



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

ESTUDO SOBRE A APLICAÇÃO DA RECIRCULAÇÃO DE GASES DE ESCAPE (EGR) NA REDUÇÃO DE EMISSÕES

STUDY ON THE APPLICATION OF EXHAUST GAS RECIRCULATION (EGR) IN EMISSIONS REDUCTION

SILVA, Vinicius Augusto Bersi¹; BARROS, Jessé da Silva²; MORITA, Eugênio de Souza Morita³;

¹ Aluno do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Francisco; ² Aluno do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Francisco; ³ Professor do Curso de Engenharia Mecânica da Universidade São Francisco

E-mail dos autores principais

vinicius.bersi@mail.usf.edu.br¹

jesse.barros@mail.usf.edu.br²

RESUMO. O aumento da frota de veículos no Brasil tem sido significativo. De acordo com o Ministério dos Transportes, a frota nacional de veículos aumentou de 45.029.257 em 2006 para 115.116.532 em 2022, um aumento de 155,65% em 16 anos. Isso representa uma média de 4,3 milhões de veículos adicionados à frota a cada ano. Com o aumento da frota de veículos, as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx) também aumentaram. O óxido de nitrogênio é emitido principalmente pelo escapamento de veículos e pela queima de combustíveis fósseis, como carvão, óleo, óleo diesel e gás natural. O Brasil é o principal emissor de óxido nítrico na América Latina e no Caribe, sendo responsável por cerca de 40% das emissões na região. Com o objetivo de padronizar e harmonizar as avaliações de emissões ambientais de motores a diesel, o INMETRO teve a iniciativa de organizar o Ensaio de Proficiência de Emissões em Motores – 1ª Rodada - Ciclo Diesel. Para isso, foram analisadas as emissões dos seguintes parâmetros: CO, CO₂, HC, NOx, Material Particulado e Consumo g/kWh. Foram utilizados dois itens de comparação: um motor Diesel cedido pela empresa MWM e um motor Diesel cedido pela empresa Cummins. Os ensaios de proficiência ocorreram no período de 29/07/2019 a 07/01/2021. Atualmente existem alguns métodos utilizados para a redução de contaminantes tais como Recirculação de Gases de Escape (EGR). Catalisadores de Redução Seletiva (SCR); Injeção de Água ou Soluções de Ureia; Combustíveis Alternativos e Controle Avançado do Motor. Este trabalho aborda a utilização da Recirculação de Gases de Escape (EGR). A técnica conhecida como “Sistema de Recirculação de Gases de Escape (EGR)” é empregada em motores de combustão interna para diminuir a emissão de óxidos de nitrogênio (NOx). O método consiste em recircular parte dos gases de escape (entre 5% e 53%,) de volta para a câmara de combustão o que reduz a temperatura da combustão e, conseqüentemente, a produção de NOx. A taxa de utilização da EGR é proporcional à redução de emissão de NOx. Com a adoção da legislação ambiental PROCONVE P7, em vigor no Brasil desde 2012, os limites de emissão de poluentes por motores movidos a diesel foram reduzidos, tornando necessário o uso de novas tecnologias como a válvula EGR e portanto, o sistema desempenha um papel crucial na redução das emissões de NOx dos motores a diesel, ajudando a mitigar os impactos ambientais do aumento da frota de veículos no Brasil. Existem dois tipos de válvulas EGR: operada a vácuo, normalmente encontrada apenas em veículos mais antigos, e a operada a vácuo e controlada eletronicamente, usada na maioria dos veículos modernos. Espera-se que este estudo possa contribuir para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão da qualidade do ar no Brasil.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Palavras-chave: Motor a diesel; Recirculação de gases de escape; Emissões; Eficiência de conversão de combustível; Geração de energia.

ABSTRACT. The increase in the vehicle fleet in Brazil has been significant. According to the Ministry of Transport, the national vehicle fleet increased from 45,029,257 in 2006 to 115,116,532 in 2022, an increase of 155.65% in 16 years. This represents an average of 4.3 million vehicles added to the fleet each year. With the increase in the vehicle fleet, nitrogen oxide (NO_x) emissions have also increased. Nitrogen oxide is mainly emitted by vehicle exhaust and the burning of fossil fuels such as coal, oil, diesel oil and natural gas. Brazil is the main emitter of nitrous oxide in Latin America and the Caribbean, being responsible for around 40% of emissions in the region. With the aim of standardizing and harmonizing the assessments of environmental emissions from diesel engines, INMETRO took the initiative to organize the Engine Emissions Proficiency Test – 1st Round - Diesel Cycle. To this end, emissions of the following parameters were analyzed: CO, CO₂, HC, NO_x, Particulate Matter and Consumption g/kWh. Two comparison items were used: a Diesel engine provided by the company MWM and a Diesel engine provided by the company Cummins. The proficiency tests took place from 07/29/2019 to 01/07/2021. Currently there are some methods used to reduce contaminants such as Exhaust Gas Recirculation (EGR); Selective Reduction Catalysts (SCR); Water Injection or Urea Solutions; Alternative Fuels and Advanced Engine Control. This work addresses the use of Exhaust Gas Recirculation (EGR). The technique known as “Exhaust Gas Recirculation System (EGR)” is used in internal combustion engines to reduce the emission of nitrogen oxides (NO_x). The method consists of recirculating part of the exhaust gases (between 5% and 53%) back to the combustion chamber, which reduces the combustion temperature and, consequently, the production of NO_x. The EGR utilization rate is proportional the reduction of NO_x emissions. With the adoption of the PROCONVE P7 environmental legislation, in force in Brazil since 2012, the pollutant emission limits from diesel-powered engines were reduced, making it necessary to use new technologies such as the EGR valve and therefore, the system plays a crucial role in reducing NO_x emissions from diesel engines, helping to mitigate the environmental impacts of the increase in the vehicle fleet in Brazil. There are two types of EGR valves: vacuum-operated, typically found only in older vehicles, and vacuum-operated, electronically controlled, used in most modern vehicles. It is hoped that this study can contribute to the development of effective air quality management strategies in Brazil.

Keywords: Diesel engine; Exhaust gas recirculation; Emissions; Fuel conversion efficiency; Power generation

INTRODUÇÃO

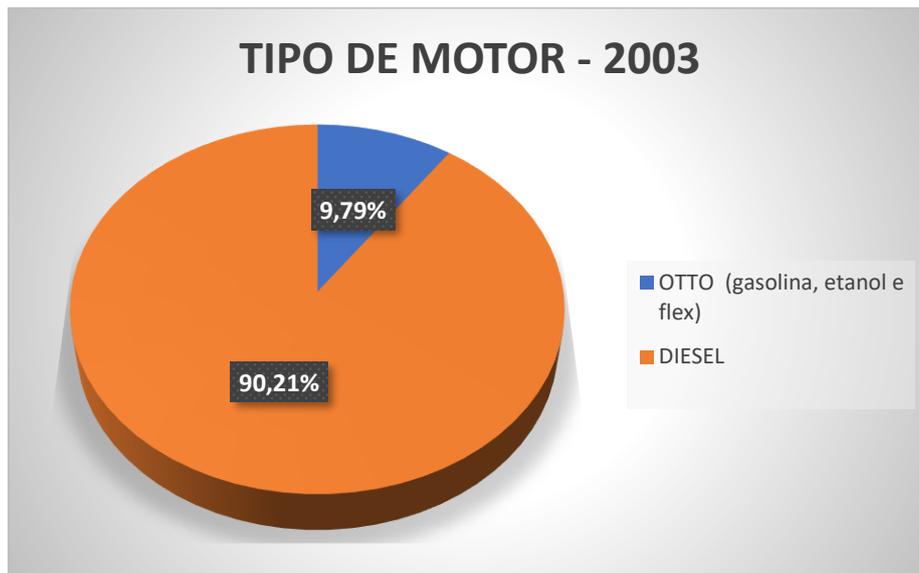
A mobilidade urbana é um dos principais desafios enfrentados pelas cidades modernas. Com o crescimento populacional e o desenvolvimento econômico, a demanda por transporte tem aumentado significativamente. Conforme dados da ANFAVEA, a frota de veículos Brasil, tem crescido a um ritmo acelerado.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

De acordo com dados na Figura 1 do Departamento Nacional de Trânsito (DENATRAN, 2022), em 2003 a frota de veículos licenciados no Brasil contava com mais de 36.858.501 veículos, dos quais 90,21% possuíam motores de ciclo OTTO (gasolina, etanol e flex) e 9,79% eram equipados com motores de ciclo Diesel.

