

**ASSOCIAÇÃO EDUCACIONAL DOM BOSCO
FACULDADE DE ENGENHARIA DE RESENDE
CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**ALAN MARTINS DOMINGUES
HAILA CÂNDIDO DOS REIS**

**ENGENHARIA MECÂNICA ALIADA À SUSTENTABILIDADE:
ESTUDO DE CASO COMPARATIVO DAS ATUALIZAÇÕES EM UM SISTEMA DE
EXAUSTÃO DE UM VEÍCULO PESADO DEVIDO À TRANSIÇÃO DA NORMA
PROCONVE P-7 PARA P-8**

RESENDE/RJ

2022

ALAN MARTINS DOMINGUES

HAILA CÂNDIDO DOS REIS

**ENGENHARIA MECÂNICA ALIADA À SUSTENTABILIDADE:
ESTUDO DE CASO COMPARATIVO DAS ATUALIZAÇÕES EM UM SISTEMA DE
EXAUSTÃO DE UM VEÍCULO PESADO DEVIDO À TRANSIÇÃO DA NORMA
PROCONVE P-7 PARA P-8**

Trabalho de Graduação apresentado à Associação Educacional Dom Bosco, Faculdade de Engenharia de Resende, como requisito parcial para a obtenção do diploma de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. MSc. Anderson Elias Furtado

RESENDE/RJ

2022

Catálogo na fonte
Biblioteca Central da Associação Educacional Dom Bosco – Resende-RJ

D671	<p>Domingues, Alan Martins</p> <p>Engenharia mecânica aliada à sustentabilidade: estudo de caso comparativo das atualizações em um sistema de exaustão de um veículo pesado devido à transição da norma PROCONVE P-7 para P-8 / Alan Martins Domingues; Haila Cândido dos Reis - 2022.</p> <p>64f.</p> <p>Orientador: Anderson Elias Furtado</p> <p>Trabalho de conclusão de curso apresentado como requisito parcial à finalização do curso de Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia de Resende da Associação Educacional Dom Bosco.</p> <p>1. Engenharia. 2. Engenharia mecânica. 3. Motor diesel. 4. Sistema de exaustão. 5. Redução catalítica. 6. PROCONVE. 7. Sustentabilidade. I. Reis, Haila Cândido dos. II. Furtado, Anderson Elias. III. Faculdade de Engenharia de Resende. IV. Associação Educacional Dom Bosco. V. Título.</p> <p>CDU 629.33(043)</p>
------	--

ALAN MARTINS DOMINGUES
HAILA CÂNDIDO DOS REIS

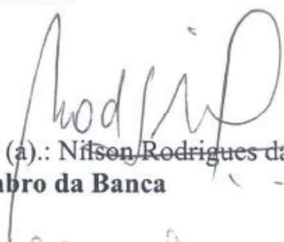
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO
PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE
“GRADUADO EM ENGENHARIA MECÂNICA”

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELA BANCA EXAMINADORA

BANCA EXAMINADORA:



Prof. (a): Anderson Elias Furtado
Orientador



Prof. (a): Nilson Rodrigues da Silva
Membro da Banca



Prof. (a): Juliana Gonçalves Fernandes
Membro Externo

Novembro, 2022.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos em primeiro lugar a Deus por ter nos concedido saúde e inteligência para superar todas as dificuldades e conseguir chegar aonde hoje estamos.

À Faculdade de Engenharia de Resende por ter dado a oportunidade de realizar este curso.

Agradecemos ao nosso orientador, Anderson Elias Furtado, pela paciência, dedicação e ensinamentos que possibilitaram que realizássemos este trabalho.

Agradecemos de forma especial aos nossos pais, por não medirem esforços para que pudéssemos levar nossos estudos.

RESUMO

DOMINGUES, Alan Martins; REIS, Haila Cândido dos. **Engenharia Mecânica Aliada À Sustentabilidade: Estudo De Caso Comparativo Das Atualizações Em Um Sistema De Exaustão De Um Veículo Pesado Devido À Transição Da Norma PROCONVE P-7 Para P-8.** 2022. Resende, RJ. Monografia (Bacharel em Engenharia Mecânica) AEDB.

Em meio a um aumento da preocupação mundial com a emissão de gases poluentes por veículos movidos a motores de combustão interna e em busca de alternativas para redução dos danos ao meio ambiente e à saúde humana, o governo brasileiro e as empresas privadas avançam em medidas que visam contribuir para uma diminuição dos impactos ambientais causados pela locomoção de cargas no país. Tendo isso em vista, este trabalho utiliza um estudo de caso como metodologia para analisar algumas atualizações implementadas no sistema de exaustão de um veículo pesado movido a Diesel, por uma montadora que atua em território brasileiro. Isso foi feito por meio de uma análise comparativa que apontou as principais mudanças ocorridas na transição da legislação. Além disso, são levantadas diversas alternativas buscadas pelas principais marcas do segmento, contando com tecnologias desenvolvidas especificamente para o atendimento da norma PROCONVE P-8, que entrará em vigor a partir do ano de 2023. Foi possível analisar como um veículo cujo sistema de exaustão que anteriormente operava somente a base das tecnologias EGR e DOC foi atualizado para atender à norma legislação por meio da substituição pelo SCR. O estudo em questão permitiu analisar os principais benefícios das mudanças e compreender a importância do tratamento dos gases emitidos pela queima do óleo Diesel.

Palavras-chave: Motor a Diesel; Gases poluentes; Sistema de exaustão; SCR; EGR; Legislação.

ABSTRACT

DOMINGUES, Alan Martins; REIS, Haila Cândido dos. **Mechanical Engineering Allied to Sustainability: Comparative Case Study of Updates in an Exhaust System of a Heavy Vehicle Due to the Transition from PROCONVE Regulation P-7 to P-8.** 2022. Resende – RJ. Monograph (Bachelor's Degree in Mechanical Engineering) AEDB.

In the midst of an increase in global concern about the emission of polluting gases by vehicles powered by internal combustion engines and in the search for alternatives to reduce damage to the environment and human health, the Brazilian government and private companies are advancing in measures that aim to contribute to a reduction of the environmental impacts caused by the transportation of loads in the country. With that in mind, this work uses a case study as a methodology to analyze some updates implemented in the exhaust system of a diesel-powered heavy vehicle, by an automaker that operates in Brazilian territory. This was done through a comparative analysis that pointed out the main changes that occurred in the transition of legislation. In addition, several alternatives sought by the main brands in the segment are raised, with technologies developed specifically to meet the PROCONVE P-8 regulation, which will come into force from the year 2023. It was possible to analyze how a vehicle whose exhaust system, which previously operated only on the basis of EGR and DOC technologies, was updated to comply with the legislation by replacing it with the SCR. The study in question allowed the analysis of the main benefits of changes and understand the importance of treating the gases emitted by the burning of Diesel oil.

Keywords: Diesel engine; polluting gases; Exhaust system; SCR; EGR; Legislation.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Primeiro tempo do pistão: admissão de ar.	20
Figura 2 - Segundo tempo do pistão: compressão.	21
Figura 3 - Terceiro tempo do pistão: expansão.	21
Figura 4 - Quarto tempo: descarga.	22
Figura 5 - Componentes de um sistema de escapamento.	23
Figura 6 - Exemplos de um catalisador metálico (esquerda) e cerâmico (direita).	30
Figura 7 - Reações químicas em um catalisador contendo DOC.	31
Figura 8 - Esquema de funcionamento do filtro de partículas diesel.	32
Figura 9 - Cerâmica utilizada para filtragem do material particulado.	33
Figura 10 - EGR em destaque em um motor de caminhão.	35
Figura 11 - Fluxo dos gases no sistema <i>cooled</i> EGR.	36
Figura 12 - Esquema de funcionamento do sistema SCR.	37
Figura 13 - Fluxograma da fundamentação teórica.	40
Figura 14 - Fluxograma do estudo de caso.	41
Figura 15 - Sistema de exaustão de um veículo pesado sob a norma PROCONVE P-7.	44
Figura 16 - Sistema de exaustão com a tecnologia BlueTec 5.	45
Figura 17 - Motor MAN D0836 com recirculação de gases.	45
Figura 18 - Motor Cummins ISF 3.8L.	47
Figura 19 - Layout de um sistema de exaustão contendo DOC, DPF e SCR.	48
Figura 20 - Tanque adicional de plástico para contenção do fluido Arla 32.	48
Figura 21 - Catalisador com DOC, DPF e SCR dentro de uma mesma geometria.	49
Figura 22 - Sistema de exaustão do modelo MAN TGX.	50
Figura 23 - Fluxo dos gases de exaustão no veículo PROCONVE P-7.	51
Figura 24 - Fluxo dos gases de exaustão no veículo PROCONVE P-8.	52
Figura 25 - Sistema de exaustão de um veículo pesado sob a norma PROCONVE P-8.	53

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Principais poluentes.....	27
Quadro 2 - Especificações do Arla 32.	39
Quadro 3 - Especificações técnicas do motor.....	43

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Redução da emissão de NO _x no PROCONVE P-8.....	18
Gráfico 2 – Redução da emissão de MP no PROCONVE P-8.....	19
Gráfico 3 – Relação entre NO _x e material particulado.....	34

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AEDB	Associação Educacional Dom Bosco
Al ₂ O ₃	Alumina (óxido de alumínio)
ARLA	Agente Redutor Líquido Automotivo
ASC	<i>Ammonia Slip Catalyst</i> (Catalisador de Excesso de Amônia)
C	Celsius
CO	Monóxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DOC	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i> (Catalisador de oxidação Diesel)
DPF	<i>Diesel Particulate Filter</i> (Filtro de partículas Diesel)
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i> (Recirculação dos gases de exaustão)
H ₂ O	Água (dióxido de hidrogênio)
HC	Hidrocarboneto
Inmetro	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ISO	<i>International Organization for Standardization</i> (Organização Internacional de Normalização)
K	Kelvin
kWh	Quilowatt-hora
LCVM	Licença para Uso da Configuração de Veículo ou Motor
MP	Material particulado
N ₂	Gás nitrogênio
NBR	Norma Brasileira
NH ₃	Amônia
(NH ₂) ₂ CO	Ureia
NO	Monóxido de nitrogênio
NO ₂	Dióxido de nitrogênio
NO _x	Óxidos de nitrogênio
O ₂	Gás oxigênio
OCE	<i>Off Cycle Emission</i> (Emissão Fora de Ciclo)
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i> (Redução Catalítica Seletiva)
SiO ₂	Sílica (dióxido de silício)

SISNAMA	Sistema Nacional do Meio Ambiente
VOC	<i>Volatile Organic Compounds</i> (Componentes Orgânicos Voláteis)
WHTC	<i>World Harmonized Transient Cycle</i> (Ciclo Transitório Mundialmente Harmonizado)
WHSC	<i>World Harmonized Stationary Cycle</i> (Ciclo Estacionário Mundialmente Harmonizado)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Objetivo	14
2	FUNDAMENTOS TEÓRICOS	15
2.1	LEGISLAÇÃO	15
2.1.1	Protocolo de Kyoto	15
2.1.2	CONAMA- PROCONVE	16
2.1.3	PROCONVE P-8.....	17
2.1.4	Prazo de implementação	17
2.1.5	Limites de emissão.....	17
2.2	FUNCIONAMENTO DO MOTOR A DIESEL.....	19
2.3	COMPONENTES DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO	22
2.4	CARACTERÍSTICAS DO DIESEL E GASES DE EXAUSTÃO	23
2.4.1	Óxidos de nitrogênio (NOx)	24
2.4.2	Material particulado (MP).....	25
2.4.3	Monóxido de carbono (CO)	25
2.4.4	Hidrocarbonetos (HCs)	26
2.5	IMPACTO AMBIENTAL E EFEITOS NA SAÚDE HUMANA	26
2.6	SISTEMAS DE TRATAMENTO DOS GASES DE EXAUSTÃO.....	28
2.6.1	DOC	29
2.6.2	DPF	32
2.6.3	EGR.....	34
2.6.4	SCR.....	36
3	METODOLOGIA	40
4	RESULTADOS.....	43
4.1	ESTUDO DE CASO.....	43

4.1.1	Veículo atual	43
4.1.2	Propostas para o PROCONVE P-8	44
4.1.3	Veículo PROCONVE P-8.....	50
5	CONCLUSÃO	54
6	INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	56
	REFERÊNCIAS	57

1 INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, a emissão de poluentes em processos de combustão tem sido cada vez mais regulamentada pelos órgãos ambientais responsáveis, com limites e padrões de emissão cada vez mais restritivos. Para reduzir os níveis de emissão na atmosfera, em diversos lugares do mundo se estabeleceram legislações regulares, tais como a EURO V na Europa e a PROCONVE P-7 no Brasil. Ademais, a fase P-8 do PROCONVE baseia-se na fase conhecida na Europa como Euro VI, cujos requisitos passaram a ser atendidos naquele continente a partir do ano de 2013. Dessa forma, visando atender os limites de emissão estabelecidos pelas normas vigentes, as montadoras tiveram que buscar novas tecnologias de controle de emissão para seus motores. Uma destas tecnologias é o Sistema de Redução Catalítica Seletiva (SCR), que utiliza o Agente de Redução Líquido Automotivo, conhecido comercialmente por ARLA 32, para realizar a redução catalítica dos óxidos de nitrogênio na corrente de saída do motor (KELLER, 2021).

