VGT) con paletas de boquilla ajustables se utiliza cada vez más, especialmente para un automóvil de pasajeros en el mercado europeo. Con el fin de mejorar el rendimiento a plena carga de un prototipo de motor diésel DI de 2,5 litros, equipado con un sistema common rail y 4 válvulas por cilindro. El resultado de rendimiento a plena carga con VGT se compara con el caso de un turbocompresor de descarga controlado mecánicamente, de modo que se confirma el potencial de una presión efectiva media de frenado (BMEP) más alta. Dentro de la misma limitación de una presión máxima del cilindro y el nivel de humo de escape, el par de baja velocidad podría mejorarse en aproximadamente un 44% como máximo (Cheong et al., 2000). Por último, los principales principios operativos y tipos de turbinas de geometría variable, su potencial para ofrecer mejoras de rendimiento, desafíos de implementación en el motor de gasolina y las medidas disponibles para aliviar esos desafíos. De los tipos disponibles de turbinas de geometría variable, la forma de boquilla variable tiene la mayor eficiencia en un amplio rango de flujo, mientras que los tipos de pared deslizante y de flujo variable tienen mejor confiabilidad y menor costo. El uso de tecnologías adicionales como el colector de escape refrigerado por agua, materiales especiales para turbocompresores, recirculación de gases de escape y nuevos sistemas de combustión en



combinación con estrategias de control avanzadas facilitará la aplicación de turbinas de geometría variable y, por lo tanto, permitirá una mayor reducción del motor de gasolina (Tang et al., 2015). La dirección de la estrategia de turbocompresor entre la geometría variable, dos etapas y la turboalimentación asimétrica de doble entrada para diferentes tasas de recirculación de gases de escape. Sobre la base de los modelos numéricos, se estudian las rutas de turboalimentación entre los tres enfoques de turboalimentación bajo diferentes requisitos para las tasas de EGR, y también se discutieron los otros rendimientos importantes de las tres turbinas. A plena carga del motor, cuando la tasa de EGR es inferior al 29%, la tecnología de turbocompresor de dos etapas tiene las mejores prestaciones. Sin embargo, cuando la tasa de recirculación de los gases de escape es superior al 29%, la turboalimentación asimétrica de doble entrada es la mejor opción y más apropiada para impulsar tasas elevadas de recirculación de los gases de escape (Zhu et al., 2020). Además, el rango de flujo de la turbina de geometría variable se expande al cambiar el ángulo de salida de la boquilla alrededor de la rueda de la turbina. Los compresores también requieren un amplio rango de flujo y alta eficiencia para adaptarse a las turbinas de geometría variable. Por otro lado, para mejorar tanto el rendimiento a baja velocidad del motor como la salida máxima, los motores de gasolina también requieren compresores turbocompresores de amplio rango y alta eficiencia. Casi los turbocompresores para vehículos de pasajeros siguen utilizando compresores de geometría fija convencionales. El nuevo difusor de geometría variable cuyas paletas se pueden poner y sacar en el paso del difusor fue desarrollado para el compresor de turbocompresor. Mediante este mecanismo, el compresor obtiene tanto la gran capacidad del difusor sin paletas como la alta eficiencia del difusor con paletas en un rango de flujo pequeño, y el par motor del motor o la economía de combustible se mejoran a baja velocidad (Tange et al., 2003)

La sincronización de SOI es un parámetro importante para mejorar las características de combustión del motor. Los tiempos de SOI se variaron entre  $25^\circ$  y  $40^\circ$  BTDC para investigar el rendimiento del motor, las emisiones y las características de combustión. Las inyecciones de combustible avanzadas mostraron una mayor tasa de liberación de calor (HRR), presión del cilindro y tasa de aumento de presión (RoPR) debido al retraso de encendido relativamente más largo experimentado. El consumo de combustible específico de freno más bajo (BSFC) se obtuvo para  $34^\circ$  CA BTDC SOI. Se observó una reducción en las emisiones de salida del motor, excepto

NOx, para los tiempos de inyección de combustible avanzados para este sistema CRDI recientemente desarrollado (Agarwal, Gupta, et al., 2015)

Cada vez es más difícil para un fabricante de motores decidir cuál es el mejor sistema de turbocompresor para su aplicación. Los sistemas Wastegate, de geometría variable, de dos etapas, secuenciales y turbos compuestos tienen sus méritos y compromisos, pero elegir la mejor opción para cada aplicación requiere un conocimiento y análisis significativos. El mercado de turbocompresores se está expandiendo y se debe considerar cuidadosamente la elección del sistema turbo, aplicación por aplicación (Ryder & Sharp, 2010). Además, un conjunto de sistema de control del actuador de la válvula de compuerta de descarga en el turbocompresor permite que la válvula de compuerta de descarga regule el flujo de escape antes del turbo automáticamente de acuerdo con la condición de funcionamiento del motor, por lo que puede reducir la relación de presión y evitar que se produzca la sobretensión del compresor cuando el compresor tiene un caudal pequeño. Se elaboró los principios de regulación utilizando la válvula de descarga, diseñó la unidad de control electrónico y el sistema de simulación y probó la función y confiabilidad de todo el sistema de control (Liu et al., 2010)