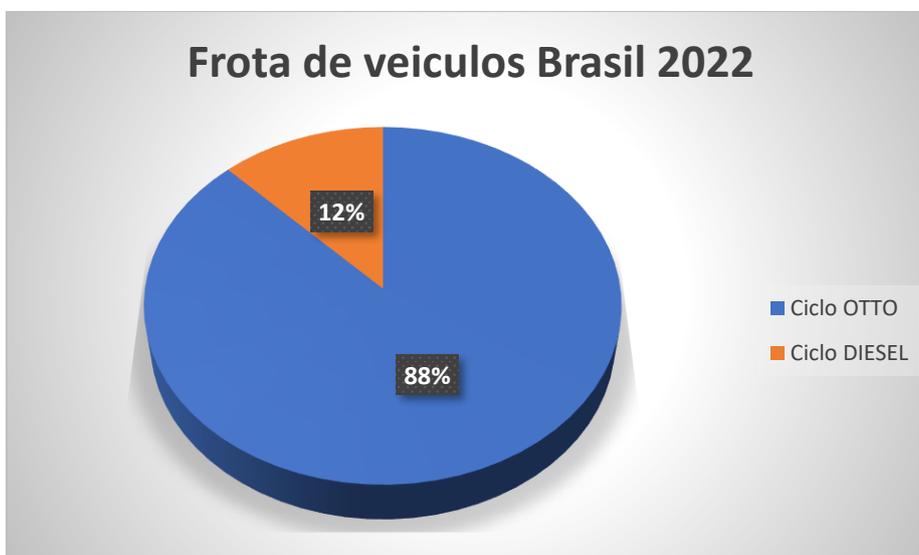
Figura 1 – Tipo de motor (Ciclo Otto x Ciclo Diesel no ano de 2003).



Fonte: Denatran (2022).

Os dados do DENATRAN na Figura 2 demonstram que a frota de veículos no Brasil teve crescimento de 342% nos últimos 20 anos chegando a 115.116.532 unidades licenciadas sendo que 87,74% dos veículos possuem motor de ciclo OTTO e 12,26 % possuem motor ciclo Diesel.

Figura 2 – Tipo de motorização da Frota de veículos (Ciclo Otto x Ciclo Diesel no ano de 2022).



Fonte: Denatran (2022).

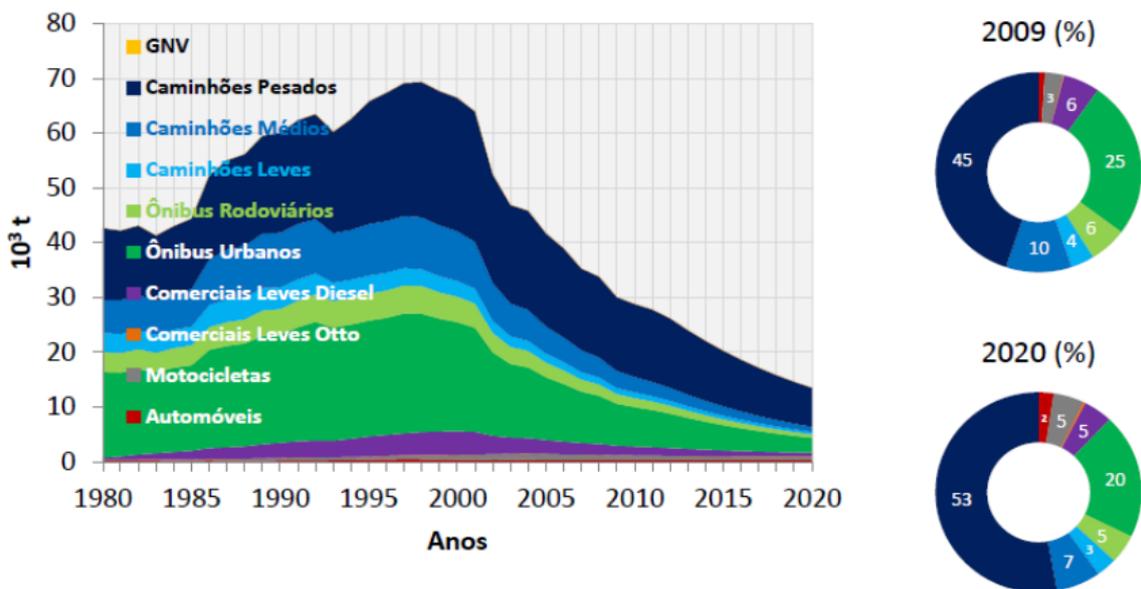


TRABALHO DE GRADUAÇÃO

No ano de 2022, o relatório de evolução da regulamentação de emissões atmosféricas de poluentes no Brasil (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE et al., 2022) mostrou que os veículos equipados com motores do ciclo diesel emitiam 95% do material particulado presente nas avaliações realizadas no ano de 2009 e o percentual em 2020 foi de 93 % (Figura 3).

Figura 3 – Emissões de material particulado de acordo com a categoria de veículos.

Emissões de MP por categoria de veículos

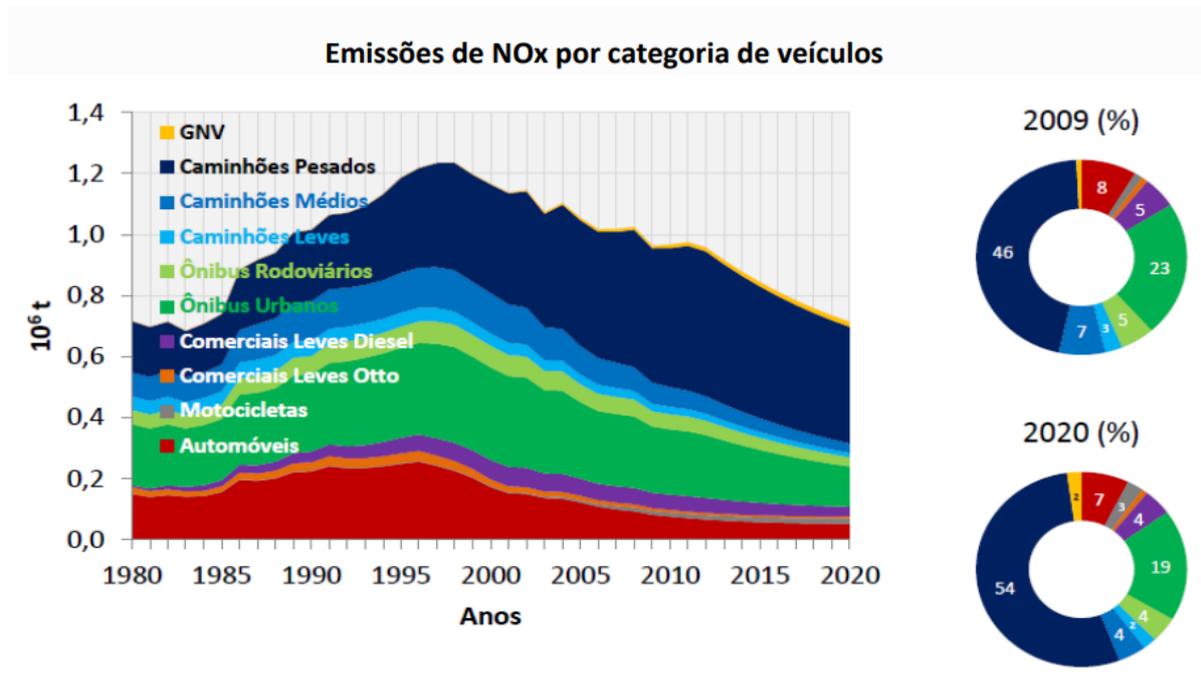


Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2022).