Além disso, os motores de combustão interna (MCI) são máquinas térmicas que convertem a energia proveniente da combustão em energia mecânica. O MCI é considerado uma das invenções mais significativas do século passado, a qual teve um impacto significativo na sociedade, especialmente a mobilidade humana. Apesar de sua importância no mundo moderno, os poluentes resultantes do processo de combustão podem causar diversos problemas à saúde humana e ao meio ambiente. Essas emissões geram impactos ambientais em nível global (efeito estufa), regional (chuvas ácidas) e locais (poluição do ar e problemas respiratórios). Dessa forma, o aumento das emissões veiculares levou o PROCONVE (Programa Nacional de Controle da Poluição Veicular), que atua a partir do estabelecimento de limites de emissão máximos para veículos novos vendidos no país, a realizar medidas e regulamentações ambientais no país. Uma dessas ações foi a exigência de algumas soluções tecnológicas nos motores Diesel, as quais tem por objetivo reduzir a emissão de poluentes na atmosfera (PEREIRA, 2019).

No presente trabalho são apresentadas as principais regulamentações ambientais - em vigor no território nacional - relacionadas aos motores Diesel, bem como algumas das diversas propostas dos programas responsáveis pelo cumprimento delas. A descrição dos princípios de funcionamento de um motor de combustão interna e seus principais componentes também foi realizada, de modo a fornecer a fundamentação teórica do trabalho. Além disso, posteriormente, foi feita uma análise comparativa apontando as principais mudanças que ocorreram na transição da legislação PROCONVE P-7 para legislação PROCONVE P-8. Por fim, na conclusão,

algumas considerações são realizadas em relação às mudanças realizadas e aos métodos de controle e redução de poluentes no Brasil.

1.1 OBJETIVO

Este estudo traz como objetivo analisar o papel do sistema de exaustão em veículos movidos a Diesel e entender a importância do controle dos gases poluentes, possibilitando assim compreender os métodos empregados para a implementação de um sistema de exaustão compatível com a norma PROCONVE P-8 em um veículo específico.

2 FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 LEGISLAÇÃO

O objetivo desse item consiste em relacionar as informações que justifiquem a necessidade das mudanças que ocorreram na transição do PROCONVE P-7 para o PROCONVE P-8. De acordo com Mendes (2004), o Brasil foi o primeiro país a adotar uma legislação destinada a reduzir as emissões veiculares na América do Sul. As primeiras discussões sobre a necessidade da implantação de um programa nacional de controle de emissões veiculares ocorreram no País em 1977. Um dos marcos dessas discussões foi a realização, nesse mesmo ano, de um seminário internacional promovido pela CETESB (Companhia de Tecnologia e Saneamento Ambiental), a qual atua como braço técnico do Governo Federal.

Em 1981, foi criado o Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA, que passou a ter o poder de “estabelecer, privativamente, normas e padrões nacionais de controle de poluição por veículos automotores, aeronaves e embarcações, mediante audiência dos Ministérios competentes”. Para isso, esse Conselho criou programas de controle da poluição do ar por veículos automotores: o PROCONVE (automóveis, caminhões, ônibus e máquinas rodoviárias e agrícolas), em 1986; e o PROMOT (motocicletas e similares), em 2002. Em 1985, os limites máximos de emissão de poluentes foram, então, fixados, com um cronograma específico para três categorias distintas de veículos automotores, são elas: "Veículo Leve de Passageiros" (automóveis); "Veículo Leve Comercial" (picapes, vans, Utilitários etc.) e "Veículo Pesado" (ônibus e caminhões) (PEREIRA, 2019).

2.1.1 Protocolo de Kyoto

O Protocolo de Kyoto é um acordo ambiental fechado durante a 3ª Conferência das Partes da Convenção das Nações Unidas sobre Mudanças Climáticas, realizada em Kyoto, Japão, em 1997. Foi o primeiro tratado internacional para controle da emissão de gases de efeito estufa na atmosfera. Entre as metas, o protocolo estabelecia a redução de 5,2%, em relação a 1990, na emissão de poluentes, principalmente por parte dos países industrializados. Uma delas determinava a redução de 5,2%, em relação a 1990, da emissão de gases do efeito estufa, no período compreendido entre 2008 e 2012. O protocolo também estimulava a criação de formas de desenvolvimento sustentável para preservar o meio ambiente. Ao ser adotado, o Protocolo de Kyoto foi assinado por 84 países (AGÊNCIA SENADO, 2022).

As metas de redução de gases não são iguais para todos os países, existe um nível diferenciado para cada um dos 38 países que mais emitem gases e que participam do protocolo, dessa forma ocorreu uma diminuição de 8% da emissão de gases dos países que compõe a União Europeia, os Estados Unidos em 7% e Japão em 6%. Após essas metas estabelecidas, os Estados Unidos, o maior emissor de gases no mundo, retirou-se do protocolo no ano de 2001, pois acreditou que a redução iria comprometer o desenvolvimento econômico do país. Os Países em fraco desenvolvimento tais como Brasil, México, Argentina, Índia e, principalmente, China, não receberam metas de redução. O protocolo de Kyoto não apenas discute e implanta medidas de redução de gases, mas também incentiva e estabelece medidas com intuito de substituir produtos oriundos do petróleo por outros que provocam menos impacto (BOCK, 2015).

2.1.2 CONAMA- PROCONVE

O Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA é o órgão consultivo e deliberativo do Sistema Nacional do Meio Ambiente-SISNAMA, foi instituído pela Lei 6.938/81, que dispõe sobre a Política Nacional do Meio Ambiente, regulamentada pelo Decreto 99.274/90. O Conselho é um colegiado de cinco setores: órgãos federais, estaduais e municipais, setor empresarial e entidades ambientalistas (CONAMA, 2022).

Segundo o CONAMA (s.d) no âmbito da redução de emissão de gases poluentes, em 06 de maio de 1986, a resolução de nº 18 criou o Programa de Controle de Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE). Através desse programa foram definidos os primeiros limites de emissão para veículos leves, veículos leves comerciais e veículos pesados. Existe uma grande preocupação para controlar os gases que são emitidos pelos veículos pesados, pois eles são os maiores emissores de Material Particulado e Óxidos de Nitrogênio. Assim, a Resolução CONAMA Nº 18/86 estabeleceu os primeiros passos para o controle da emissão de veículos a Diesel. Foram estabelecidas estratégias separadas em seis fases, (P1, P2, P3, P4, P5 e P6) cujo objetivo era com o avanço de cada fase, aumentar a qualidade dos motores e reduzir os níveis de emissão de gases poluentes (BOCK, 2015).

A legislação do PROCONVE P-7, implementada em 2012, trouxe redução de 60% de óxido de nitrogênio e de 80% das emissões de material particulado (MP) em relação à fase P5, válida para veículos produzidos até dezembro de 2011. Se comparada com o início do PROCONVE, em 1986, a redução de material particulado dessa fase foi de 96,3% e a de óxido de nitrogênio de 87,3% (ANFAVEA, 2012).

Em suma, após 23 anos de sua criação, o programa mostrou que através da estratégia usada, sua implantação foi acertada. A adoção de fases cada vez mais restritivas foi o motivo

de seu êxito, sendo assim credenciado como um dos programas mais bem elaborados e bem-sucedidos em termos de políticas para o setor ambiental. As reduções para os veículos pesados foram em torno de 80% o que trouxe diversos benefícios para o ar da região metropolitana, os destaques tecnológicos do programa se deram através da introdução de catalisadores nos veículos, injeção eletrônica de combustíveis e melhorias nos combustíveis automotivos (BOCK, 2015).

2.1.3 PROCONVE P-8

A legislação brasileira para o controle da emissão de poluentes por veículos pesados sempre se baseou na legislação aplicada pela Europa. A fase P-8 do PROCONVE baseia-se na fase conhecida na Europa como Euro VI, cujos requisitos passaram a ser atendidos no continente a partir do ano de 2013. Em termos gerais essa legislação é equivalente a que foi exigida para a mesma categoria de veículos nos Estados Unidos em 2010 (CETESB, 2018).

2.1.4 Prazo de implementação

A exigência de homologação no Brasil acontece a partir de 2022 para novos modelos de veículos, e a partir de 2023 para todos os veículos, ou seja, mesmo aqueles que já dispõem de licença anterior de comercialização emitida pelo Ibama – Licença para Uso da Configuração de Veículo ou Motor (LCVM).

Vale notar que a Resolução facultou ao fabricante ou importador o atendimento antecipado aos requisitos da fase P-8, e a consequente obtenção da LCVM com esse registro. Isso significa que agentes das esferas pública ou privada que gerenciam frotas, como por exemplo, prefeituras ou transportadoras, puderam, a partir da publicação da Resolução, exigir em processos de licitação para aquisição ou concessão de serviços de transporte (como ônibus urbanos), o atendimento a essa fase por parte dos interessados que queriam fornecer veículos para esse fim. Isso preserva a possibilidade de redução antecipada das emissões principalmente em áreas urbanas com problemas de atendimento aos padrões de qualidade do ar (CETESB, 2018).

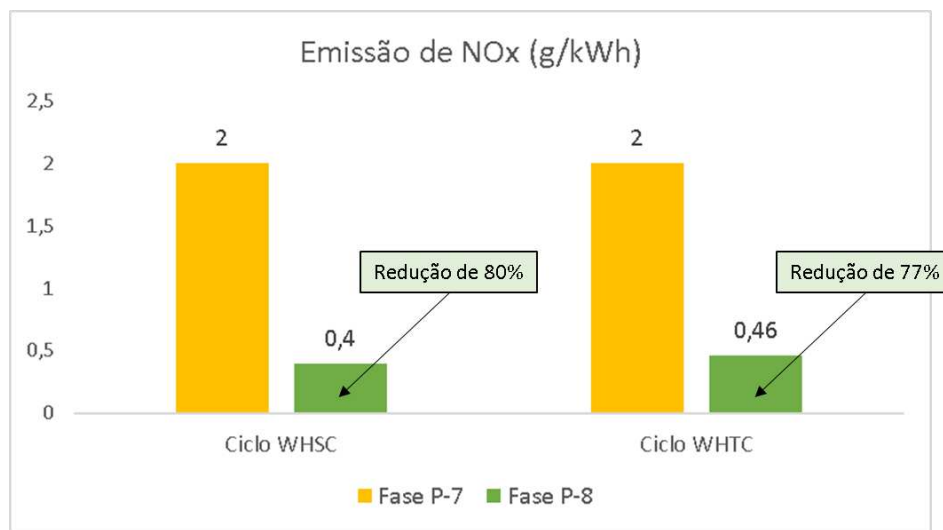
2.1.5 Limites de emissão

Os ciclos de ensaio dinâmométrico exigidos para comprovação do atendimento aos limites de emissão foram alterados em relação à fase anterior. Foram introduzidos dois ciclos desenvolvidos por grupo de trabalho técnico das Nações Unidas, definidos no Regulamento UN ECE R49.06 (UNECE, 2013): os ciclos de ensaios *World Harmonized Transient Cycle*

(WHTC) e *World Harmonized Stationary Cycle* (WHSC). Esses ciclos são mais representativos de uma condução real em rua, introduzindo, no caso do ciclo WHTC, uma fase inicial em que o motor opera com partida “a frio”, ocasião em que as emissões tendem a ser maiores, da mesma forma do que já é exigido para os automóveis. Foi introduzido também o conceito de "*Off Cycle Emission*" (OCE), que determina que os limites de emissão também devam ser respeitados em pontos aleatórios escolhidos pelo agente homologador em uma ampla faixa do mapa de injeção de combustível do motor, o que torna os resultados dos ensaios laboratoriais mais representativos (CETESB, 2018).

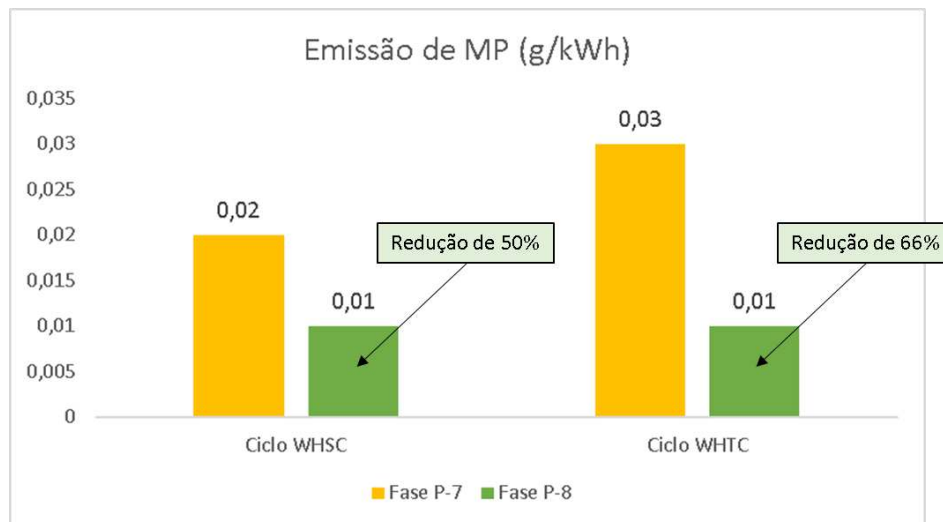
A comparação entre os limites de emissão dos principais poluentes entre as fases P-8 e P-7, a partir de informações fornecidas pela CETESB (2018), pode ser observada nos gráficos a seguir, sendo o Gráfico 1 para os óxidos de nitrogênio (NOx) e o Gráfico 2, para o material particulado (MP).

Gráfico 1 – Redução da emissão de NOx no PROCONVE P-8.



Fonte: Autores.

Gráfico 2 – Redução da emissão de MP no PROCONVE P-8.