Un sistema turbo secuencial y en serie para mejorar el par a bajas velocidades del motor. Este sistema turbo tiene dos turbocompresores de diferentes tamaños con turbinas de geometría variable. A baja velocidad del motor, el pequeño turbocompresor realiza la mayor parte del trabajo. A una velocidad media del motor, el turbocompresor pequeño y el turbocompresor grande funcionan principalmente en serie. A alta velocidad del motor, el turbocompresor pequeño no funciona en absoluto, pero el turbocompresor grande funciona principalmente mediante un pequeño bypass del turbocompresor. El motor básico, con seis cilindros en línea y una cilindrada de 10,5 L, está equipado con un sistema de inyección de combustible de alta presión y un sistema de EGR de bucle de alta y baja presión para utilizar la alta tasa de EGR de impulso y alta para reducir BSNOx y PM. Los resultados obtenidos experimentalmente muestran que el sistema de turbocompresor secuencial y en serie tiene un par un 50% más alto que el convencional, con un mejor consumo de combustible logrado en la región de baja velocidad (Hashimoto et al., 2012). Por otro lado, se investigan y describen las interacciones entre las presiones y temperaturas del colector, la relación de compresión y los eventos de sincronización de válvulas. Donde se describe el desarrollo de un nuevo hardware de emulación del sistema boost. El documento describe el trabajo en curso para desarrollar modelos en tiempo real de componentes de manejo de aire para

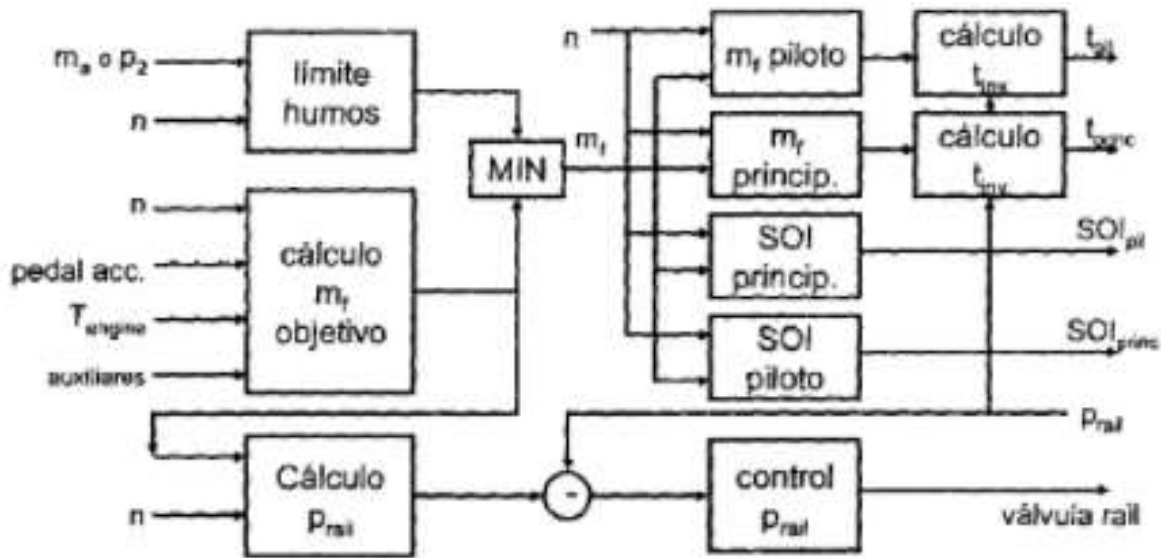
integrarlos con el hardware de emulación, de modo que las futuras combinaciones de tecnología de configuraciones de sobrealimentación, e-boosting y turbo secuencial se puedan evaluar rápidamente en términos de rendimiento del motor tanto en estado estacionario como transitorio (Akehurst & Piddock, 2008). Por último, los sistemas de impulso turbo de dos etapas secuenciales o regulados en serie (sistemas R2S ® en términos de BorgWarner) se han introducido ampliamente en los motores diésel para combinar una alta potencia específica con una excelente capacidad de conducción. Estos permiten un alto grado de reducción y, por lo tanto, proporcionan importantes beneficios en el consumo de combustible. Hasta ahora, la aplicación a los motores de gasolina estaba limitada por las temperaturas más altas de los gases de escape en comparación con los motores diésel. En el pasado, Ford y BorgWarner han investigado con éxito tecnologías de refrigeración por agua para los componentes calientes de los sistemas de turbocompresores. Como siguiente paso, las experiencias adquiridas con el turbocompresor de una etapa se transfirieron a un sistema de refuerzo de dos etapas para motores de gasolina. El resultado es un sistema de refuerzo doble que cuenta con una carcasa central de aluminio refrigerada por agua que sostiene la válvula reguladora y la válvula de compuerta de desagüe. Se adapta perfectamente al colector de escape integrado refrigerado del motor prototipo Ford 1.6 l EcoBoost. El diseño combina un funcionamiento del motor con ahorro de combustible casi sin enriquecimiento de combustible, un paquete compacto y un costo competitivo. Se construyó y probó un prototipo del sistema R2S ® refrigerado por agua en el motor de destino. El sistema demostró ser duradero y logró excelentes resultados de rendimiento que superaron los objetivos y expectativas (Kai Kuhlbach et al., 2013).