No mesmo relatório do Ministério do Meio Ambiente, a Figura 4 demonstra que os veículos do ciclo diesel contribuíam com 83% das emissões de Oxido de Nitrogênio (NO_x).



Figura 4 – Emissões de NOx de acordo com a categoria de veículos.



Fonte: Ministério do Meio Ambiente (2022).

O crescimento da frota circulante leva a um aumento nas emissões de poluentes atmosféricos. Entre esses poluentes, os óxidos de nitrogênio (NO_x) são de particular preocupação devido aos seus efeitos prejudiciais à saúde humana e ao meio ambiente. Os óxidos de nitrogênio são gases reativos que contribuem para a formação de *smog* fotoquímico e chuva ácida, além de terem sido associados a uma série de problemas de saúde, incluindo doenças respiratórias e cardiovasculares.

Conforme esclarece a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB), as principais fontes de emissão de particulado para a atmosfera são veículos automotores, processos industriais, queima de biomassa, ressuspensão de poeira do solo, entre outros. Ainda segundo o site oficial da CETESB, O material particulado pode também se formar na atmosfera a partir de gases como dióxido de enxofre (SO₂), óxidos de nitrogênio (NO_x) e compostos orgânicos voláteis (COVs), que são emitidos principalmente em atividades de combustão, transformando-se em partículas como resultado de reações químicas no ar.

De acordo com o estudo técnico da Confederação Nacional de Municípios (2023, P1)

A grande quantidade de veículos nos municípios não só agrava problemas de congestionamentos, que elevam o tempo de viagens e geram impactos econômicos para usuários e população em geral, assim como contribuem para aumento da sinistralidade, forte impacto na infraestrutura viária, agravamento dos problemas de saúde e de estresse, poluição sonora e ambiental, sendo este último responsável pela emissão do material particulado, gases de efeito estufa, entre vários outros problemas associados.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Sob a denominação geral de material particulado encontra-se um conjunto de poluentes constituídos de poeiras, fumaças e todo tipo de material sólido e líquido que se mantém suspenso na atmosfera por causa de seu pequeno tamanho. As principais fontes de emissão de particulado para a atmosfera são: veículos automotores, processos industriais, queima de biomassa, ressuspensão de poeira do solo, entre outros (JUNIOR et al. 2013). A formação do material particulado é bastante complexa e envolve uma sequência de etapas reacionais (pirólise, nucleação, crescimento e coagulação, agregação e oxidação), podendo causar sérios danos à saúde humana (DE MENEZES et al., 2008).

De acordo com a publicação X-ENGINEER, 2023,

O processo de combustão da mistura ar-combustível dentro de um motor de combustão interna é incompleto. Por conseguinte, os gases de escape contêm emissões poluentes tais como: monóxido de carbono (CO), óxidos de azoto (NO_x), hidrocarbonetos (HC) e partículas em suspensão (PM). Todas as emissões poluentes dos motores de combustão interna têm efeitos nocivos na vida humana e no ambiente (X-ENGINEER, 2023).

As concentrações dos poluentes emitidos por veículos automotores diferem em relação ao tipo de motor/tecnologia, tipo de combustível, idade, manutenção, assim como em função do modo de condução do veículo (AGUIAR et al., 2015). Os principais poluentes emitidos por veículos automotores são, entre outros, o monóxido de carbono (CO), os óxidos de nitrogênio (NO_x), os hidrocarbonetos não metano (NMHC), o material particulado (MP), os aldeídos (RCHO) e os óxidos de enxofre (SO_x) (AGUILAR-GÓMEZ et al., 2009; CETESB, 2016).

Com o intuito de controlar a poluição veicular no Brasil, o Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) criou o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) em 1986 (Resolução nº 18/1986). Para complementar o PROCONVE em função do crescimento do uso de motocicletas e veículos similares, em 2002 foi instituído o Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares (PROMOT), por meio da Resolução CONAMA nº 297/2002 (IBAMA, 2011; BRASIL, 2013; SOUZA et al., 2013).

Com o objetivo de atestar o desempenho dos laboratórios na determinação dos valores ideais na de avaliação de contaminantes oriundos de emissões atmosféricas por motores ciclo DIESEL, o INMETRO propôs e coordenou a realização de um Ensaio de Proficiência – EP aos laboratórios participantes. Tal ação demandou uma série de mudanças na estrutura técnica que vinha sendo empregada antes, como um controle maior dos itens de ensaio, neste caso dos motores ciclo diesel, e na análise estatística para o tratamento dos dados, onde foi inserido o z-score, ferramenta poderosa de comparação dos resultados do EP.

O estudo abrange a análise das emissões em motores Diesel cedidos por empresas renomadas, MWM e Cummins, durante o primeiro Ensaio de Proficiência em Motores Ciclos Diesel. A metodologia inclui a avaliação de parâmetros críticos para a qualidade do ar, como CO, CO₂, HC, NO_x, Material Particulado e Consumo g/kWh. Os participantes foram divididos em dois grupos, o Grupo A responsável pela análise do motor da MWM, e o Grupo B, encarregado do motor da Cummins.

A abordagem incorpora não apenas a comparação dos resultados obtidos, mas também destaca a importância do Ensaio de Proficiência como ferramenta de qualidade, proporcionando aos participantes a oportunidade de revisar e aprimorar seus procedimentos



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

analíticos, promovendo, assim, a confiabilidade contínua dos resultados de medições em um contexto de evolução tecnológica, incluindo avanços como a utilização da EGR (Recirculação de Gases de Escape).

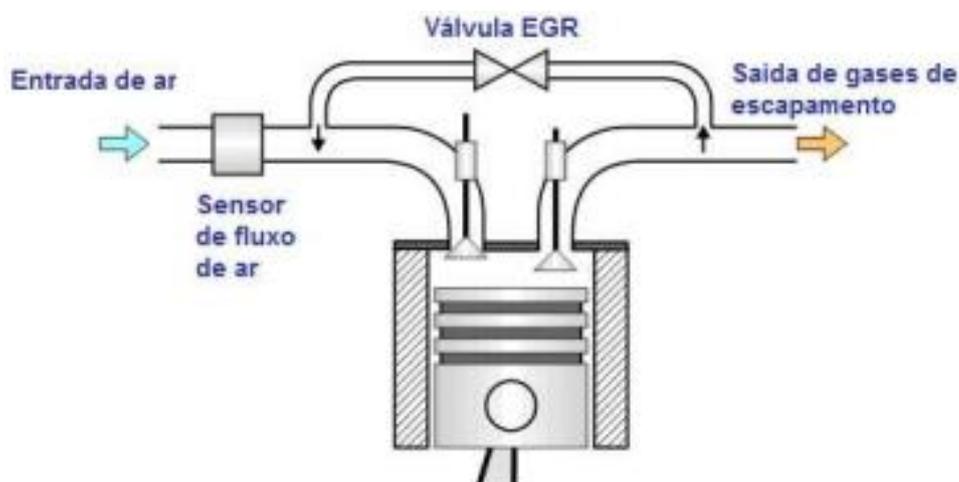
Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo de explorar o papel da válvula EGR (Exhaust Gas Recirculation) na mitigação das emissões de NOx

Esse método de controle teve sua aplicação inicial na década de 1970, nos veículos automotores à gasolina, ignição por centelha (ciclo Otto). Em meados de 2000, expandiu-se para os motores a Diesel utilizados no mercado americano com o objetivo de minimizar as emissões de NOx na atmosfera.