Fonte: Autores.

É importante observar que os ciclos de ensaio para a fase P-8 são diferentes dos usados na fase P-7, e que, portanto, essas comparações são apenas aproximadas.

A redução na massa emitida de material particulado leva a uma melhoria dos sistemas de controle com a introdução de filtros de partículas mais eficientes, o que faz com que a maior parte do material particulado seja constituído de partículas extremamente pequenas ($MP_{2,5}$), justamente as mais prejudiciais à saúde. Para ampliação desse controle foram estabelecidos limites para novo parâmetro de emissão, o número de partículas. No ciclo WHSC esse número é limitado em 8×10^{11} partículas/kWh e no ciclo WHTC o limite é 6×10^{11} partículas/kWh.

Foi reduzido também o limite de emissão de amônia, de 25 ppm, vigente na fase P-7, para 10 ppm, medido como valor médio de concentração durante os ciclos de ensaio (CETESB, 2018).

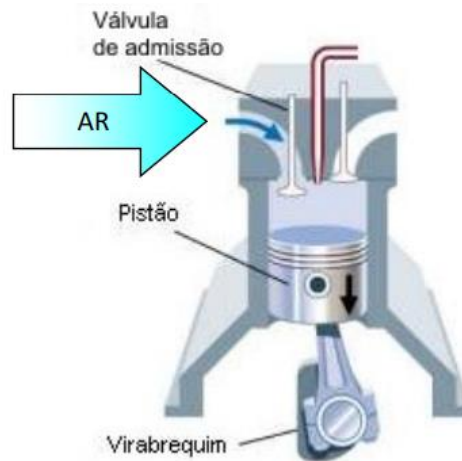
2.2 FUNCIONAMENTO DO MOTOR A DIESEL

Brunetti (2012) define os motores de combustão interna como máquinas térmicas, ou seja, dispositivos que possibilitam a conversão do calor em trabalho, sendo esse calor obtido de diferentes fontes de combustível, porém no caso deste estudo, por meio da queima do óleo Diesel.

O ciclo de funcionamento do motor a Diesel se inicia com o tempo de admissão, quando o ar – e não uma mistura ar/combustível – é aspirada para o interior do cilindro, conforme afirma Brady (2013). Neste instante, o pistão se desloca do ponto morto superior para o ponto morto inferior, em um momento em que, de acordo com Varella e Santos (2010), a válvula de

admissão encontra-se aberta, e a válvula de descarga está fechada. Os autores explicam que o volume de ar aspirado não se altera, portanto, a variação da potência ocorre em função da variação do volume de combustível injetado. O fluxo da entrada de ar e a movimentação do pistão são representados pela Figura 1.

Figura 1 - Primeiro tempo do pistão: admissão de ar.

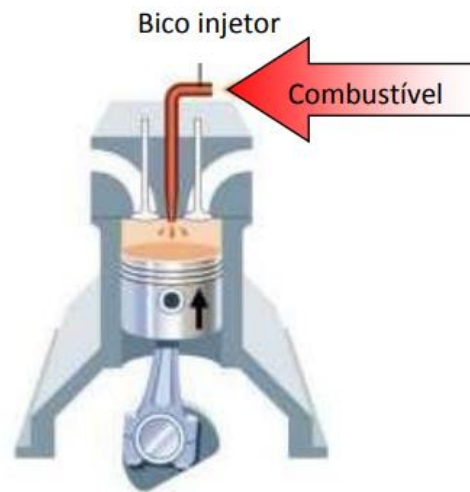


Fonte: Varella e Santos (2010).

Segundo Brady (2013), devido ao alto nível de compressão usado no diesel, o calor do ar pressurizado ao fim do tempo de compressão é suficiente para iniciar uma ignição quando, de acordo com Van Gerpen *et al.* (2010), o combustível atomizado é injetado em alta velocidade e rapidamente vaporizado, entra em mistura com o ar e sofre uma série de reações químicas que resultam em uma autoignição. No momento em que o pistão atinge o fim do tempo de compressão, o combustível em queima aumenta ainda mais a pressão acima do pistão. Conforme Varella e Santos (2010), as válvulas de admissão e descarga estão fechadas nessa etapa do ciclo.

O início de injeção marca o início do processo de combustão. A eficiência do motor é determinada pelo início da combustão e pelas características dela. As características (como uma função do tempo) da quantidade de combustível injetada e a pressão de injeção, pode ser aplicada para controlar as condições de contorno da combustão. Estes fatores também determinam a temperatura de combustão, a qual tem um efeito significativo na formação de óxido de nitrogênio (MARQUES NETO, 2003). Na Figura 2 está exemplificado o movimento do pistão e a entrada do combustível na câmara.

Figura 2 - Segundo tempo do pistão: compressão.



Fonte: Varella e Santos (2010).

À medida que mais combustível é injetado e queimado, os gases internos aquecem ainda mais e a pressão aumenta, empurrando o pistão e a biela para baixo, girando assim o virabrequim e ampliando o volume na câmara (BRADY, 2013). A expansão dos gases e a movimentação do pistão realizam uma transformação de energia térmica em energia mecânica, conforme explicam Varella e Santos (2010). Na Figura 3 encontra-se ilustrado o momento em que o pistão se desloca para baixo e causa o movimento do virabrequim durante a expansão dos gases.

Figura 3 - Terceiro tempo do pistão: expansão.



Fonte: Varella e Santos (2010).

Varella e Santos (2010) explicam que, após o giro do virabrequim, o pistão realiza um movimento ascendente que expulsa do cilindro os resíduos da combustão, por meio da abertura da válvula de descarga. De acordo com Brady (2013), a válvula de admissão inicia sua abertura antes que o pistão atinja o ponto morto superior, reiniciando assim o ciclo com a reentrada de ar. Na Figura 4 estão representadas as etapas do tempo de expansão, com a expulsão dos gases durante o movimento de subida do pistão.

Figura 4 - Quarto tempo: descarga.



Fonte: Varella e Santos (2010).

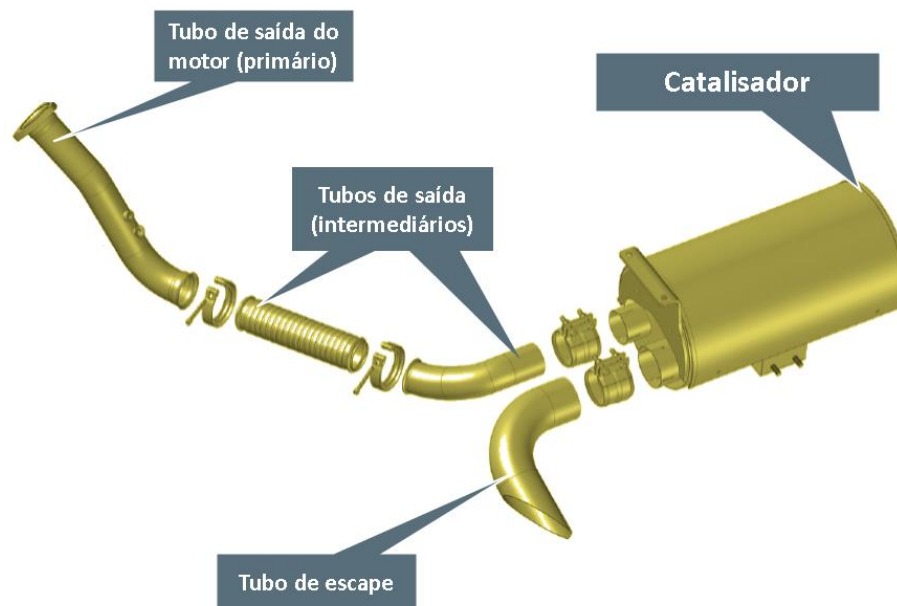
O *timing* do processo de combustão deve ser precisamente controlado para fornecer emissões baixas e boa eficiência do combustível. Esse *timing* é determinado pela injeção do combustível e pelo curto período entre o início da injeção e a autoignição, denominado atraso de ignição. Quando a autoignição ocorre, a fração de diesel que já se encontrava pronta para combustão queima rapidamente, em um período conhecido como combustão pré-misturada. Quando o combustível que fora preparado durante a ignição se acaba, o diesel remanescente queima a uma taxa determinada pela taxa da mistura entre combustível e ar (VAN GERPEN *et al.*, 2010).

2.3 COMPONENTES DE UM SISTEMA DE EXAUSTÃO

Os motores de combustão interna, independentemente de sua aplicação, requerem um sistema de escapamento cujas funções sejam coletar e descarregar os gases provenientes da combustão de maneira adequada. Assim, a redução do ruído provocado pelo motor no ambiente, a perda mínima de potência do motor, o atendimento às exigências operacionais (durabilidade, nível de vibração, dentre outros), a geometria externa compacta e o baixo custo são requisitos básicos de um sistema de escapamento (BRUNETTI, 2012).

Brunetti (2012) e Simêncio (2019) mencionam alguns dos componentes que compõem um sistema de escapamento de um veículo movido a Diesel, sendo eles os tubos de escapamento, que conduzem a mistura exaurida pelo motor até o catalisador, local onde se encontram as tecnologias responsáveis pelo tratamento dos gases de exaustão, reduzindo assim seu impacto na atmosfera antes da liberação para o tubo de escape, que emite por fim os gases já tratados. Alguns componentes do sistema estão exemplificados na Figura 5.

Figura 5 - Componentes de um sistema de escapamento.



Fonte: Autores.

2.4 CARACTERÍSTICAS DO DIESEL E GASES DE EXAUSTÃO

O óleo diesel é um combustível líquido derivado de petróleo, utilizado em motores ciclo Diesel (de combustão interna e ignição por compressão), composto majoritariamente por hidrocarbonetos com cadeias de 8 a 16 carbonos, podendo conter, em menor proporção, nitrogênio, enxofre e oxigênio. É formulado através da mistura de diversas correntes como gasóleos, nafta pesada, diesel leve e diesel pesado, provenientes das diversas etapas de processamento do petróleo bruto (PETROBRAS, 2021). É um produto inflamável, medianamente tóxico, volátil, límpido, isento de material em suspensão e com odor forte e característico (BOSCH, 2000). Capana (2008) e Guarieiro *et al.* (2011) complementam ao destacar que a queima do óleo diesel produz alguns dos gases poluentes que contribuem negativamente para o meio ambiente e que podem ser tóxicos para a saúde humana.

Alguns dos principais poluentes da atmosfera emitidos pela queima do Diesel são:

2.4.1 Óxidos de nitrogênio (NO_x)

NO_x é o termo geral que designa a soma de monóxido de nitrogênio (NO) e dióxido de nitrogênio (NO₂), os dois componentes de nitrogênio mais emitidos em processos de combustão. Em geral, as quantidades de NO formadas são muito maiores que as de NO₂. Contudo, uma vez lançado na atmosfera, o NO rapidamente se transforma em NO₂, e as taxas de emissão mássica de NO_x é sempre calculada considerando seus dois compostos como sendo exclusivamente NO₂ (MARQUES NETO, 2003).

O NO é uma substância incolor, inodora e insípida, que quando há radiação intensa é transformada em NO₂. O NO_x se forma no processo de combustão de motores, onde ocorre a reação entre o nitrogênio do combustível com o oxigênio em alta temperatura, que combinado, se transforma em óxido nítrico (NO), dióxido de nitrogênio (NO₂) e outros óxidos de nitrogênio (NO_x). É um composto altamente reativo. Quando o NO reage com o Oxigênio (O₂), ozônio (O₃) e hidrocarbonetos (HC) se transformam em NO₂, o qual possuindo luz, reage com HC e oxigênio formando assim, ozônio (O₃). Portanto, o NO₂ é o principal produtor de oxônio da atmosfera (RODRIGUES, 2019).

O dióxido de nitrogênio é altamente tóxico, possui cheiro e gosto desagradável, é de cor marrom-avermelhada, e acaba irritando os olhos e mucosas nasais, podendo causar enfisema pulmonar, e câncer de pulmão (RODRIGUES, 2019).

A baixas temperaturas, a relação NO₂/NO é cerca de 3, mas a concentração de ambos os óxidos é bastante pequena. Esta relação baixa drasticamente para temperaturas mais altas, sendo, geralmente, menor que 0,15 para temperaturas acima de 500°C, ou seja, para temperaturas elevadas durante o processo de combustão interna de motores Diesel existe praticamente NO, que se transforma devido ao abaixamento de temperatura do sistema de escape em praticamente NO₂ (MARQUES NETO, 2003).

Entre os poluentes contidos nos gases de escape de motores do ciclo Diesel, o NO_x é aquele que de forma direta apresenta menos riscos para a saúde. No entanto, o NO_x é o principal precursor no processo de formação do "smog" fotoquímico. Smog é uma névoa marrom amarelada que aparece primariamente sobre áreas urbanas em dias ensolarados. Os componentes do smog incluem ozônio, NO_x, componentes orgânicos voláteis ("*Volatile Organic Compounds*", VOC), SO₂, aerossóis, e material particulado. Esta mistura é resultante da reação entre poluentes atmosféricos sob forte luz solar. O smog ocorre primordialmente em

meses de verão, quando há muita luz do sol e as temperaturas são as maiores. Em quantidade, o smog ameaça as pessoas, os animais e as plantas (MARQUES NETO, 2003).

De acordo com Muraro (2016) e Brunetti (2012), a temperatura é o fator determinante para a formação do NO_x na queima do combustível. As reações que levam à sua formação ocorrem acima de 2000K, porém praticamente cessam abaixo dessa temperatura.