### **Sistemas de gestión de la inyección en sistemas CRDI**

Existen decenas de miles de parámetros calibrables en la gestión de la inyección CRDI, en este apartado principalmente por la presión de inyección (bomba baja presión, bomba alta presión y válvula de descarga), inicio de la inyección, Duración de la inyección. Hasta 5 inyecciones por cilindro y ciclo, perfil de la inyección, etc., que son calibrados bajo la selección de valores extraídos de forma experimental debido a la gran cantidad de grados de libertad como se aprecia en la figura X. En los Motores de encendido por Compresión actuales el sistema de gestión del combustible es prácticamente independiente del sistema de renovación de la carga cuando el motor trabaja en condiciones estacionarias. Entonces el motor gestiona la inyección con independencia

del gasto de aire admitido y del EGR. La figura 3 trabaja en función del punto de operación y de diversas variables auxiliares, selecciona la presión a la que va a introducirse el combustible, el número de inyecciones a efectuar, el instante (ángulo de cigüeñal) en que van a producirse cada una de las inyecciones y la duración de estas. La CPU es la encargada de gestionar la sincronización de la inyección.

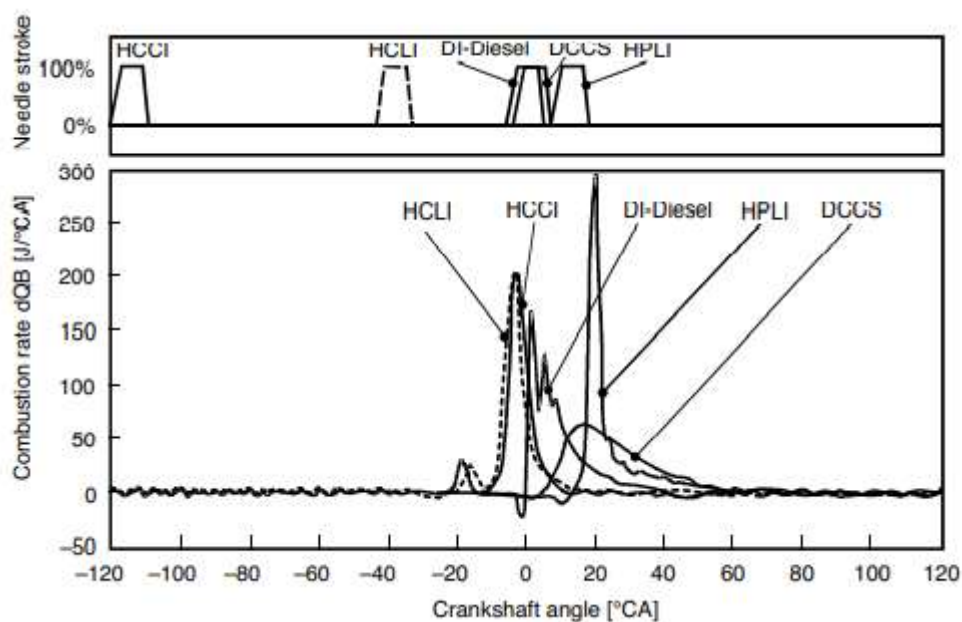
**Figura 3:** Gestión de la inyección en motor CRDI (Payri y Desantes, 2011)