O sistema EGR opera reciclando uma porção dos gases de escape do motor de volta para a câmara de combustão. De acordo com BASSO, A recirculação dos gases de escape arrefecidos baixa as temperaturas da câmara de combustão reduzindo, assim, a formação de óxidos de nitrogênio.

Ainda, de acordo com BASSO, O funcionamento do sistema de recirculação de gases de escape EGR (Figura 5), tem seu funcionamento da seguinte forma, os gases de escape são captados imediatamente após os gases saírem dos cilindros do MCI, controlados pela válvula EGR e direcionados novamente para a parte de admissão, assim resultando na menor quantidade de oxigênio entrando nos cilindros, onde menos oxigênio produz uma temperatura de combustão mais baixa. Encontra-se localizada em um tubo entre o coletor de escape e o coletor de admissão e seu funcionamento baseia-se no vácuo (onde vácuo é qualquer pressão menor que a pressão atmosférica), criado no lado da admissão assim controlando a abertura e fechamento da válvula.

Figura 5 –Representação esquemática da EGR.



Fonte: DIESELNET (2007).

A válvula EGR é uma tecnologia que tem sido amplamente utilizada em motores a diesel para reduzir as emissões de NOx, reciclando parte dos gases de escape de volta para a câmara de combustão.

A história do desenvolvimento do EGR é um testemunho do compromisso da indústria com a inovação e a sustentabilidade. Desde a sua concepção nas décadas de 1960 e 1970, quando as preocupações ambientais começaram a influenciar o design dos motores, até os



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

sistemas EGR de alta eficiência encontrados nos veículos modernos, a trajetória do EGR reflete os avanços contínuos na tecnologia (Fonte, ano).

Existem dois tipos principais de válvulas de recirculação de gases de escape (EGR): a versão operada por vácuo, frequentemente presente em veículos mais antigos, e a variante controlada eletronicamente, com acionamento por vácuo, predominante nos veículos modernos. A funcionalidade básica da válvula envolve a abertura para permitir a passagem dos gases de escape pelo sistema EGR, contribuindo assim para o controle das emissões do veículo.

Em resumo, o sistema EGR é uma parte vital dos motores modernos, contribuindo para a redução das emissões de poluentes e o cumprimento das regulamentações ambientais. No entanto, é importante salientar que o sistema EGR pode falhar e requer manutenção regular para garantir seu funcionamento adequado.

Espera-se que este estudo possa contribuir para o desenvolvimento de estratégias eficazes de gestão da qualidade do ar no Brasil e ajudar a informar as políticas públicas nesta área.

CONTEXTUALIZAÇÃO

O crescente interesse na redução das emissões de poluentes provenientes de motores a combustão interna destaca a necessidade urgente de desenvolvimento e implementação de técnicas eficazes de controle de óxidos de nitrogênio (NOx). Esses compostos são uma classe de poluentes atmosféricos formados durante o processo de combustão em motores, contribuindo significativamente para a poluição do ar e seus efeitos adversos na saúde humana e no meio ambiente.

Os motores a combustão interna, amplamente utilizados em veículos automotores e em diversas aplicações industriais, são uma fonte significativa de emissões de NOx devido às altas temperaturas e pressões alcançadas durante o ciclo de combustão. Os óxidos de nitrogênio contribuem para a formação de smog, chuva ácida e têm sido associados a problemas respiratórios e cardiovasculares em seres humanos.

Para abordar esse desafio ambiental, uma variedade de técnicas de controle de NOx têm sido desenvolvidas e implementadas. Algumas dessas técnicas incluem:

- **Recirculação de Gases de Escape (EGR):** A EGR envolve a reintrodução de uma parte dos gases de escape no cilindro do motor, reduzindo assim a temperatura de combustão e minimizando a formação de NOx.
- **Catalisadores de Redução Seletiva (SCR):** Os catalisadores SCR utilizam agentes redutores, como ureia, para converter NOx em nitrogênio e água. Essa técnica é amplamente empregada em veículos a diesel e em instalações industriais.
- **Injeção de Água ou Soluções de Ureia:** A injeção direta de água ou soluções de ureia no processo de combustão pode reduzir as temperaturas e limitar a formação de NOx.
- **Combustíveis Alternativos:** A utilização de combustíveis alternativos, como gás natural ou biocombustíveis, pode resultar em menores emissões de NOx em comparação com os combustíveis convencionais.
- **Controle Avançado do Motor:** O desenvolvimento de estratégias avançadas de controle do motor, como a otimização da sincronização de válvulas e injeção de combustível, pode contribuir para uma combustão mais eficiente e, portanto, reduzir as emissões de



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

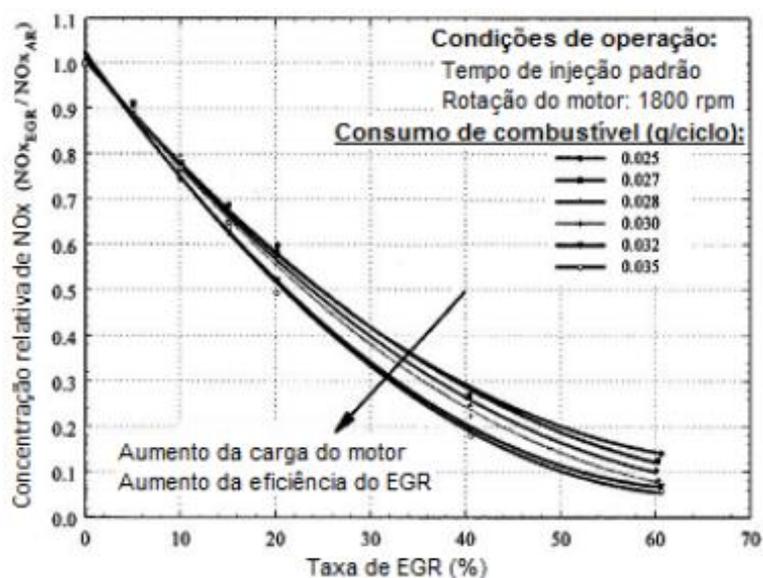
NOx.

Além dessas abordagens, a pesquisa contínua está focada no desenvolvimento de tecnologias inovadoras e sustentáveis para enfrentar o problema das emissões de NOx. O avanço em materiais catalíticos, sensores e sistemas de controle está impulsionando a evolução dessas técnicas, visando não apenas a conformidade com regulamentações ambientais cada vez mais rigorosas, mas também a promoção de práticas sustentáveis na indústria automotiva e em outros setores. A busca por soluções eficazes no controle de NOx é crucial para mitigar os impactos ambientais e proteger a qualidade do ar para as gerações presentes e futuras.

JUSTIFICATIVA

Observa-se na Figura 6 que sistema de recirculação de gases de escape (EGR) representa uma abordagem promissora e eficaz para enfrentar os desafios das regulamentações ambientais e simultaneamente melhorar a eficiência dos motores a combustão interna. Este sistema tem sido uma peça fundamental nas estratégias adotadas pela indústria automotiva e outros setores para reduzir as emissões poluentes, em especial os óxidos de nitrogênio (NOx).

Figura 6 – Representação da redução de Nox com o aumento percentual da taxa de EGR aplicada.



Fonte: ZHENG (2004).