2.4.2 Material particulado (MP)

Sob a denominação geral de Material Particulado se encontra 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 (CETESB, 2022). Tal material é formado por uma série de componentes, entre eles ácidos (nitratos e sulfatos), compostos orgânicos, metais e partículas de poeira provenientes do solo (SILVA, 2014).

As partículas estão entre os poluentes que apresentam maiores riscos ao meio ambiente. Elas atacam os pulmões, aumentam as taxas de reação na atmosfera, reduzem a visibilidade e alteram os níveis de radiação solar que atinge o solo. Por este último fato, as partículas alteram a temperatura do solo e influenciam o crescimento das plantas (MARQUES NETO, 2003).

O tamanho das partículas está diretamente relacionado com o potencial de danos à saúde humana. As mais prejudiciais são as partículas de 10 micrometros de diâmetro ou menores, pois essas são as que atravessam as vias nasais e a garganta, chegando até os pulmões. Uma vez inaladas, tais partículas interferem nas trocas gasosas, afetando os pulmões e o coração. As partículas inaláveis são agrupadas em duas categorias: partículas grossas inaláveis, de diâmetro maior que 2,5 micrometros e menor que 10 micrometros; e partículas finas, de 2,5 micrometros de diâmetro e menores (SILVA, 2014).

Um dos tipos de material particulado mais comum é o carbono negro, também conhecido como fuligem, onde sua coloração é determinada pela sua composição química e característica da fonte emissora. É o responsável pela coloração escura da fumaça que sai dos escapamentos de automóveis, caminhões e ônibus, como também de chaminés de indústrias, sendo considerado o segundo maior contribuinte do aquecimento global, perdendo apenas para o CO₂ (RODRIGUES, 2019).

2.4.3 Monóxido de carbono (CO)

O monóxido de carbono, em motores, resulta da combustão incompleta de hidrocarbonetos e indica uma relativa redução na eficiência do motor. A formação desse

poluente é consequência, principalmente, da relação ar-combustível e do nível de homogeneização da mistura (SIMÊNCIO, 2019).

Não possui cheiro, e nem cor, não causa irritação, porém é um dos gases mais tóxicos tanto para os seres humanos quanto para os animais. A exposição prolongada, mesmo em baixas concentrações pode ocasionar insônia, cefaleia, fadiga, diminuição da capacidade física, de aprendizado e trabalho, tonturas, vertigens, náuseas, vômitos, distúrbios visuais, alterações auditivas, doenças respiratórias, anorexia, mal de Parkinson, isquemia cardíaca, cardiopatias e arteriosclerose. Nos idosos, causa um aumento na mortalidade por infarto agudo (RODRIGUES, 2019).

2.4.4 Hidrocarbonetos (HCs)

Os hidrocarbonetos que não são queimados na câmara de combustão se tornam produtos da decomposição térmica do combustível primário em hidrocarbonetos de menor peso molecular. A presença desses hidrocarbonetos nos gases de escapamento é uma das responsáveis pela fumaça branca ou azul (SIMÊNCIO, 2019).

Os hidrocarbonetos atuam na atividade das reações de formação da chamada névoa fotoquímica, também conhecida como a névoa cinzenta presente no céu (RODRIGUES, 2019).

Existem diversos tipos de hidrocarbonetos, o benzeno por exemplo, é um agente cancerígeno e mutagênicos. As águas também podem ser contaminadas por partículas de hidrocarbonetos, por isso é importante o monitoramento e segurança das águas e dos abastecimentos do ecossistema (RODRIGUES, 2019).

2.5 IMPACTO AMBIENTAL E EFEITOS NA SAÚDE HUMANA

Autores como Baird e Cann (2011) e Rocha *et al.* (2013) citam os combustíveis fósseis como grandes responsáveis pela degradação ambiental na atualidade, citando problemas como o efeito estufa e o aquecimento global. Partindo desta premissa, observa-se que os gases de escape dos veículos podem conter substâncias nocivas para o meio ambiente.

O crescimento exponencial da população, principalmente nos países menos desenvolvidos, ainda que venha se arrefecendo nos países desenvolvidos, nas últimas décadas, somado aos efeitos do padrão de desenvolvimento predominante na maioria dos países, a partir do pós-guerra, centrado na produção industrial de bens intermediários, de capital, de consumo duráveis e não duráveis e agrários de larga escala e no crescimento das cidades, em conjunto com o desenvolvimento socioeconômico do mundo moderno, tem acelerado sobremaneira o

uso dos recursos naturais renováveis e não-renováveis, gerando, entre outros efeitos, o aumento exponencial da concentração de Gases do Efeito Estufa (GEE) na atmosfera (FRANÇA, 2016).

Além da influência humana, a poluição atmosférica tem origem também em emissões naturais (ALMEIDA *et al.*, 2020). Dessa forma, observa-se que a redução do impacto ambiental dos gases de escape é uma preocupação constante dos fabricantes de motores. Os principais poluentes na atmosfera, suas características, fontes e efeitos podem ser observados de forma sintetizada no Quadro 1.

Quadro 1 - Principais poluentes.

Poluentes	Características	Fontes Principais	Efeitos Gerais ao Meio Ambientes
Partículas Inaláveis Finas	Partículas de material sólido ou líquido suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc., que podem permanecer no ar e percorrer longas distâncias.	Processos de combustão (industrial, veículos automotores), aerossol secundário (formado na atmosfera) como sulfato e nitrato, entre outros.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas Inaláveis e Fumaças	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc.	Processos de combustão (indústria e veículos automotores), poeira suspensa, aerossol secundário (formado na atmosfera).	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.
Partículas Totais em Suspensão	Partículas de material sólido ou líquido que ficam suspensas no ar, na forma de poeira, neblina, aerossol, fumaça, fuligem etc.	Processos industriais, veículos motorizados (exaustão), poeira de rua suspensa, queima de biomassa. Fontes naturais: pólen, aerossol marinho e solo.	Danos à vegetação, deterioração da visibilidade e contaminação do solo e da água.

Dióxido de Enxofre	Gás incolor, com forte odor, semelhante ao gás produzido na queima de palitos de fósforos. É um importante precursor de sulfatos, um dos principais componentes das partículas inaláveis.	Processos que utilizam queima de óleo combustível, refinarias de petróleo, veículos a diesel, produção de polpa de celulose e papel, fertilizantes.	Pode levar à formação de chuva ácida, causar corrosão aos materiais e danos à vegetação; folhas e colheitas.
Dióxido de Nitrogênio	Gás marrom avermelhado com odor forte e muito irritante. Pode levar à formação de ácido nítrico, nitratos (os quais contribuem para o aumento das partículas inaláveis na atmosfera) e compostos orgânicos tóxicos.	Processos de combustão envolvendo veículos automotores, processos industriais, usinas térmicas.	Pode levar à formação de chuva ácida, danos à vegetação e à colheita.
Monóxido de Carbono	Gás incolor, inodoro.	Combustão incompleta em veículos automotores	
Ozônio	Gás incolor, inodoro nas concentrações ambientais e o principal componente da névoa fotoquímica	Não é emitido diretamente para a atmosfera. É produzido fotoquimicamente pela radiação solar sobre os óxidos de nitrogênio e compostos orgânicos voláteis.	Danos às colheitas, à vegetação natural, plantações agrícolas; plantas ornamentais.

Adaptado de: CETESB (2018).

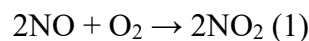
2.6 SISTEMAS DE TRATAMENTO DOS GASES DE EXAUSTÃO

Levando-se em conta os principais poluentes emitidos pela queima do óleo Diesel no motor por combustão interna e os seus impactos no meio ambiente, algumas tecnologias foram desenvolvidas com o intuito de reduzir as consequências negativas à natureza e à saúde humana.

2.6.1 DOC

O catalisador de oxidação diesel (em inglês *diesel oxidation catalyst* - DOC) desempenha dois papéis fundamentais nos sistemas de controle de emissão, de acordo com Johnson (2014):

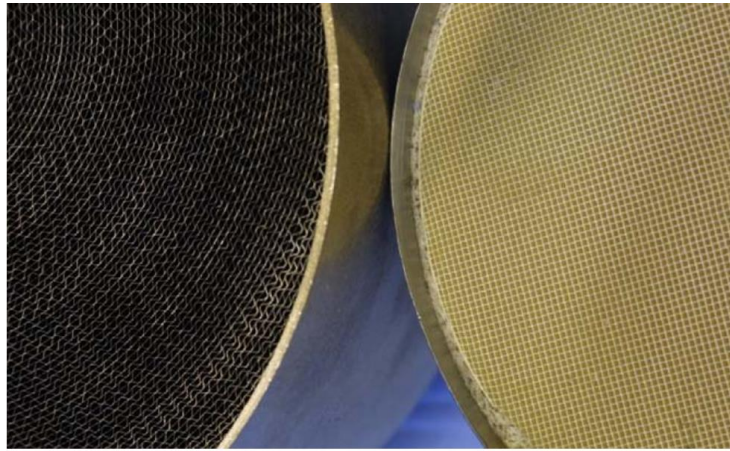
- (1) Oxidar os hidrocarbonetos (HCs) e o monóxido de carbono (CO), tanto para reduzir as emissões do motor quanto para criar calor exotérmico usado para regenerar um DPF;
- (2) Oxidar o NO para NO₂ (vide reação 1 abaixo), que é usado para continuar a oxidar a fuligem em um DPF, e para realçar a reação rápida de nitrogênio, principalmente em baixas temperaturas.



Os atuais catalisadores são geralmente baseados em suportes monolíticos cerâmicos com formato alveolar, ou até mesmo metais monolíticos. Os cerâmicos, no entanto, possuem maior robustez devido à menor porosidade da cerâmica, porém essa propriedade torna o monólito incapaz de dispersar o catalisador. Sendo assim, uma fina camada de material cataliticamente ativo de alta área de superfície é aplicada nas paredes do canal, sendo ela chamada de *washcoat*. Alguns dos materiais mais comuns utilizados para a composição do washcoat são a alumina (Al₂O₃), a sílica (SiO₂) e zeólitos (TWIGG, 2006; RUSSELL e EPLING, 2011).

Os monólitos feitos de cordierita têm excepcionalmente baixo coeficiente de expansão térmica, necessária para prevenir rachaduras em sua estrutura quando o material se encontra termicamente desgastado durante seu uso. Monólitos são fabricados a partir da extrusão de uma mistura de argila, talco, alumina e água com diversos aditivos orgânicos, que é seca e aquecida a uma alta temperatura, quando a cordierita é formada. Na Figura 6 é possível observar como um monólito cerâmico pode ser contido em uma carcaça de aço inoxidável soldada ao sistema de exaustão. Ele é envolto em uma manta intumescente que geralmente contém fibras inorgânicas (como lã mineral), vermiculita e aglutinante orgânico. Quando o conversor passa por temperaturas acima de 310 °C, o aglutinante orgânico se decompõe e a vermiculita esfolia. A força dessa expansão exerce uma pressão sobre o monólito, o que o prende firmemente no seu lugar no veículo. Na Figura 6 também é possível observar um catalisador à base de folha de metal cuja carcaça de aço inoxidável é soldada diretamente ao sistema de exaustão (TWIGG, 2006).

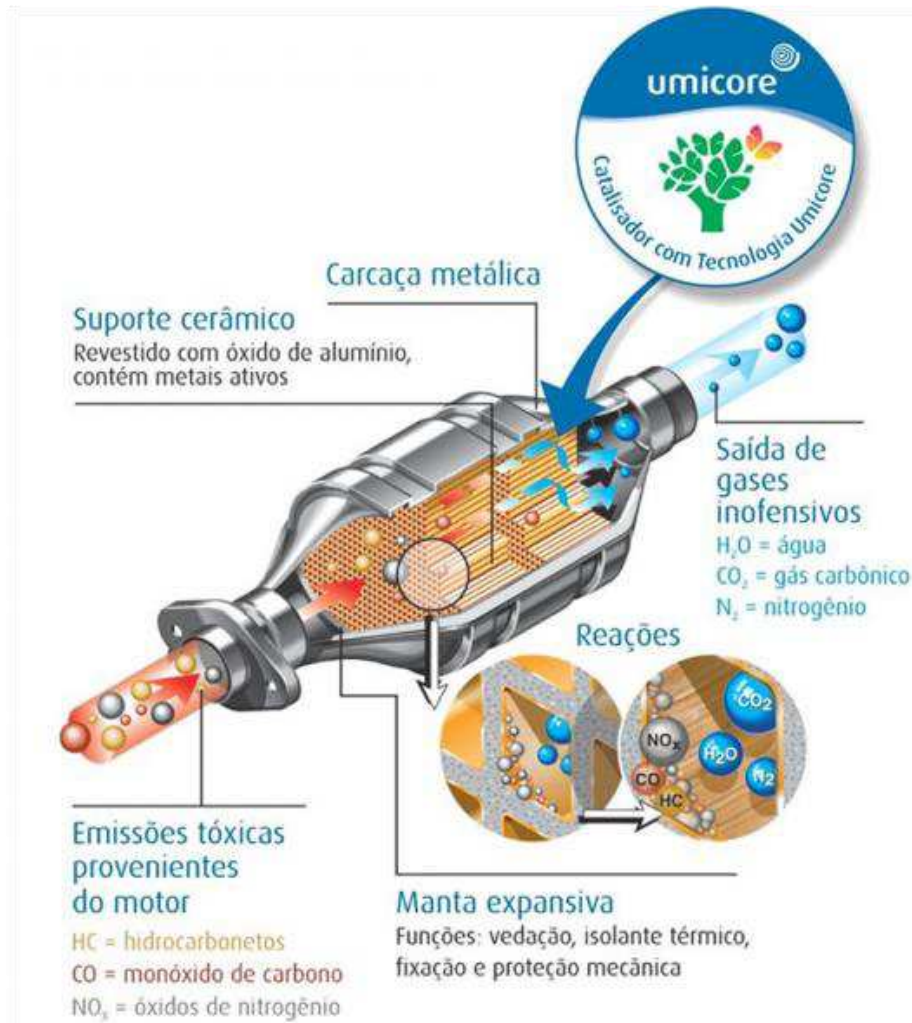
Figura 6 - Exemplos de um catalisador metálico (esquerda) e cerâmico (direita).