Las presiones medias del proceso de alta presión de aproximadamente 10 bar se alcanzan con valores muy bajos de emisión de NOx y hollín. Las emisiones de HC aumentan considerablemente. La eficiencia indexada es muy baja. El proceso cinético modulado presentado por Nissan utiliza una homogeneización parcial afectada por la inyección tardía por encima del TDC superior. Al extender el retardo de ignición debido a la temperatura más baja de la sustancia de trabajo, se respalda una tasa de EGR de aproximadamente el 40%. Para evitar la formación de hollín, es importante una separación temporal rígida de la fase de inyección y de combustión. La presión media indexada alcanzable del proceso de alta presión es de aproximadamente 8 bar. Está limitado por el tiempo de inyección, que aumenta con la carga del motor y el acortamiento del retardo de encendido que se produce debido a la aumentando simultáneamente las temperaturas del proceso. Las emisiones de HC y CO son aproximadamente las mismas que en el motor diésel convencionales. Este proceso también se conoce como inyección tardía altamente premezclada (HPLI). Si se combinan las características de homogeneización parcial y alta tasa de EGR, se puede

obtener el llamado proceso de inyección tardía de carga homogénea (HCLI). Este proceso se caracteriza por una inyección comparativamente temprana. La distancia temporal entre el final de la inyección y el inicio de la combustión es significativamente mayor que en el proceso HPLI. No se genera hollín a niveles de NOx muy bajos y eficiencias similares a las de un motor diésel convencional. Las emisiones de HC y CO son similares a las de los motores SI modernos con DI, visto en la figura 4.

**Figura 4:** Representa cada posición de la inyección de combustible y la conversión de energía en el arco del cigüeñal



En este documento, se investigó el efecto de las diferentes presiones de inyección de combustible y los tiempos de inyección en la distribución del número de tamaño de las partículas y las características de pulverización en un motor de encendido por compresión (CI) de inyección directa (CRDI) common rail de un solo cilindro alimentado con mezclas de biodiésel Karanja frente a respecto al diésel mineral básico. Los resultados de la investigación de la penetración de la boquilla de pulverización y el área de pulverización de mezclas de biodiésel y diésel mostraron que una presión de inyección de combustible más alta da como resultado una penetración de la boquilla de pulverización más larga y un área de pulverización más grande que a presiones de inyección más bajas al mismo tiempo transcurrido después del inicio de la inyección (SOI). Para

comparar el efecto de los parámetros de inyección de combustible, se compararon mezclas de biodiésel Karanja al 10, 20 y 50% a una velocidad del motor de 1500 rpm con los datos de referencia del diésel mineral. Se observó que el tamaño medio de las partículas aumentaba al retardar los tiempos de SOI. La concentración del número de partículas fue más baja para la mezcla de biodiésel al 10%, que aumentó con el aumento adicional del contenido de biodiésel en el combustible de prueba mezclado. La adición de incluso una cantidad muy pequeña de biodiésel en el combustible de prueba ayudó a reducir las emisiones de partículas (Agarwal et al., 2014)

Los parámetros de inyección de combustible, como la presión de inyección de combustible (FIP) y la sincronización del inicio de la inyección (SOI), afectan significativamente la combustión, el rendimiento, las emisiones y la durabilidad de un motor diésel de inyección directa common rail (CRDI). La configuración experimental consistió en un motor monocilíndrico instrumentado con la posibilidad de variar los parámetros de inyección de combustible junto con un sistema de análisis y adquisición de datos de combustión de alta velocidad en línea. En los motores de encendido por compresión de inyección directa (DICI), la vaporización del combustible y las características de transferencia de calor afectan la mezcla de aire y combustible, que también está influenciada por los tiempos de FIP y SOI. Estos parámetros de inyección controlan significativamente la tasa de aumento de presión (ROPR) y la tasa de liberación de calor (HRR), que a su vez afectan la transferencia de calor del cilindro del motor, así como la potencia de salida del motor (Agarwal et al., 2018)

Evaluación experimental equipado con inyección directa common rail (CRDi) y unidad de control electrónico (ECU). Se ha establecido que el tiempo de inyección retardado y las gotas de combustible más pequeñas reducen simultáneamente las emisiones de NO<sub>x</sub> y de humo de un motor diésel típico. Por lo tanto, la prueba del motor se llevó a cabo utilizando combustible diésel a 1500 rpm, por debajo del 50% al 100% de la potencia de frenado a plena carga, a varios tiempos de inyección retardados y presiones de inyección más altas. Se observa un retardo de encendido reducido, una combustión mejorada y una reducción simultánea de óxidos de nitrógeno y emisiones de humo con un modesto deterioro del rendimiento cuando el motor funciona a una presión de inyección de 500 bar y con una sincronización de inyección de 16 ° antes del punto muerto superior (Marri et al., 2021)