A função principal do sistema EGR é recircular uma parte dos gases de escape produzidos durante o processo de combustão de volta ao sistema de admissão de ar do motor. Essa recirculação tem impactos diretos na dinâmica da combustão, resultando em benefícios ambientais e operacionais significativos:

- Redução de Emissões de NOx: Ao reintroduzir os gases de escape na câmara de combustão, o sistema EGR reduz a temperatura e a quantidade de oxigênio disponível, inibindo a formação de óxidos de nitrogênio. Esse processo tem se mostrado eficaz na conformidade com regulamentações ambientais mais rigorosas, que frequentemente



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

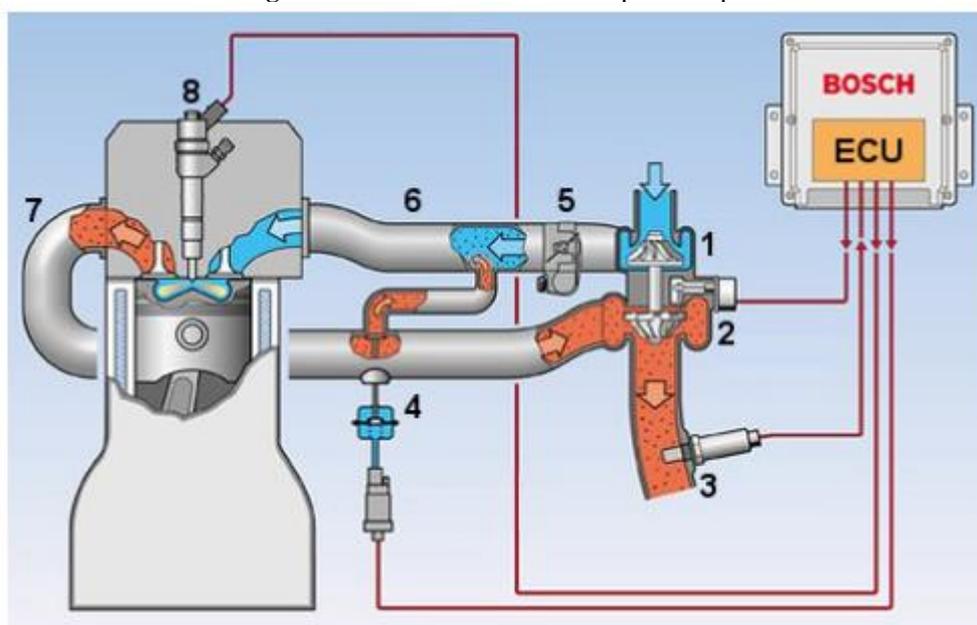
- estabelecem limites estritos para as emissões de poluentes.
- **Melhoria na Eficiência do Combustível:** A implementação bem-sucedida do EGR contribui para uma operação mais eficiente do motor. Ao controlar a temperatura e a pressão no cilindro, o sistema EGR otimiza a eficiência da combustão, resultando em um consumo de combustível mais eficiente e na redução das emissões de dióxido de carbono (CO₂).
 - **Sustentabilidade Ambiental:** O EGR desempenha um papel fundamental na promoção da sustentabilidade ambiental ao abordar diretamente as emissões de poluentes. Isso é particularmente crucial em um cenário global onde a conscientização sobre as mudanças climáticas e a qualidade do ar é cada vez maior.
 - **Adaptação a Diferentes Contextos:** O sistema EGR é altamente adaptável a uma variedade de motores e aplicações, sendo utilizado em veículos de passeio, caminhões, maquinário industrial e motores estacionários. Sua versatilidade o torna uma escolha valiosa para a conformidade regulatória em diversos setores.
 - **Integração com Outras Tecnologias:** O EGR pode ser integrado com outras tecnologias de controle de emissões, como catalisadores de redução seletiva (SCR), para oferecer soluções mais abrangentes. Essa abordagem integrada fortalece ainda mais a capacidade dos motores em atender a padrões ambientais mais exigentes.

No contexto do sistema de um motor a combustão da Figura 7, diversos componentes desempenham papéis fundamentais para garantir seu funcionamento eficiente. O processo inicia-se com o compressor (1), responsável por comprimir o ar que é direcionado para o coletor de admissão (6). Simultaneamente, a turbina (2), movida pelos gases de escape, impulsiona o ciclo do turbo. O sensor de oxigênio (3) desempenha um papel crucial, monitorando a concentração de oxigênio nos gases de escape e fornecendo dados essenciais para o ajuste da mistura ar-combustível. A Válvula EGR (4), com atuação eletropneumática, possibilita a recirculação de uma porção dos gases de escape, contribuindo para a redução das emissões. O acelerador (5) controla a quantidade de ar admitida, influenciando diretamente na potência do motor. Os coletores de admissão (6) e de escape (7) direcionam, respectivamente, o ar para as câmaras de combustão e os gases resultantes da queima para fora do motor. Por fim, o injetor de combustível (8) realiza a pulverização precisa, desempenhando um papel vital na eficiência e desempenho global do motor. Essa integração sinérgica e coordenada entre esses oito componentes é essencial para o funcionamento harmonioso e eficaz do sistema de propulsão.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 7 – Sistema de EGR de alta pressão aplicada.



Fonte: Robert Bosch GmbH.

OBJETIVOS

O objetivo deste estudo é realizar uma análise da eficácia do sistema de recirculação de gases de escape (EGR) na redução de emissões de óxidos de nitrogênio (NO_x), explorando seus benefícios ambientais, desafios associados e o impacto resultante no desempenho dos motores. A pesquisa visa fornecer *insights* sobre como a implementação do sistema EGR contribui para a conformidade com regulamentações ambientais, examinando também seu papel na otimização da eficiência do combustível e na mitigação dos impactos ambientais associados aos motores a combustão interna.

METODOLOGIA

A metodologia adotada para este Trabalho sobre o estudo da aplicação da Recirculação de Gases de Escape (EGR) na redução de emissões de Óxidos de Nitrogênio (NO_x) em motores a combustão interna foi a revisão bibliográfica. Esta abordagem sistemática permitiu uma análise abrangente da literatura existente sobre o tema, proporcionando uma visão completa e detalhada do funcionamento da válvula EGR e seu papel na redução de emissões de NO_x.

A fim de avaliar como a distribuição de EGR entre os cilindros do motor, precisa ser considerado que as vazões de ar disponíveis nas saídas do coletor não são idênticas. Tal asserção é justificado devido ao fato de que o trajeto que o fluido percorre até encontrar cada saída de ar não é o mesmo para cada cilindro, impondo desta forma diferentes perdas de carga ao escoamento.

Entre os diversos aperfeiçoamentos que foram implementados nas EGRs estão Comandos eletrônicos com motores de passo (Step motors), o que permite à PCM monitorar a posição da abertura da borboleta e comandar a própria abertura ao mesmo tempo além de



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

trocadores de calor que utilizam o sistema de refrigeração do motor (fluido do radiador) a fim de diminuir a temperatura dos gases de escape antes da recirculação, permitindo uma melhora significativa no rendimento. A abertura/fechamento da válvula que comanda a refrigeração também é monitorada, permitindo à PCM comandar a temperatura do gás recirculado com precisão.

Segundo Muraro, 2016, p39, A válvula EGR serve para reutilizar uma porcentagem dos gases que saem da queima na câmara de combustão, serem redirecionados de volta para ela sendo assim queimados e evitando que sejam liberados no ar pelo escapamento do veículo. (Muraro, 2016, p39).

De acordo com Vlassov (2007), um aumento da temperatura de combustão de 1773 K para 2273K provoca um aumento de 38 vezes na quantidade de NOx gerada. Assim, de maneira geral, para diminuir a formação de NOx é necessário reduzir a temperatura na zona de combustão.

De acordo com WARK et al, 1998, A temperaturas de combustão elevadas, formam-se óxidos de nitrogênio na câmara de combustão do motor. A temperatura de combustão na câmara de combustão é reduzida através da recirculação de parte dos gases de escape para o ar de admissão fresco. Devido à baixa temperatura de combustão, a formação de óxidos de nitrogênio é reduzida.

Segundo Squaiella 2010, a válvula EGR diminui cerca de 10 vezes a emissão de NOx dos motores a diesel com ajustes para se encaixar nas normas da Conama Fase IV (Euro III), para a Euro VI em vigor desde 2014 na Europa.

Basicamente a válvula irá se abrir em um percentual “solicitado” pela PCM (Power Control Module - Módulo de Controle de Potência - que controla o motor) sempre que necessário, de acordo com uma tabela que leva em consideração todos os parâmetros de aceleração, rotação, admissão de ar, saídas dos catalisadores, avanço da injeção (tanto nos motores ciclo Otto como nos motores Diesel) entre outros, o PCM então, através de um *software*, irá calcular qual o percentual da válvula que ficará aberto nestas condições.