Fonte: Twigg (2006).

O funcionamento básico por dentro de um catalisador de oxidação diesel pode ser observado na Figura 7.

Figura 7 - Reações químicas em um catalisador contendo DOC.



Fonte: Umicore (2022).

Em relação ao posicionamento do DOC no veículo, Russell e Epling (2011) explicam que altas temperaturas próximas ao motor propiciam o uso de catalisadores menores para a oxidação de CO e HC, enquanto os catalisadores alocados distantes do motor possuem menores temperaturas, o que demanda um catalisador maior. Além disso, um volume maior também é necessário para a redução dos NO_x, e o uso de um pequeno catalisador pode reduzir as emissões de CO e HC em até 40-60% e aliviar a demanda de altas taxas de oxidação dos componentes a jusante.

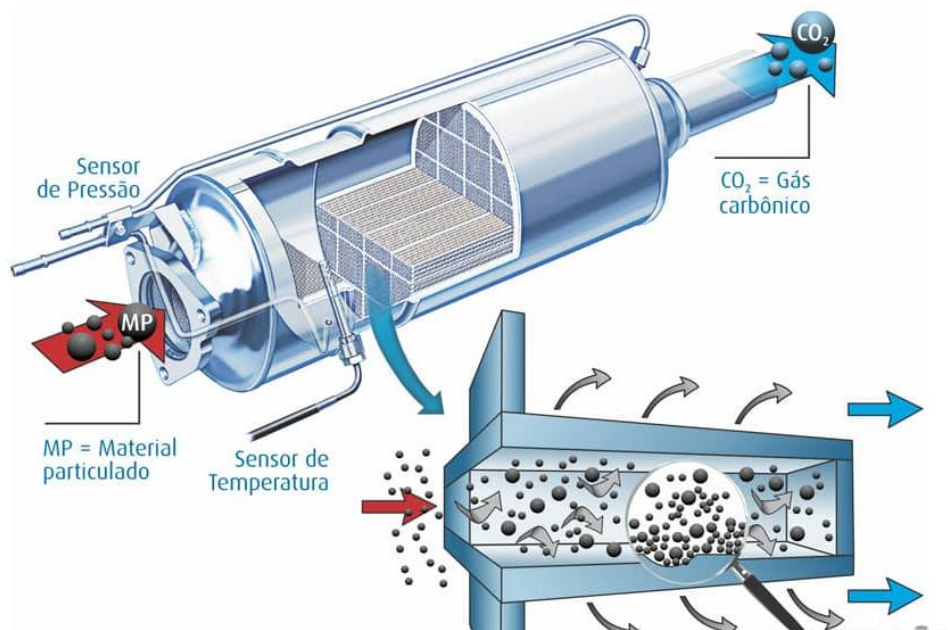
A conclusão que leva a essa configuração ideal complementa as afirmações de Katare *et al.* (2007), que dizem que os dispositivos SCR de redução do NO_x são preferidos a jusante do DOC. A principal razão para a configuração desses componentes diz respeito à oxidação do NO para NO₂ realizada pelo DOC. O NO₂ é melhor tratado, em proporções ideais, nos sistemas

catalíticos SCR, principalmente a temperaturas abaixo de 250°C, porém o nitrogênio nos gases de exaustão encontra-se a uma taxa de aproximadamente 90% de NO. Dessa forma, o DOC é importante não somente para oxidação de CO e HC – seu uso mais tradicional, mas também para a oxidação do NO.

2.6.2 DPF

Um filtro de partículas diesel (em inglês *diesel particulate filter* - DPF) é um dispositivo instalado no sistema de escapamento de veículos a diesel que filtra o material particulado (MP) de gases de escape. O aprisionamento das partículas ocorre por filtragem física, permitindo a fuga de componentes gasosos (SILVA, 2014). Os filtros são dispositivos cerâmicos ou metálicos que removem o material particulado por filtragem, retendo-o e queimando-o pelo próprio gás de exaustão para regeneração do sistema (MENEZES, 2009). A atuação do DPF em um sistema de exaustão pode ser vista na Figura 8.

Figura 8 - Esquema de funcionamento do filtro de partículas diesel.



Fonte: Revista O Mecânico (2022).

Desde a introdução dos DPFs no final dos anos 80, diferentes configurações geométricas foram utilizadas, porém o arranjo mais promissor é o de filtro de fluxo de parede em formato de favo de mel, pois demonstra um arranjo compacto, alta eficiência de filtração e capacidade térmica (YANG *et al.*, 2016). Na Figura 9 está representada a cerâmica utilizada para filtragem das partículas no interior do DPF.

Figura 9 - Cerâmica utilizada para filtragem do material particulado.



Fonte: Johnson Matthey (2022).

No caso da difusão, pequenas partículas se prendem às paredes porosas do filtro. Elas também podem se difundir em meio a camadas de material particulado depositado nos poros do material filtrante. Conforme as partículas continuam a se prender, o filtro se torna uma obstrução para os fluidos de exaustão, o que aumenta a pressão de retorno ao motor e pode consequentemente afetar sua performance. Dessa forma, o filtro deve ser regenerado por meio da queima ou reação periódica do material depositado (KHAIR, 2003).

Quando a temperatura do gás de exaustão excede a temperatura necessária para a combustão dessa fuligem, essa regeneração é chamada de passiva, pois ocorre naturalmente, sem a necessidade de uma intervenção, como resultado do aumento da temperatura dos gases de escape durante uma operação em alta carga. No entanto, a combustão do material particulado se dá em temperaturas elevadas (ao redor de 650 °C), valores normalmente não alcançados nos gases de escape desses veículos. Uma opção é utilizar um catalisador nas paredes do filtro. Outra possibilidade, que pode se somar à anterior, é usar um oxidante mais potente que o oxigênio. É o caso do dióxido de nitrogênio (NO_2), que pode ser gerado através da oxidação do NO, atuando efetivamente, diminuindo a temperatura de regeneração (DAEMME *et al.*, 2019).

De forma a garantir que ocorra regeneração de forma regular, utiliza-se a regeneração ativa. Nela o sistema de controle de emissões monitora a pressão no DPF, e pode acionar a regeneração quando o MP estiver no limite superior do estabelecido pelo projeto. Essa ativação consiste no aumento da temperatura dos gases de exaustão, por exemplo, pela injeção de

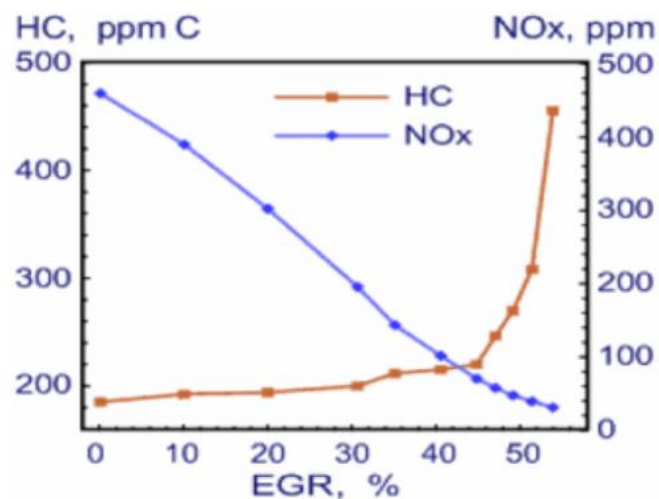
combustível extra no cilindro ou na saída dos gases de exaustão, pelo desligamento do EGR, entre outras estratégias (DAEMME *et al.*, 2019).

2.6.3 EGR

De acordo com Pereira (2019), o EGR (sigla para *exhaust gas recirculation*, que pode ser traduzido para o português como recirculação dos gases de escape) é um método de controle sobre os gases poluentes que atua diretamente na combustão do motor, alterando a maneira como ela ocorre.

Nos motores de combustão interna, o EGR pode ser entendido como um sistema que permite que os gases da exaustão sejam admitidos novamente pelo sistema de admissão. Basicamente o EGR é um sistema de recirculação de gases entre o ponto de exaustão e o ponto de admissão de um motor de combustão interna (MURARO, 2016). O uso da recirculação dos gases reduz a concentração de oxigênio e a temperatura máxima do ciclo e com isso acontecendo a redução da emissão de NO_x, porém em contrapartida essa recirculação aumenta a emissão de fuligem e material particulado influenciando diretamente no desgaste dos componentes do motor (GALDINO, 2021). A relação entre a concentração de NO_x e de material particulado em função da taxa de EGR é representada pelo Gráfico 3.

Gráfico 3 – Relação entre NO_x e material particulado.



Fonte: Squaiella (2010).

Weronka (2015) destaca que esse aumento na emissão do material particulado deve ser compensado por meio do uso de um DPF – *diesel particulate filter* (filtro de partículas diesel,

em inglês) e de um DOC – *diesel oxidation catalyst* (catalisador de oxidação diesel, em inglês).

A tecnologia EGR reintroduz, entre outros compostos, o dióxido de carbono e água na admissão do motor. O calor específico mais elevado destes compostos em relação ao oxigênio e nitrogênio admitido diretamente da atmosfera, confere maior capacidade térmica à mistura inserida no cilindro. Desta forma, os gases no interior da câmara de combustão necessitam de maior quantidade de energia para alterar o nível de agitação de suas partículas, o que dificulta o aumento da temperatura no interior do cilindro durante a combustão (LADOMMATOS *et al.*, 1998). Devido às condições de pressão e temperatura no interior dos cilindros, o dióxido de carbono e a água recirculados pelo EGR são dissociados. Esta reação química é endotérmica retirando assim calor do ambiente, resultando na redução da temperatura de combustão (WERONKA, 2015).

Um exemplo de um motor com o sistema EGR pode ser observado na Figura 10.

Figura 10 - EGR em destaque em um motor de caminhão.



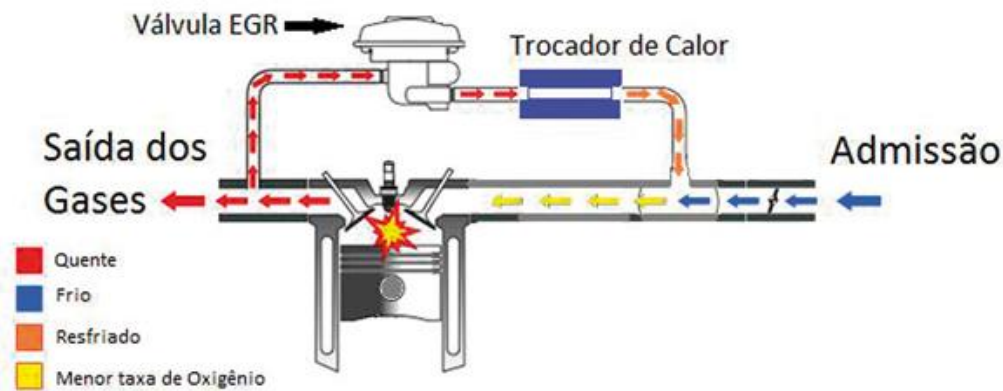
Fonte: Volkswagen Caminhões e Ônibus (2022).

Muraro (2016) explica que o sistema de EGR pode ser do tipo quente ou frio, a depender da forma como o gás de recirculação é enviado para a admissão. Caso seja um envio direto, o sistema é do tipo *hot EGR* (EGR aquecido, em inglês). Entretanto, em situações em que os gases de exaustão transitam através de um resfriador antes de serem readmitidos, tem-se o *cooled EGR* (EGR refrigerado, em inglês). Apesar da diferença entre os dois, Pereira (2019) afirma que uma das principais vantagens de se optar pelo EGR com resfriadores diz respeito à necessidade de se evitar a diminuição da densidade do ar limpo que entra pelo coletor de

admissão, pois esse efeito contribui para uma piora do rendimento do motor.

Na Figura 11 encontra-se representado um fluxo simplificado da circulação dos gases em um sistema EGR refrigerado.

Figura 11 - Fluxo dos gases no sistema *cooled* EGR.