El efecto de las mezclas superiores de alcohol sobre el rendimiento y los parámetros de emisión del motor CRDI CI con varias tasas de EGR. El 1-pentanol tiene propiedades combustibles



mejoradas en comparación con los alcoholes inferiores El rendimiento del motor se reduce con una mayor proporción de 1-pentanol en la mezcla. La investigación experimental mostró que para P30D70 se observó una caída de aproximadamente 3.8% en BTE, un aumento de 9.14% en BSFC, una caída de 16.7% en la emisión de NOx y un ligero aumento en la emisión de HC y CO al 60% de carga. El buen funcionamiento del motor se observó con mezclas de 1-pentanol / diésel y se puede concluir que hasta un 30% del 1-pentanol se puede utilizar como alternativa al diésel con un ligero costo de rendimiento(Santhosh et al., 2020)

### **Control de humos**

Las emisiones de partículas y NOx de los motores diésel son los mayores desafíos que se enfrentan para hacer que los motores diésel sean ambientalmente benignos. Las medidas adoptadas para reducir la emisión de partículas gravimétricas para cumplir con las regulaciones de emisión vigentes no siempre necesariamente reducen la concentración del número de partículas, lo que tiene profundos efectos adversos para la salud. Por lo tanto, es importante investigar el efecto de los parámetros de inyección de combustible, especialmente la presión de inyección de combustible y el inicio de los tiempos de inyección sobre el tamaño de las partículas y la distribución del número en los gases de escape de diésel. En el presente estudio, se utiliza un motor de investigación de un solo cilindro para la evaluación experimental de los efectos de las estrategias de inyección de combustible y el inicio de la sincronización de la inyección de combustible sobre el número de partículas, el área de superficie y las distribuciones de concentración de volumen mediante el uso del medidor de partículas de escape del motor (EEPS). espectrómetro. Se han llevado a cabo investigaciones a tres presiones de inyección de combustible diferentes (300, 500, 750 bar) y cuatro tiempos diferentes de inicio de inyección. Los datos experimentales indican que la concentración del número de tamaño de partículas aumenta con el aumento de la carga del motor (BMEP) y se reduce con el aumento de la presión de inyección de combustible(Agarwal et al., 2013)

Los automóviles, como medio de transporte, tienen una gran importancia en nuestro día a día. La potencia propulsora de los automóviles se obtiene principalmente sometiendo combustibles líquidos o gaseosos a base de petróleo a la combustión dentro de los motores. Los productos de combustión emitidos por dichos motores de combustión interna se han convertido en un motivo

de preocupación debido al aumento del calentamiento global, los problemas de visibilidad que surgen debido a la formación de smog, las enfermedades respiratorias y de otro tipo en los seres humanos y la decoloración de monumentos y estructuras. Emisiones como óxidos de nitrógeno (NO<sub>x</sub>), dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), monóxido de carbono (CO), hidrocarburos (HC) y humo son altamente dañinas para el ecosistema. Existe una necesidad urgente de reducir los contaminantes nocivos de los gases de escape de los motores de los automóviles. Con la aplicación de técnicas como el encendido por compresión de carga homogénea, el encendido por compresión de carga premezclada y la inyección directa de riel común, y adaptando las modificaciones del combustible, estas emisiones de escape nocivas pueden reducirse significativamente. En este artículo se presenta una revisión del trabajo realizado por diversos investigadores utilizando tales técnicas y sistemas (Rahul Chowta et al., 2021)

El efecto de las mezclas de biodiesel Karanja al 10%, 20% y 50% en la tasa de inyección, atomización, rendimiento del motor, emisiones y características de combustión del sistema de inyección de combustible de tipo common rail de inyección directa (CRDI) en un motor de investigación de un solo cilindro. a presiones de inyección de combustible de 300, 500, 750 y 1000 bar a diferentes tiempos de inicio de inyección y velocidad constante del motor de 1500 rpm. La duración de la inyección de combustible disminuyó ligeramente al aumentar la proporción de mezcla de biodiesel (Karanja Oil Methyl Ester: KOME) y disminuyó significativamente al aumentar la presión de inyección de combustible. El perfil de la tasa de inyección y el diámetro medio de Sauter (D<sub>32</sub>) de las gotas de combustible están influenciados por la presión de inyección. El aumento de la presión de inyección de combustible generalmente mejora la eficiencia térmica de los combustibles de prueba. El diámetro medio de Sauter (D<sub>32</sub>) y el diámetro medio aritmético (D<sub>10</sub>) disminuyeron con la disminución del contenido de biodiésel Karanja en la mezcla y aumentaron significativamente para mezclas más altas debido a la densidad y viscosidad del combustible relativamente más altas. Se observó la máxima eficiencia térmica en el mismo momento de inyección para mezclas de biodiesel y diésel mineral. Las mezclas de biodiésel de menor Karanja (hasta un 20%) mostraron menores emisiones de hidrocarburos específicos de frenos (BSHC) y monóxido de carbono (BSCO) en comparación con el diésel mineral. Para las mezclas de biodiésel de menor Karanja, la duración de la combustión fue más corta que la del diésel mineral; sin embargo, a presiones de inyección de combustible más altas, la duración de la combustión del 50% de la mezcla fue más larga que la del diésel mineral. Hasta un 10% de mezclas

de biodiésel Karanja en motores CRDI mejoran la eficiencia térmica de los frenos y reducen las emisiones, sin ningún requisito de cambios de hardware o recalibración de la ECU (Agarwal, Dhar, et al., 2015)