Conforme MORAES, 2010 a taxa de EGR deverá ser calculada com base na vazão de ar e gás EGR de cada cilindro. O percentual de abertura da válvula obedece à Equação 1:

$$EGR(\%)_{CilX} = \left(\frac{\dot{m}_{EGR_{CilX}}}{\dot{m}_{EGR_{CilX}} + \dot{m}_{Air_{CilX}}} \right) \times 100 \quad (\text{Equação 1})$$

Onde:

- x é o número do cilindro avaliado;
- $\dot{m}_{pontoEGR_{CilX}}$ é a vazão de gás de escapamento reciclada [kg/s];
- $\dot{m}_{pontoAir_{CilX}}$ é a vazão de ar admitida pelo motor [kg/s];
- $EGR(\%)$ é a taxa de EGR [%].

De acordo com MORAES, 2010, para comparação dos resultados obtidos com as simulações das três configurações de misturadores, o índice que representa a qualidade da mistura de gás EGR entre os cilindros é dada pela Equação 2:



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

$$D_{Cil\ X} = \frac{EGR(\%)_{Cil\ X}}{\sum_{z=1}^n EGR(\%)_{Cil\ Z}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 2})$$

Onde:

- $DCilx$ é o índice que mede qualidade da mistura de EGR fornecida para o cilindro X [-];
- EGR_{Cilx} é a taxa de EGR para o cilindro X [%];
- n é o número de cilindros do motor.

Ainda, de acordo com MORAES, 2010, O valor ideal de $Dcilx$ é calculado conforme mostrado na Equação 3:

$$D_{Cil\ Ideal} = \frac{100}{n} \quad (\text{Equação 3})$$

$$D_{Cil\ Ideal} = \frac{100}{4} = 25 \quad (\text{Equação 4})$$

Onde:

- n é o número de cilindros do motor;
- $DCil_{ideal}$ é o índice que mede qualidade da mistura de EGR fornecida para o

Desta forma, para um motor de quatro cilindros o valor ideal será 25 (Eq. 4).

De acordo com MORAES, 2010, quando a taxa de utilização do EGR for abaixo de 25% significa que o cilindro está recebendo uma taxa de EGR aquém do especificado. Quando a taxa for superior a 25%, significa que o cilindro está recebendo uma taxa maior do que especificado.

O ar fresco de admissão contém quantidades insignificantes de CO_2 , enquanto a porção reciclada carrega uma quantidade substancial de CO_2 produzido pela combustão, que aumenta com a taxa de fluxo de EGR e a carga do motor. Assim, a comparação das concentrações de CO_2 nos gases de escape do motor (CO_{2_exh}) e na admissão (CO_{2_EGR}) é uma maneira prática de determinar a taxa de EGR de acordo com:

$$EGR (\%) = \frac{(CO_{2_EGR} - CO_{2_atm})}{(CO_{2_exh} - CO_{2_atm})} \quad (\text{Equação 5})$$

Para este trabalho apresentou-se uma configuração experimental vinda de um artigo de 2017, *Effects of EGR rate on performance and emissions of a dieselpower generator fueled by B7*, a fim de mostrar os resultados de emissões de um motor ciclo Diesel em diferentes cargas e porcentagem de utilização da EGR.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

O motor utilizado foi de um gerador de energia a diesel modelo MWM D229-4, apresentando 4 cilindros e um ciclo de 4 tempos. O tipo de injeção empregado é direto, com um diâmetro de 102 mm e curso de 120 mm, resultando em uma cilindrada total de 3.922 litros. A ordem de ignição dos cilindros é 1-3-4-2, e sua potência máxima, alcançada a 1800 rpm, é de 44 kW. O motor opera com aspiração natural, possui uma relação de compressão de 17:1 e utiliza água como refrigerante.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise focou no entendimento do funcionamento da válvula EGR, seus benefícios e limitações em diferentes tipos de motores a combustão interna, e seu papel específico na redução de emissões de NOx. De acordo com (ZHENG et al., 2004). Conforme a razão de EGR é aumentada, uma redução significativa de emissão de gases NOx é observada.

O padrão ISO 3046-1:2002 foi empregado para ajustar a potência de carga e o consumo de combustível para condições padronizadas. O motor foi operado a 1800 rpm com diferentes cargas, tanto com EGR quanto sem, e os resultados foram comparados. As taxas de EGR utilizadas foram 0% (EGR0), 2,5% (EGR2.5), 5,0% (EGR5), 7,5% (EGR7.5) e 10,0% (EGR10).

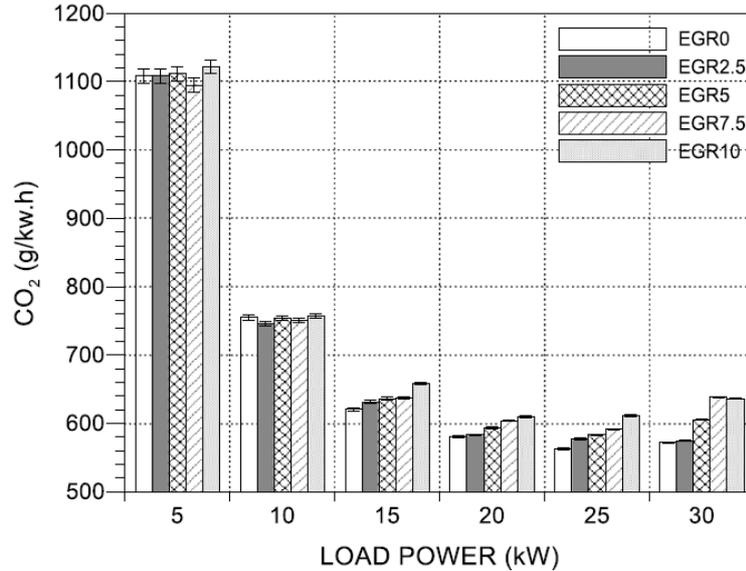
A carga do motor foi medida por um transdutor elétrico com incerteza de $\pm 1\%$. A pressão no cilindro foi medida por um transdutor de pressão piezoelétrico com resolução de $\pm 0,5\%$. As emissões totais de HC foram analisadas por um detector de ionização de chama aquecido (HFID) com resolução de ± 1 ppm. As emissões de NOx foram analisadas por um analisador quimiluminescente aquecido (HCLD) com resolução de ± 1 ppm. As emissões de CO e CO₂ foram medidas por analisadores infravermelhos não dispersivos (NDIR) com resolução de ± 1 ppm e $\pm 0,01\%$, respectivamente. Os efeitos do EGR nas emissões de CO₂, CO e THC são ilustrados nas figuras 8, 9 e 10.

A variação notada no nível de CO₂, conforme mostrado na Figura 8, pode ser atribuída ao fato de que o ar fresco de admissão possui quantidades insignificantes desse gás, ao passo que a fração de EGR carrega consigo uma quantidade considerável. Essa quantidade aumenta proporcionalmente à taxa de fluxo de EGR e à carga do motor. As maiores elevações nas emissões de CO₂ foram de 11,6% e 11,2% para taxas de EGR de 7,5% e 10%, respectivamente, na carga de 30 kW. Em cargas de motor de 10 kW ou inferiores, a taxa de EGR não exerceu um impacto significativo nas emissões de dióxido de carbono.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 8 – Variação das emissões de dióxido de carbono (CO₂) com a taxa de EGR e carga.