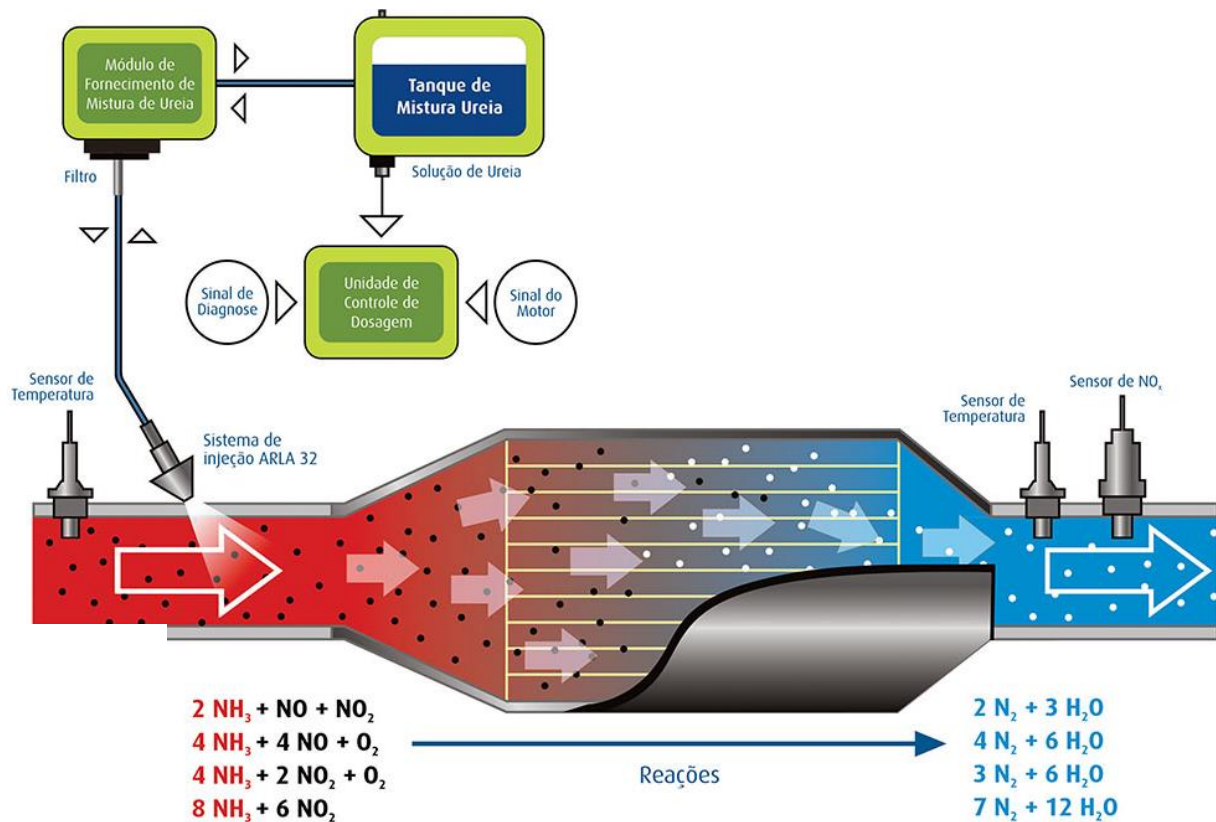
Fonte: SINDIREPA-MT (2022).

2.6.4 SCR

O procedimento de redução catalítica seletiva (SCR) aplicada nos motores Diesel consiste em reduzir os óxidos de nitrogênio (NO_x) utilizando, conforme Weronka (2015) e Silva (2014), um fluido nitrogenado a base de amônia (NH₃) como agente redutor e ureia ((NH₂)₂CO)). Pereira (2019) informa que o SCR é capaz de diminuir em 95% as emissões de NO_x.

Na Figura 12 está ilustrado o layout básico do processo de redução catalítica. O gás de exaustão queimado que flui pelo coletor de admissão consiste em HC, CO, NO_x, MP etc. Essa mistura de gases chega ao catalisador de oxidação diesel (DOC) e em seguida passa pelo filtro de partículas diesel (DPF) onde acontece a filtragem das partículas solidas. Na câmara de mistura a injeção do agente redutor acontece através da bomba dosadora que é controlada pela unidade de comando SCR. A quantidade injetada do redutor é definida de acordo com os valores lidos nos sensores de NO_x e de temperatura (GALDINO, 2021).

Figura 12 - Esquema de funcionamento do sistema SCR.



Fonte: Umicore (2022).

Para o funcionamento do sistema, deve ser armazenado em um tanque o redutor a ser utilizado no pós-tratamento. No interior do tanque existe um sistema que ajuda a manter a faixa de temperatura do redutor ideal para o tratamento pois a temperatura muito elevada ou muito baixa afetará o funcionamento do sistema. No tanque também contém um sensor de nível que é conectado a unidade de controle eletrônico do SCR que verifica a todo momento a disponibilidade do redutor para tratamento, caso o sensor indique um nível muito baixo de redutor o controlador SCR não permite a partida do veículo (GALDINO, 2021).

O controle de NOx pode ser realizado por diversos redutores, mas o desempenho do catalisador depende diretamente da combinação do par redutor-catalisador. A vida útil de um catalisador é determinada por vários fatores, um deles é a erosão causada pelo gás de combustão, a deposição de redutor depositada na superfície, envenenamento por enxofre e a deterioração térmica causada pelo envenenamento por HC. Com as informações dos sensores do SCR e do motor, o sistema realiza a atuação do sistema SCR dosando o redutor a fim de realizar o controle de emissão de NOx e de forma iterativa vai fazendo o controle necessário

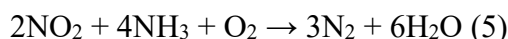
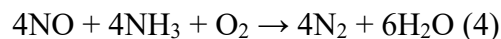
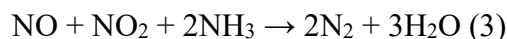
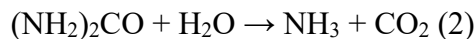
para operação, assim como o armazenamento e fornecimento de informações de diagnóstico do sistema (GALDINO, 2021).

Pereira (2019) explica que a presença de sensores de temperatura localizados antes e após o catalisador são fundamentais para acompanhar a faixa de eficiência do SCR, que deve atuar em uma janela de aproximadamente 250°C e 450°C, controlando assim o seu funcionamento.

Para que os motores possam fornecer um alto rendimento e com isso melhorar o seu desempenho com um baixo consumo de combustível, eles são configurados para mínima geração de material particulado, maximizando a geração de NOx que precisam ser tratados posteriormente (WERONKA, 2015). Caso os motores fossem adaptados para uma baixa geração de NOx, o resultado da combustão seria uma maior emissão de material particulado, basicamente combustível sem queima (MURARO, 2016).

Após a unidade de combustão, os gases de escapamento se misturam com o fluido reagente e entram em um módulo reator contendo um catalisador. A mistura se difunde através do catalisador e o reagente interage seletivamente com o NOx, em uma faixa de temperatura específica e na presença do catalisador e de oxigênio (SILVA, 2014). Em geral, a taxa de consumo depende diretamente da operação do veículo, a carga em que o mesmo transporta e alguns outros fatores externos. Normalmente o consumo do agente redutor varia de 2 a 4% em relação ao consumo do combustível (GALDINO, 2021).

Conforme Silva (2014), a reação 2 representa a hidrólise da ureia para formação de amônia, enquanto as reações 3, 4 e 5 subsequentes são referentes à decomposição do monóxido de nitrogênio (NO) e do dióxido de nitrogênio (NO₂) em gás nitrogênio (N₂) e água (H₂O) – que são inofensivos à saúde humana conforme afirma Weronka (2015) – por meio da reação com amônia.



Como o NO₂ sempre está presente nos gases de exaustão, a reação (3) é pertinente e pode ser considerada a equação de redução principal, porém a reação (4) é a reação SCR padrão (JOHNSON, 2014).

Weronka (2015) afirma ainda que a amônia utilizada neste processo de redução é oriunda de uma solução aquosa de ureia a 32,5%, passando por uma superfície cerâmica superaquecida. No Brasil, essa solução é denominada Agente Redutor Líquido Automotivo (ARLA 32).

Em outros países é conhecido como AdBlue, AUS 32, H2Blue, entre outros nomes comerciais. O fluido é normatizado internacionalmente através da norma ISO 22241. As especificações do fluido, definidas pelo Inmetro em sua Portaria nº 389, de 06 de agosto de 2013, são apresentadas no Quadro 2 (SILVA, 2014).

Quadro 2 - Especificações do Arla 32.

Parâmetro	Valores		Unidade	Métodos de Ensaio
	Mínimo	Máximo		
Ureia	31,8	33,2	% por peso	ABN NBR ISO 22241-2
Alcalinidade como NH ₃	-	0,2	% por peso	
Biureto	-	0,3	% por peso	
Insolúveis	-	20	mg/kg	
Aldeído	-	5	mg/kg	
Fosfato	-	0,5	mg/kg	
Alumínio	-	0,5	mg/kg	
Cálcio	-	0,5	mg/kg	
Ferro	-	0,2	mg/kg	
Cobre	-	0,2	mg/kg	
Zinco	-	0,2	mg/kg	
Cromo	-	0,2	mg/kg	
Níquel	-	0,2	mg/kg	
Magnésio	-	0,5	mg/kg	
Sódio	-	0,5	mg/kg	
Potássio	-	0,5	mg/kg	
Densidade a 20 °C	1087,0	1093,0	kg.m ⁻³	ISO 3675 ou ISO 12185
Índice de refração a 20 °C	1,3814	1,3843	-	ABN NBR ISO 22241-2

Fonte: Silva (2014).

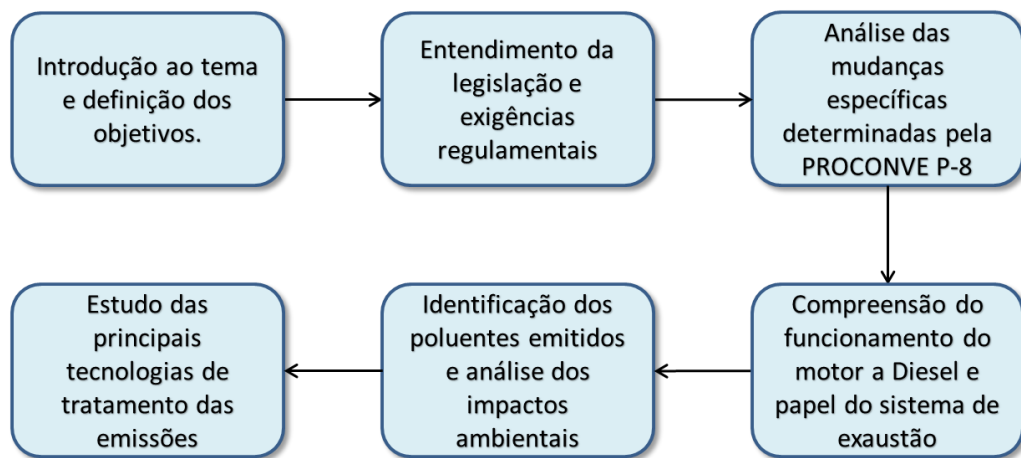
3 METODOLOGIA

Com o objetivo do trabalho definido, algumas pesquisas acadêmicas tornaram-se fundamentais para estabelecer a base teórica que permitiu o avanço na análise do problema. Algumas plataformas online foram de suma importância, como o IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), o Ministério do Meio Ambiente e o CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo), para a compreensão dos principais impactos negativos causados pelos gases poluentes emitidos pelo motor a Diesel e como as emissões são regulamentadas.

Além disso, alguns portais foram de grande utilidade, como o Google Acadêmico e o ScienceDirect, na busca por trabalhos e estudos referentes ao tema pesquisado.

Na Figura 13 é possível observar o fluxograma que representa a linha de raciocínio traçada ao longo do desenvolvimento da fundamentação teórica.

Figura 13 - Fluxograma da fundamentação teórica.



Fonte: Autores.

Algumas das principais etapas realizadas estão descritas abaixo:

1. Delimitou-se a pesquisa por meio da definição dos objetivos e compreensão dos parâmetros de estudo do trabalho;
2. Foram identificados os órgãos competentes pela determinação dos limites de emissões e compreendeu-se quais são os itens regulamentados;
3. Análise específica das mudanças trazidas pela PROCONVE em sua fase P-8;

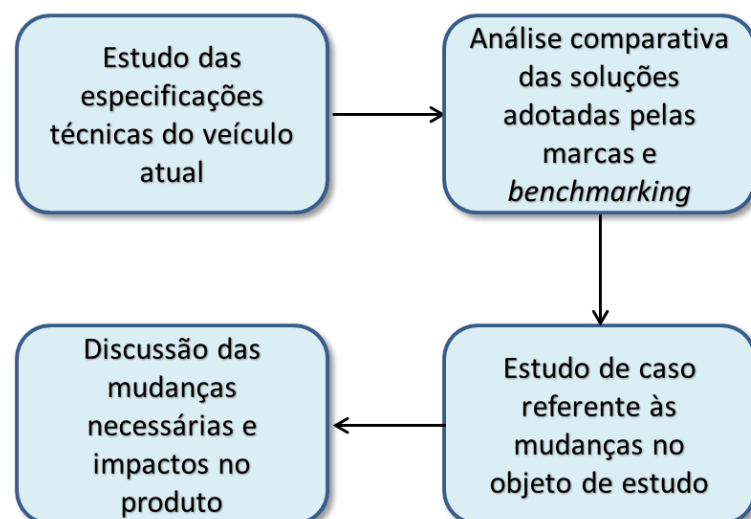
4. Realizados estudos aprofundados em literaturas para compreensão do funcionamento do motor a Diesel;
5. Buscas por literaturas que explicam de forma clara de que forma o meio ambiente é impactado pelos gases poluentes;
6. Estudo aprofundado das principais tecnologias de tratamento das emissões por meio de literaturas relacionadas ao assunto.

O estudo de caso, normalmente, é realizado a partir de um caso em particular e, posteriormente, é realizada uma análise comparativa com outros casos, fenômenos ou padrões existentes (CAJUEIRO, 2015).

Tendo isto em vista, o trabalho propõe a realização de um estudo de caso em uma empresa nacional afetada pela atualização da legislação e que precisa, portanto, adequar seus produtos aos novos limites de emissão. Para tanto, desenvolveu-se um *benchmarking* que permitiu entender como as principais empresas do segmento de veículos pesados atuaram perante os desafios das atualizações da norma PROCONVE ao longo da última década.