El biodiésel, como producto de la reacción de transesterificación de material graso, está ganando reconocimiento en todo el mundo y confirma su efecto beneficioso sobre la reducción de gases de escape cuando (incluso parcialmente) se utiliza para alimentar motores de encendido por compresión. En particular, se ha prestado muy poca atención a la posibilidad de utilizar biocombustibles en motores modernos CRDI (Common Rail Direct Injection) con tecnología de inyección dividida. También se dispone de información limitada sobre motores que funcionan con biodiésel de origen animal y su rendimiento y emisiones para dichos combustibles. Se utilizaron ésteres metílicos de manteca de cerdo, obtenidos en laboratorio mediante un proceso de transesterificación alcalina en un solo paso como biocomponente, y diésel mineral para obtener mezclas de B25, B50, B75 (25%, 50% y 75% de concentración de biocomponente en volumen). Se examinaron los parámetros fisicoquímicos de B25, B50, B75, ésteres puros y diésel mineral para determinar si los combustibles cumplían con los estándares de calidad. Las mezclas se utilizaron para alimentar un motor Andoria CRDI de 2.6 L colocado en un banco de pruebas de dinamómetro. Las pruebas se llevaron a cabo en funcionamiento en régimen permanente, a velocidades de rotación cuando se producen dos estrategias de inyección diferentes (inyección única y dos inyecciones posteriores), también se introdujeron diferentes condiciones de carga durante las pruebas. El estudio ha confirmado la capacidad de utilizar mezclas de diésel y biodiésel que contienen hasta un 75% de biocomponentes en un motor CRDI moderno sin problemas operativos. Se ha observado un pequeño deterioro de los parámetros de rendimiento del combustible con una proporción creciente de biodiésel. El consumo de combustible específico de los frenos aumentó en promedio un 3,2%, 8,5% y 13,8% para B25, B50 y B75, respectivamente. Se observó una reducción promedio de la eficiencia de conversión de combustible de los frenos, que asciende a 1.6%, 4.8% y 7.8% para B25, B50 y B75, respectivamente. También se observó una reducción significativa de las emisiones de gases de escape (excluyendo NOx) y opacidad en todas las condiciones de operación examinadas. La concentración total de hidrocarburos se redujo en un máximo de 72% para la mezcla B75 para una velocidad de 1500 RPM y 100 Nm de carga. El mejor rendimiento de emisiones se observó en condiciones de funcionamiento cuando se

produjo una preinyección breve al principio de la fase de compresión, antes de la inyección principal de combustible (Mikulski et al., 2016). Los biocombustibles de origen animal producidos en laboratorio (se habían utilizado manteca de cerdo y de pavo como materia prima para la producción de biocombustible) se evaluaron en términos de parámetros fisicoquímicos y se compararon con el combustible diésel mineral comercial y su mezcla con ésteres metílicos de aceite de colza. El estudio confirmó que se puede obtener combustible de alta calidad a partir de material graso de desecho. Las mezclas que contienen hasta un 75% de biocomponente son adecuadas para los motores de combustión CRDI modernos, aunque se puede esperar un ligero deterioro de los parámetros de rendimiento del motor. El consumo medio de combustible específico de los frenos aumentó en un 13% en comparación con la referencia, para las mezclas de biodiésel derivadas de materias grasas animales. Al mismo tiempo, se registró un aumento del 3% frente a la mezcla de aceite de colza / diésel. Esto se correlacionó con una reducción menor de la eficiencia de conversión de combustible de los frenos, pero la caída promedio no superó el 2% para todos los biodiésel examinados. Se observó una reducción significativa en las emisiones de gases de escape, al comparar la operación de biocombustible con el diésel de referencia. El uso de una mezcla de éster metílico de manteca de cerdo / diésel provocó una reducción promedio de la concentración de hidrocarburos (THC) en un 13%, monóxido de carbono (CO) en un 22% y dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) en un 7%. Los resultados de las emisiones de biodiésel de pavo fueron respectivamente: 9%, 20% y 6% reducidos. La emisión de NO<sub>x</sub> aumentó en promedio un 7% para ambos biocombustibles de origen animal (Duda et al., 2018)

### **Conclusiones y recomendaciones**

En este trabajo se presenta las aplicaciones, la creación de procesos y los resultados del análisis sobre la gestión y el control del sistema de inyección electrónica riel común, su lógica y características principales en los motores diésel.