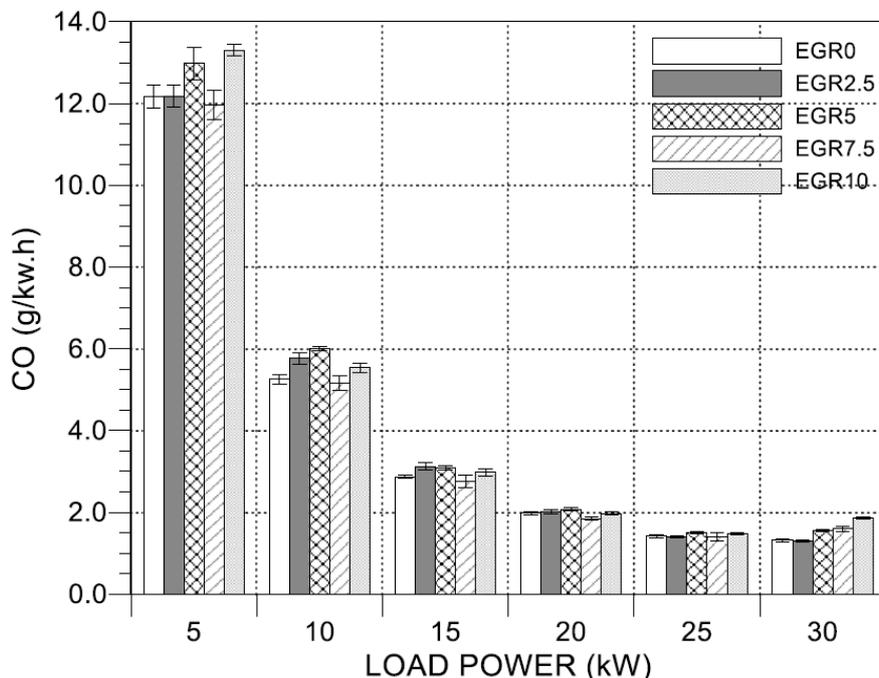
Fonte: *Effects of EGR rate on performance and emissions of a dieselpower generator fueled by B7.*

O maior aumento de monóxido de carbono foi observado na Figura 9 para EGR de 10% e carga de 30 kW, de 41,7%. As emissões de monóxido de carbono resultam de combustão incompleta e são amplamente dependentes da relação ar-combustível. O aumento na taxa de EGR reduz a disponibilidade de oxigênio na câmara de combustão e retarda as taxas de reação da mistura ar-combustível, resultando em temperaturas mais baixas. Nesse caso, a propagação da chama pode não ser sustentada com misturas relativamente pobres. Assim, a mistura heterogênea não queima completamente, resultando em maiores emissões de CO e THC, como observado na maioria das situações.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 9 – Variação das emissões de monóxido de carbono (CO) com a taxa de EGR e carga.

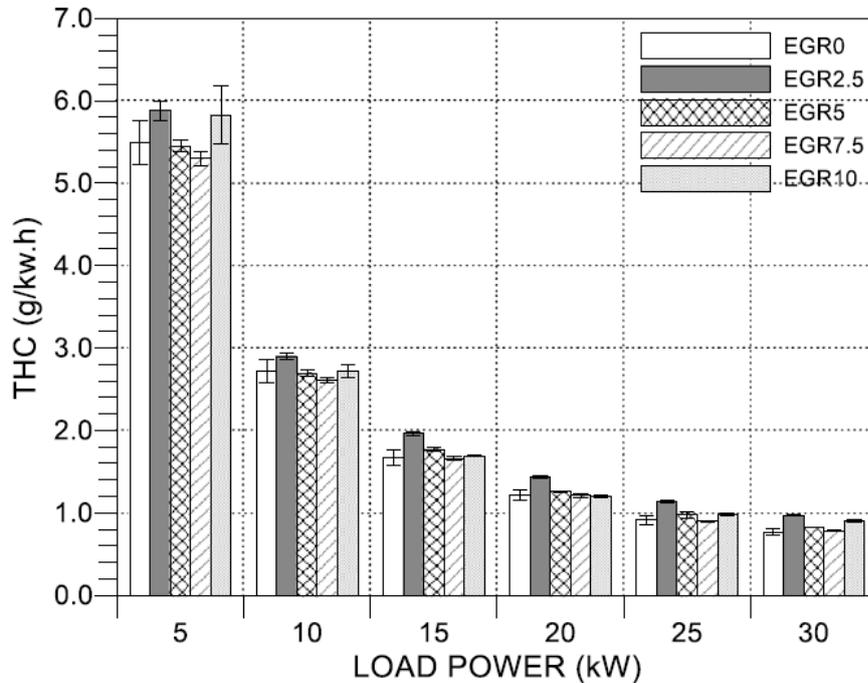


Fonte: *Effects of EGR rate on performance and emissions of a dieselpower generator fueled by B7.*

As emissões específicas de THC, Figura 10, apresentaram os maiores aumentos em comparação com EGR0 para a EGR mínima (EGR2.5) em qualquer carga ou carga máxima (30 kW). O incremento máximo registrado foi de 27,4% para 2,5% de EGR a 30 kW. Reduções nas emissões de THC foram observadas com 5% de EGR e carga de 10 kW ou menos, e 7,5% de EGR com carga de 25 kW ou menos. Em cargas elevadas, o aumento do THC é atribuído à maior injeção de combustível para atender à demanda, resultando em maiores quantidades de combustível não queimado. Com 2,5% de EGR, embora a carga de ar de admissão e a quantidade de injeção de combustível não tenham sido significativamente modificadas em comparação com EGR0. A presença do gás de escape recirculado foi suficiente para intensificar a combustão incompleta, gerando hidrocarbonetos não queimados. Com taxas de EGR mais altas, houve uma redução significativa do ar de admissão no cilindro e, conseqüentemente, da disponibilidade de oxigênio no gás. No entanto, o enriquecimento da mistura usando um combustível oxigenado contrabalançou os efeitos adversos da baixa disponibilidade de oxigênio, evitando um aumento na formação de hidrocarbonetos.



Figura 10 – Variação das emissões totais de hidrocarbonetos com a taxa de EGR e carga.



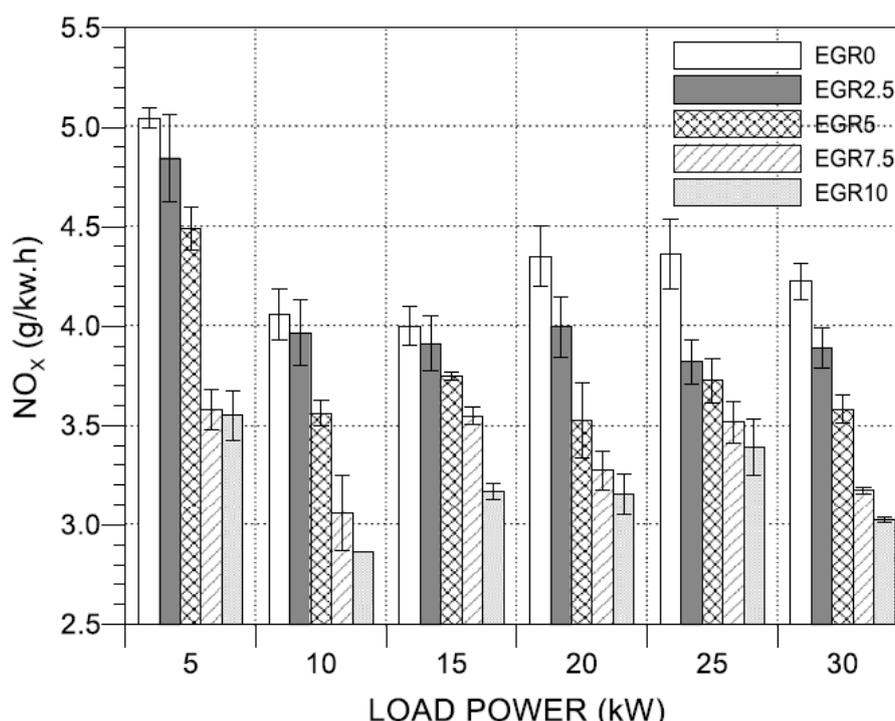
Fonte: *Effects of EGR rate on performance and emissions of a diesel power generator fueled by B7.*

A Figura 11 revela que as emissões específicas de NO_x diminuem à medida que a taxa de EGR aumenta em toda a faixa de carga do motor analisada. Essa tendência pode ser explicada pela redução da disponibilidade de oxigênio devido à substituição de parte do oxigênio na carga de ar fresco de admissão pelo gás de escape recirculado. Esse fenômeno resulta em uma redução na temperatura local da chama devido à expansão espacial da chama causada pela diminuição na fração molar de oxigênio. Além disso, ocorre um efeito térmico devido ao aumento na capacidade de calor específico médio dos gases na zona de combustão, uma vez que o gás de escape recirculado contém CO₂ e H₂O com uma capacidade de calor específico maior do que a do ar. Por fim, há uma redução na temperatura de combustão devido a reações químicas endotérmicas, como a dissociação de CO₂ e H₂O. Utilizando 10% de EGR, as reduções nas emissões de NO_x variaram de 20,8% a 29,6% para as diversas cargas. Com 2,5% de EGR, a diminuição nas emissões de NO_x variou de 2,2% a 12,5%.