Na Figura 14 é possível observar de forma esquemática um fluxograma que representa a metodologia utilizada para elaboração do estudo de caso.

Figura 14 - Fluxograma do estudo de caso.



Fonte: Autores.

É possível observar abaixo uma descrição das etapas adotadas:

1. As especificações do produto foram estudadas por meio de informações técnicas disponíveis, permitindo assim compreender as características do produto;
2. Realizada uma busca pelas principais marcas do segmento e analisadas as modificações propostas em atualizações da norma PROCONVE ao longo dos últimos anos, por meio de informações fornecidas pelas próprias marcas;
3. Feito um estudo de caso, analisando as principais modificações ocorridas no veículo específico, contando com o auxílio de software de CAD para estudar visualmente o impacto no produto;
4. Discutidas as principais atualizações, elementos acrescentados ao sistema de exaustão e conclusão da importância do tema e necessidade de mudanças.

4 RESULTADOS

4.1 ESTUDO DE CASO

O presente estudo de caso tem como objetivo realizar uma análise comparativa entre as mudanças adotadas para atender à legislação PROCONVE P-8 em veículos de porte pesado operando atualmente sob a norma PROCONVE P-7.

4.1.1 Veículo atual

O objeto de estudo foi um caminhão com capacidade de carga de 14 a 26 toneladas, caracterizado como um veículo de porte pesado, próprio para deslocamentos em longos trajetos rodoviários e urbanos. O motor, com capacidade de 4.600 cilindradas, utiliza como fonte de combustível o Diesel com teor de enxofre S10 (10 partes por milhão – ppm) e suas especificações técnicas podem ser observadas no Quadro 3.

Quadro 3 – Especificações técnicas do motor.

Dados do motor	
Nº de cilindros em linha	4
Potência líquida máxima (kw)	137
Torque líquido máximo (Nm)	700
Consumo mínimo de combustível (g/kWh)	202
Comprimento (mm)	978
Largura (mm)	876
Altura (mm)	936
Peso aproximado (kg)	510

Fonte: Autores.

A tecnologia para tratamento dos gases conta com o EGR no motor aliado a um catalisador com DOC alocado no sistema de exaustão para oxidação pós combustão.

Dentro dos parâmetros de emissões de nitrogênio e material particulado especificados pela PROCONVE P-7, a combinação EGR + DOC é suficiente para que o veículo opere dentro da legalidade, isto é, as emissões dos óxidos de nitrogênio e material particulado permanecem abaixo de 2 e 0,02 g/kWh, respectivamente, em um ciclo estacionário.

Isso é possível graças à característica do DOC de oxidação do monóxido de nitrogênio, transformando-o em dióxido de nitrogênio conforme a Reação 1 (capítulo 2.6.1) citada no referencial teórico.

Além disso, o EGR conta com uma câmara de resfriamento antes do retorno dos gases à câmara de admissão, o que dificulta a formação dos óxidos de nitrogênio ainda durante a combustão do Diesel, entendendo que a formação do NOx ocorre principalmente em altas temperaturas, conforme citado no Referencial Teórico (capítulo 2.4.1).

Para análise do modelo em questão, elaborou-se um estudo em software de CAD para análise visual do sistema de exaustão completo do veículo avaliado, como pode ser visto na Figura 15.

Figura 15 - Sistema de exaustão de um veículo pesado sob a norma PROCONVE P-7.

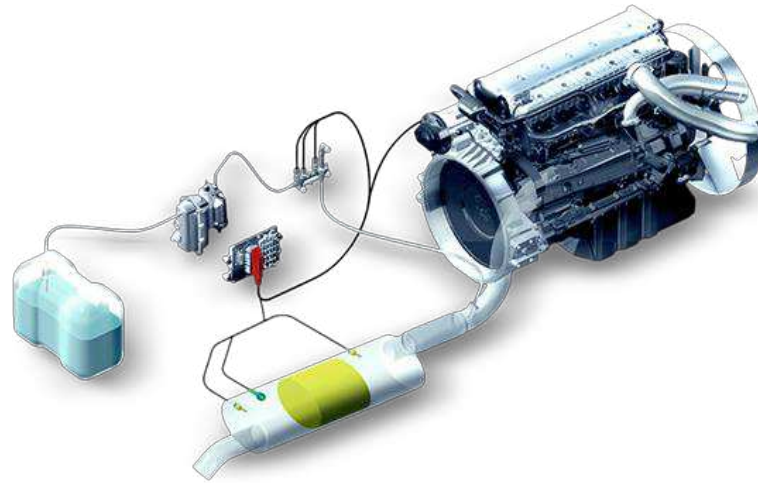


Fonte: Autores.

4.1.2 Propostas para o PROCONVE P-8

Para atender à norma PROCONVE P-7, em vigor até o fim de 2022 para caminhões pesados, as montadoras normalmente optam entre a tecnologia EGR ou a SCR para atuar em conjunto com o DOC e com o DPF. Dois exemplos podem ser citados, como a tecnologia BlueTec 5 (vide Figura 16) desenvolvida pela Mercedes-Benz, cuja base de funcionamento é o protagonismo do SCR e do abastecimento do Arla 32 para tratamento dos gases; e o uso dos motores MAN (vide Figura 17) pela Volkswagen Caminhões e Ônibus, em que o EGR, já equipado, se torna o responsável por reduzir os poluentes.

Figura 16 - Sistema de exaustão com a tecnologia BlueTec 5.



Fonte: Mercedes-Benz (2022).

Figura 17 - Motor MAN D0836 com recirculação de gases.



Fonte: MAN Engines (2022).

A partir do PROCONVE P-8 é considerada a necessidade de se combinar ambas as tecnologias SCR e EGR em modelos cujos motores apresentam altos níveis de *engine out emissions* (emissões de saída do motor, em tradução livre), sendo essa união encarada como uma das alternativas mais viáveis para o atendimento dos limites de emissão. Conforme citado no referencial teórico, o uso do EGR no motor aumenta a emissão de material particulado devido à redução da temperatura dos gases de admissão na câmara de combustão, portanto o DOC e o DPF a jusante do motor se fazem fundamentais na sequência da saída dos tubos de

escape. Entretanto também é de conhecimento que o SCR demanda um aumento na temperatura da combustão com o intuito de reduzir o material particulado e aumentar o índice de NOx, que é tratado posteriormente pela reação de redução com a solução aquosa de ureia. Sendo assim, essa combinação funciona com um módulo de gerenciamento eletrônico junto aos sensores de níveis, de modo a ativar os sistemas de acordo com a demanda, ou seja, os métodos de tratamento dos gases se intercalam e dividem o protagonismo conforme o ciclo de atuação do veículo.

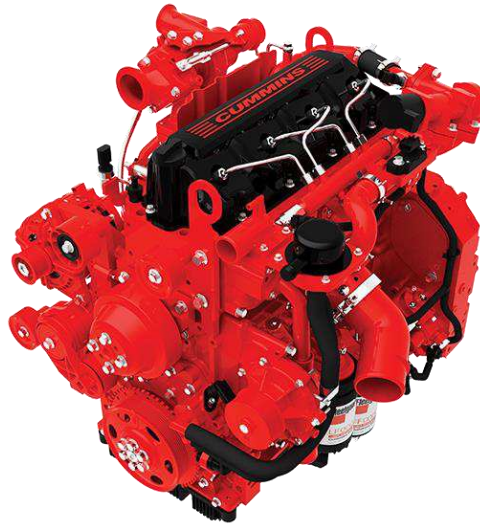
Entretanto é relevante notar também a possibilidade do desenvolvimento de um sistema que opera somente com o SCR, sem a necessidade de um motor equipado com EGR. Esse tipo de configuração traz como vantagem uma menor emissão de material particulado, o que exige menos do DOC e do DPF e conseqüentemente elimina a obrigatoriedade de se realizar periodicamente uma regeneração ativa do filtro com o veículo parado.

Essa alternativa se apresenta como viável também para veículos que atualmente operam com motores sem EGR durante a fase PROCONVE P-7, pois dessa forma não há a necessidade de se alterar o espaço da carroceria e a montagem dos demais componentes ao redor do motor para adaptação a um modelo diferente. Isso permite até mesmo que o veículo preparado para atender à norma PROCONVE P-8 seja comercializado sem necessariamente modificar o motor já utilizado. Para isso faz-se necessário o uso de uma tecnologia desenvolvida para essa aplicação, ou seja, um sistema de exaustão com um SCR mais complexo e com boa capacidade de reduzir de forma eficaz os monóxidos de nitrogênio.

De acordo com a Volkswagen Caminhões e Ônibus (2022), o modelo VW Delivery 11.180 faz uso do motor Cummins ISF 3,8L e trabalha dentro da norma de emissão PROCONVE P-7, porém conforme a Cummins (2022), esse motor possui certificação até o Euro IV quando utilizado com um sistema de exaustão equipado com SCR, com possibilidade de implementação do Euro V com o mínimo de impacto nas instalações.

Na Figura 18 é possível observar um exemplo de motor da fabricante Cummins sem EGR e com certificação Euro IV.

Figura 18 - Motor Cummins ISF 3.8L.

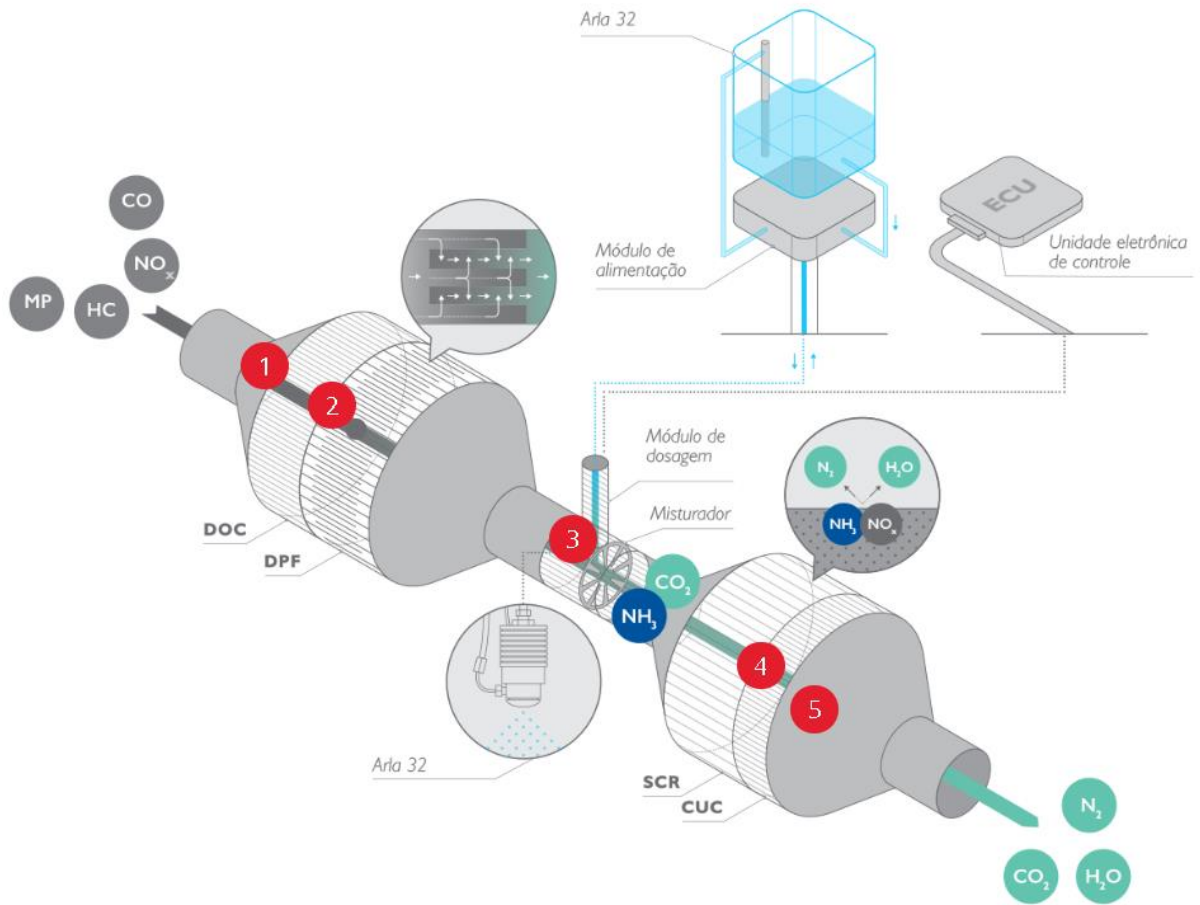


Fonte: Cummins (2022).

A existência dessa relação mostra que é possível atingir maiores níveis de redução da emissão com maior investimento no tratamento dos gases pós-exaustão, mesmo utilizando motores de certificação mais baixa, contanto que esses motores sejam projetados com essa finalidade, contanto por exemplo com uma temperatura de trabalho mais alta na câmara de combustão para diminuir a formação de hidrocarbonetos e monóxido de carbono.

Um exemplo de layout de um sistema de escapamento utilizando somente o SCR para tratamento dos gases é representado pela Figura 19. Além disso, também é possível observar um exemplo de tanque de Arla 32, montado no chassi do veículo, na Figura 20.

Figura 19 - Layout de um sistema de exaustão contendo DOC, DPF e SCR.



Fonte: FPT Industrial (2022).

Figura 20 - Tanque adicional de plástico para contenção do fluido Arla 32.