La evolución de la gestión del sistema de inyección depende del comportamiento, prestaciones y emisiones regidas por las normas contaminantes locales o internacionales para su calibración de software del motor de acuerdo con la gama y requerimiento del mercado, con el fin proteger a partir de los límites mecánicos, electrónicos y encontrar la eficiencia del motor.

El control de la inyección electrónica del motor, debe ser capaz de mejorar el rendimiento del motor, la combustión y controlar las emisiones de los motores de encendido por compresión, la

tecnología de inyección directa riel común ofrece posibilidades ilimitadas al controlar los parámetros de inyección de combustible, ya que estos sistemas son bastante complejos y utilizan una gran cantidad de sensores, hardware y circuitos que precisan el requerimiento de flexibilización de los motores.

### Referentes bibliográficos

1. Agarwal, A. K., Dhar, A., Gupta, J. G., Kim, W. Il, Choi, K., Lee, C. S., & Park, S. (2015). Effect of fuel injection pressure and injection timing of Karanja biodiesel blends on fuel spray, engine performance, emissions and combustion characteristics. *Energy Conversion and Management*, 91, 302–314. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2014.12.004>
2. Agarwal, A. K., Dhar, A., Gupta, J. G., Kim, W. Il, Lee, C. S., & Park, S. (2014). Effect of fuel injection pressure and injection timing on spray characteristics and particulate size-number distribution in a biodiesel fuelled common rail direct injection diesel engine. *Applied Energy*, 130, 212–221. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2014.05.041>
3. Agarwal, A. K., Dhar, A., Srivastava, D. K., Maurya, R. K., & Singh, A. P. (2013). Effect of fuel injection pressure on diesel particulate size and number distribution in a CRDI single cylinder research engine. *Fuel*, 107, 84–89. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2013.01.077>
4. Agarwal, A. K., Gupta, P., & Dhar, A. (2015). Combustion, performance and emissions characteristics of a newly developed CRDI single cylinder diesel engine. *Sadhana - Academy Proceedings in Engineering Sciences*, 40(6), 1937–1954. <https://doi.org/10.1007/s12046-015-0428-9>
5. Agarwal, A. K., Singh, A. P., Maurya, R. K., Chandra Shukla, P., Dhar, A., & Srivastava, D. K. (2018). Combustion characteristics of a common rail direct injection engine using different fuel injection strategies. *International Journal of Thermal Sciences*, 134, 475–484. <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2018.07.001>
6. Akehurst, S., & Piddock, M. (2008). A novel approach to investigating advanced boosting strategies of future diesel engines. *Institution of Mechanical Engineers: Combustion Engines and Fuels Group - Internal Combustion Engines: Performance, Fuel Economy and Emissions*, 261–276.

7. Baert, R. S. G., Beckman, D. E., & Veen, A. (1999). Efficient EGR technology for future HD diesel engine emission targets. SAE Technical Papers. <https://doi.org/10.4271/1999-01-0837>
8. Cheong, J., Cho, S., & Kim, C. (2000). Effect of Variable Geometry Turbocharger on HSDI Diesel Engine. Seoul 2000 FISITA World Automotive Congress, 1–5.
9. Duda, K., Wierzbicki, S., Śmieja, M., & Mikulski, M. (2018). Comparison of performance and emissions of a CRDI diesel engine fuelled with biodiesel of different origin. *Fuel*, 212, 202–222. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2017.09.112>
10. Feneley, A. J., Pesiridis, A., & Andwari, A. M. (2017). Variable Geometry Turbocharger Technologies for Exhaust Energy Recovery and Boosting-A Review. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (Vol. 71, pp. 959–975). <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.125>
11. Hashimoto, M., Aoyagi, Y., Kobayashi, M., Murayama, T., Goto, Y., & Suzuki, H. (2012). BSFC improvement and NOx reduction by sequential turbo system in a heavy duty diesel engine. SAE Technical Papers. <https://doi.org/10.4271/2012-01-0712>
12. İlçin, K., & Altun, Ş. (2021). Effect of biodiesel addition in a blend of isopropanol-butanol-ethanol and diesel on combustion and emissions of a CRDI engine. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects*. <https://doi.org/10.1080/15567036.2021.1928797>
13. Joshua, A., Prabhakaran, B., & Vignesh, A. (2020). CFD analysis of turbocharger with wastegate. *AIP Conference Proceedings*, 2283. <https://doi.org/10.1063/5.0025994>
14. Kai Kuhlbach, D.-I., Franz Brinkmann, D.-I., Jürgen Werner, D.-I., Timm Kiener, D.-I., & Michael Becker, D.-I. (2013). Innovative Two-Stage Turbocharging System with Cooled Regulating Valve for Gasoline Engines. 22nd Aachen Colloquium Automobile and Engine Technology.
15. Karolys, B., Llanes-Cedeño, E., Vega, W., Cevallos, S., & Rocha-Hoyos, J. (2019). Effect of Injection Parameters and Emission characteristics in a Common-Rail Direct Injection Diesel Engine in Height Conditions: A Review. *Journal of Engineering Science & Technology Review*, 12(3).
16. Kohketsu, S., Mori, K., Sakai, K., & Hakozaki, T. (1997). EGR technologies for a turbocharged and intercooled heavy-duty diesel engine. SAE Technical Papers.