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

Figura 11 – Variação das emissões de óxidos de nitrogênio com a taxa de EGR e carga.



Fonte: *Effects of EGR rate on performance and emissions of a dieselpower generator fueled by B7.*

CONCLUSÃO

O presente estudo sobre a aplicação da Recirculação de Gases de Escape (EGR) na redução de emissões de Óxidos de Nitrogênio (NO_x) em motores a combustão interna, especialmente em veículos do ciclo diesel, ressalta a significativa contribuição desse sistema para mitigar os impactos ambientais e promover a sustentabilidade na indústria automotiva.

Os resultados obtidos ao longo da pesquisa evidenciam que a implementação eficiente da EGR pode resultar em consideráveis reduções nas concentrações de NO_x, substâncias altamente prejudiciais à qualidade do ar e à saúde humana. Essa conclusão reforça a importância de direcionar esforços e investimentos no aprimoramento contínuo desse sistema em veículos do ciclo diesel.

Vale destacar que a busca por alternativas mais limpas e eficientes na queima de combustíveis fósseis é crucial diante dos desafios ambientais contemporâneos. A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de atender a normativas mais rigorosas de emissões impulsionam a relevância da EGR como uma estratégia viável e comprovada para atenuar os impactos negativos dos motores a combustão interna.

Além disso, a eficácia da EGR não se limita apenas à redução de NO_x, pois ela também pode contribuir para melhorias no consumo de combustível, aumentando a eficiência energética dos motores. Essa perspectiva não apenas alinha-se com as exigências regulatórias em constante



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

evolução, mas também reflete uma abordagem proativa na busca por soluções que beneficiem tanto o meio ambiente quanto a eficiência operacional dos veículos.

Portanto, a conclusão deste estudo reforça a validade e a relevância de investir em pesquisas e desenvolvimentos contínuos na implementação da EGR em motores a ciclo diesel. O comprometimento com tecnologias mais limpas não apenas responde às demandas ambientais globais, mas também posiciona a indústria automotiva na vanguarda da inovação sustentável, promovendo um futuro mais limpo e saudável para as gerações futuras. A Figura 11 revela que as emissões específicas de NO_x diminuem à medida que a taxa de EGR aumenta em toda a faixa de carga do motor analisada. Essa tendência pode ser explicada pela redução da disponibilidade de oxigênio devido à substituição de parte do oxigênio na carga de ar fresco de admissão pelo gás de escape reciclado. Esse fenômeno resulta em uma redução na temperatura local da chama devido à expansão espacial da chama causada pela diminuição na fração molar de oxigênio. Além disso, ocorre um efeito térmico devido ao aumento na capacidade de calor específico médio dos gases na zona de combustão, uma vez que o gás de escape reciclado contém CO_2 e H_2O com uma capacidade de calor específico maior do que a do ar. Por fim, há uma redução na temperatura de combustão devido a reações químicas endotérmicas

REFERÊNCIAS

AGUIAR, S.O.; ARAÚJO, R.S.; CAVALCANTE, F.S.Á.; BERTONCINI, B.V.; LIMA, R.K.C.; OLIVEIRA, M.L.M. (2015) **Avaliação das emissões de escapamento veicular em condições específicas do motor: partida e marcha-lenta**. Transportes, v. 23, n. 2, p. 35-43. <http://doi.org/10.14295/transportes.v23i3.896>

HEYWOOD, J.B. Internal Combustion Engine Fundamentals. Segunda edição. Ed. New York: Mc-Graw Hill, 2018.

SERIO, D.D.; OLIVEIRA, A.D.; SODRÉ, J.R. **Effects of EGR rate on performance and emissions of a dieselpower generator fueled by B7**. J Braz. Soc. Mech. Sci. Eng. 9 p. Março/2017

AGUILAR-GÓMEZ, J.A.; GARIBAY-BRAVO, V.; TZINTZUN-CERVANTES, G.; CRUZ-JIMATE, I.; ECHÁNIZ-PELLICER, G. (2009) **Mobile source emission estimates using remote sensing data from Mexican cities**. In: ANNUAL INTERNATIONAL EMISSION INVENTORY CONFERENCE, COMPREHENSIVE INVENTORIES – LEVERAGING TECHNOLOGY AND RESOURCES, 18., 2009, Baltimore, Maryland. Anais... Baltimore: U.S. EPA.

Desenvolvimento e tecnologias avançadas de motores de combustão com injeção direta, Volume 2: Motores diesel, editado por Hua Zhao, CRC Press, 2010

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS (IBAMA). (2011) Programa de controle da poluição do ar por veículos automotores – Proconve/Promot/ Ibama. 3 ed. Brasília: Ibama/Diqua. 584 p



TRABALHO DE GRADUAÇÃO

JUNIOR, A. M et al. Projeto de monitoramento da qualidade do ar em porto alegre, Porto Alegre: ISBN, 2013.

MORAES, HERICKSON FARIA DE; Análise numérica do escoamento da mistura de ar e EGR em coletores de admissão com misturador do tipo pré-câmara e tipo anel / Herickson Faria de Moraes. Campinas, SP: [s.n.], 2010.

DE MENEZES, E. W., CATALUNÃ, R. Amostragem de material particulado e fração orgânica volátil das emissões em motor diesel sem a utilização de túnel de diluição. Química Nova, v. 31, n. 8, p. 2027-2030, 2008.

SOUZA, C.D.R.; SILVA, S.D.; SILVA, M.A.V.; D'AGOSTO, M.A.; BARBOZA, A.P. (2013) Inventory of conventional air pollutants emissions from road transportation for the state of Rio de Janeiro. Energy Policy, v. 53, p. 125-135.
Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2012.10.021>. Acesso em: novembro/2023.

X-ENGINEER. Exhaust Gas Recirculation (EGR) complete guide – introduction. 2023.
Disponível em: <https://x-engineer.org/exhaust-gas-recirculation-egr-introduction/> . Acesso em: 27 out. 2023.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE et al. EVOLUÇÃO DA REGULAMENTAÇÃO DE EMISSÕES ATMOSFÉRICAS DE POLUENTES NO BRASIL-Relatório. 2022.

SQUAIELLA, LUCAS LÁZARO FERREIRA. Efeitos do Sistema de Recirculação dos Gases de Escape no Controle de Emissões de Nox em Motores a Diesel. 2010. 138 p. Dissertação (Mestrado Profissional) – Engenharia Mecânica – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

VLASOV, D.. Fundamentos da Combustão. Programa Brasileiro de Formação em Motores e Combustíveis, 2007.

WARK, K., WARNER, C.F., DAVIS, W.T. (1998) Air Pollution: Its Origin and Control. 3rd Edition, Addison Wesley Longman Inc., Menlo Park, 573 p.

ZHENG, M.; READER, G.T.; HAWLEY, J.G.. Diesel engine exhaust gas recirculation – a review on advanced and novel concepts. Elsevier, Energy Conversion & Management nº 45, p. 883-900, 2004