<https://doi.org/10.4271/970340>

17. Liu, X., Yu, L., Liu, F., Wu, W., & Wang, R. (2010). Design for control system of wastegate valve actuator in turbocharger. Proceedings - 2010 International Conference on Digital Manufacturing and Automation, ICDMA 2010, 1, 514–517. <https://doi.org/10.1109/ICDMA.2010.110>
18. Marri, V. B., Kotha, M. M., & Gaddale, A. P. R. (2021). Experimental investigations on the influence of higher injection pressures and retarded injection timings on a single cylinder CRDi diesel engine. International Journal of Ambient Energy, 42(4), 444–457. <https://doi.org/10.1080/01430750.2018.1540017>
19. Mikulski, M., Duda, K., & Wierzbicki, S. (2016). Performance and emissions of a CRDI diesel engine fuelled with swine lard methyl esters-diesel mixture. Fuel, 164, 206–219. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2015.09.083>
20. Ortenzi, F., Genovese, A., Carrazza, M., Rispoli, F., & Venturini, P. (2018). Exhaust Energy Recovery with Variable Geometry Turbine to Reduce Fuel Consumption for Microcars. SAE Technical Papers, 2018-Septe. <https://doi.org/10.4271/2018-01-1825>
21. Payri González, F., & Desantes Fernández, J. M. (2011). Motores de combustión interna alternativos. Editorial Universitat politècnica de valencia.
22. Pfeifer, A., Smeets, M., Herrmann, H. O., Tomazic, D., Richert, F., & Schloer, A. (2002). A new approach to boost pressure and EGR rate control development for HD truck engines with VGT. SAE Technical Papers. <https://doi.org/10.4271/2002-01-0964>
23. Rahul Chowta, P., Murthy, K., & Mahesha, G. T. (2021). Emission control studies in homogeneous charge compression ignition, premixed charge compression ignition and common rail direct injection engines—a review. Biofuels, 12(4), 363–368. <https://doi.org/10.1080/17597269.2019.1657660>
24. Ryder, O., & Sharp, N. (2010). The impact of future engine and vehicle drivetrains on turbocharging system architecture. 9th International Conference on Turbochargers and Turbocharging - Institution of Mechanical Engineers, Combustion Engines and Fuels Group, 1–10. <https://doi.org/10.1243/17547164C0012010001>
25. Santhosh, K., Kumar, G. N., Radheshyam, & Sanjay, P. V. (2020). Experimental analysis of performance and emission characteristics of CRDI diesel engine fueled with 1-

- pentanol/diesel blends with EGR technique. Fuel, 267. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2020.117187>
26. Tang, H., Pennycott, A., Akehurst, S., & Brace, C. J. (2015). A review of the application of variable geometry turbines to the downsized gasoline engine. In *International Journal of Engine Research* (Vol. 16, Issue 6, pp. 810–825). <https://doi.org/10.1177/1468087414552289>
27. Tange, H., Ikeya, N., Takanashi, M., & Hokari, T. (2003). Variable geometry diffuser of turbocharger compressor for passenger vehicles. *SAE Technical Papers*. <https://doi.org/10.4271/2003-01-0051>
28. Yin, Y., Liu, Z., Zhuge, W., Zhao, R., Zhao, Y., Chen, Z., & Mi, J. (2016). Experimental study on the performance of a turbocompound diesel engine with variable geometry turbocharger. *International Journal of Fluid Machinery and Systems*, 9(4), 332–337. <https://doi.org/10.5293/IJFMS.2016.9.4.332>
29. Zhu, D., Sun, Z., & Zheng, X. (2020). Turbocharging strategy among variable geometry turbine, two-stage turbine, and asymmetric two-scroll turbine for energy and emission in diesel engines. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy*, 234(7), 900–914. <https://doi.org/10.1177/0957650919891355>