Fonte: Bepo (2022).

Alguns fornecedores ofertam como solução para o tratamento dos gases pós-exaustão um catalisador compacto, que contém os elementos filtrantes e catalíticos dentro de uma mesma carcaça. Esse design tem como intuito liberar mais espaço no chassi para componentes de outros sistemas, além de reduzir o impacto visual para o usuário do veículo. Esse modelo de catalisador é informalmente conhecido como *gas box* (caixa de gases, traduzido de forma literal para o português) e pode ser visto na Figura 21.

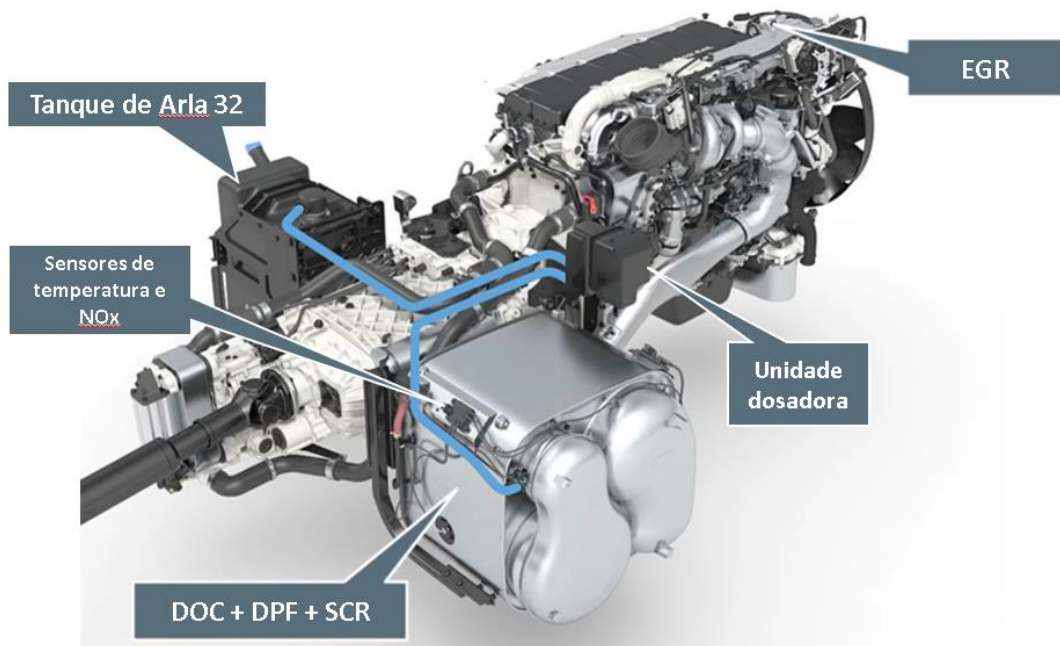
Figura 21 - Catalisador com DOC, DPF e SCR dentro de uma mesma geometria.



Fonte: Tenneco (2022).

Como exemplo de um modelo de caminhão pesado circulando com o nível de emissão Euro VI, equivalente ao PROCONVE P-8 na Europa, pode-se citar o MAN TGX, cujo sistema de exaustão pode ser observado na Figura 22.

Figura 22 - Sistema de exaustão do modelo MAN TGX.



Adaptado de: MAN Truck & Bus (2022).

4.1.3 Veículo PROCONVE P-8

Tendo em vista as características de cada tecnologia, as soluções adotadas pelas principais marcas do segmento no mercado externo, o histórico das modificações dos produtos no mercado nacional em meio às atualizações anteriores do PROCONVE, as especificações técnicas do veículo analisado e prezando pela competitividade no mercado, optou-se pelo desenvolvimento de um veículo que atua somente com o SCR para o tratamento dos gases exauridos pelo motor. Para isso, algumas atualizações no sistema de exaustão foram necessárias.

O motor deixa de ser equipado com o EGR, entendendo-se que algumas de suas desvantagens diminuem seu custo-benefício em virtude das atualizações da norma. Sendo assim, um novo motor sem recirculação de gases deve ser selecionado no mercado, com características que se adequam ao SCR no tratamento dos gases após a exaustão.

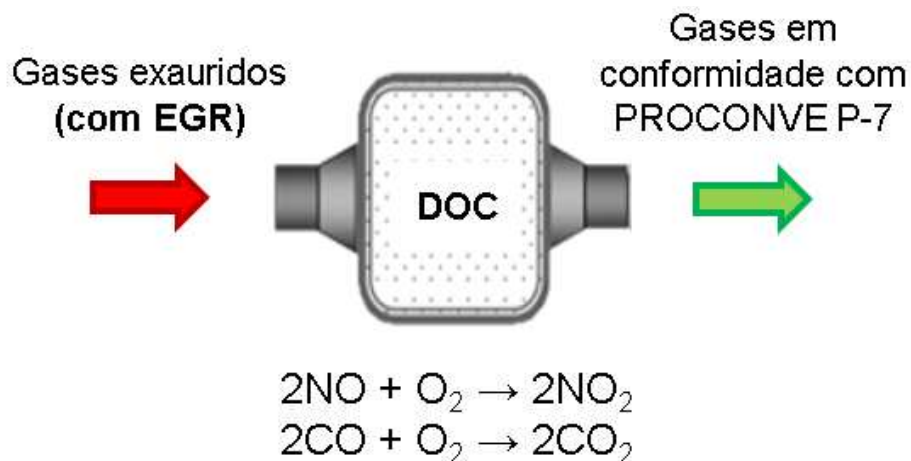
Diferentemente do veículo na fase PROCONVE P-7, o DOC não é suficiente para redução do material particulado. Sendo assim, um DPF precisa acompanhar o sistema para realizar a filtragem física das partículas residuais, instalado posteriormente ao DOC e antes do SCR.

O SCR, por sua vez, vem acompanhado de outros itens essenciais para o seu bom funcionamento que vão além do tanque de Arla 32, como: uma unidade dosadora, cuja função

é controlar a quantidade correta de ureia necessária para a reação catalítica, sendo isso feito com o auxílio de diversos sensores de NOx instalados entre o motor e ao longo do sistema de exaustão; um misturador que realiza o trabalho de misturar a ureia aos gases de exaustão, de forma a potencializar a reação que ocorrerá no catalisador; e o ASC (*Ammonia Slip Catalyst*, catalisador de excesso de amônia, em português), cujo intuito é oxidar quantidades excedentes de amônia que podem ocasionalmente passar pelo SCR sem reagirem com os outros elementos.

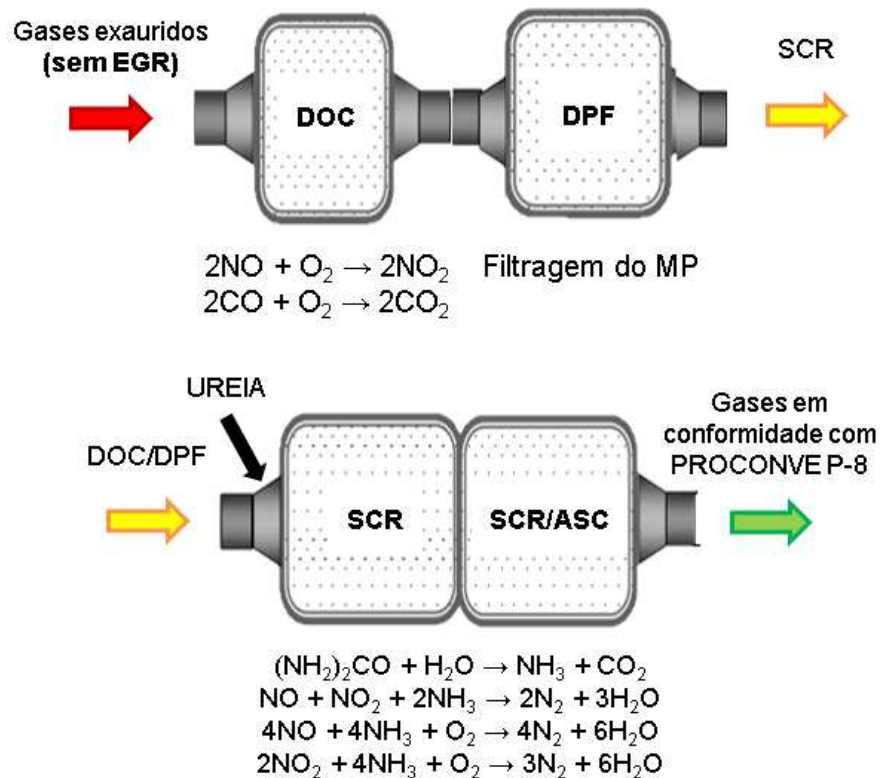
Para efeito de comparação, é possível observar na Figura 23 o fluxo do tratamento dos gases no veículo antes de sua atualização para o PROCONVE P-8, ou seja, atuando ainda em conformidade com o PROCONVE P-7. Na Figura 24 está representado o esquema do veículo atualizado com a norma que entrará em vigor a partir de 2023, contemplando todos os elementos acrescentados.

Figura 23 - Fluxo dos gases de exaustão no veículo PROCONVE P-7.



Fonte: Autores.

Figura 24 - Fluxo dos gases de exaustão no veículo PROCONVE P-8.

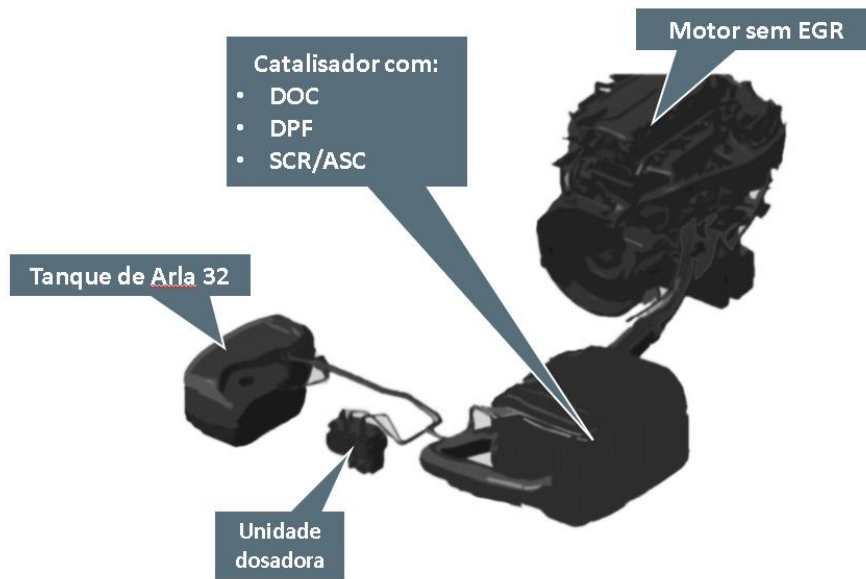


Fonte: Autores.

É importante ressaltar que as reações descritas na Figura 24 ocorrem dentro de uma mesma geometria, utilizando para tanto um *gas box*, sendo esse equipamento favorável para uma menor ocupação de espaço no chassi devido ao seu formato compacto, tendo em vista a grande quantidade de elementos acrescentados para um funcionamento eficiente do sistema de exaustão, levando-se em consideração que ainda se faz necessário um ponto de montagem para o tanque de Arla 32.

Entendendo as necessidades de atualizações, supôs-se um layout para o sistema de exaustão na Figura 25, que faça uso dessas tecnologias e atenda de forma satisfatória às demandas regulatórias.

Figura 25 - Sistema de exaustão de um veículo pesado sob a norma PROCONVE P-8.



Fonte: Autores.

Fica evidente, portanto, uma importante mudança na estratégia para atender às exigências regulatórias. No veículo em sua versão PROCONVE P-7, os gases eram tratados por meio de uma ação diretamente na combustão, prevenindo a formação do NOx por meio de uma diminuição da temperatura de trabalho na câmara devido à recirculação dos gases. Para o controle dos gases exauridos após a combustão, somente o DOC em um catalisador era necessário para oxidação das partículas.

Já no veículo atualizado, o foco passa a ser o produto da combustão, ou seja, é feito um maior investimento em tecnologias que atuarão nos gases já queimados, porém antes de sua dispersão no meio ambiente. Isso evita alterações na combustão e possíveis perdas de eficiência do motor. O veículo faz uso, portanto, do SCR como seu maior aliado para o cumprimento dos objetivos do projeto, sendo eles o atendimento da norma PROCONVE P-8 e, ainda mais significativo, a contribuição para a redução da poluição na atmosfera.

5 CONCLUSÃO

Neste trabalho foram analisados alguns dos principais componentes do sistema de exaustão afetados pela atualização da norma PROCONVE para sua fase P-8 e como o veículo estudado foi modificado devido às novas exigências regulamentais.

A primeira parte do trabalho teve como cerne apresentar o contexto socioambiental do problema pesquisado, ou seja, entender de que maneira a sociedade atua para contribuir com a diminuição dos efeitos prejudiciais ao meio ambiente causados pelo transporte rodoviário de cargas e passageiros, tanto em âmbito nacional quanto internacional.

Isso é feito com o apoio de órgãos governamentais que apresentam medidas para limitar a quantidade de poluentes emitidos por automotores, podendo-se citar o CONAMA como o principal Conselho atuante sobre tais legislações e o emitente da Resolução nº 490, que estabeleceu a fase PROCONVE P-8 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores a partir do início do ano de 2023.

Posteriormente foi possível compreender a importância de tais regulamentações por meio da caracterização do óleo Diesel como fonte de combustível e os principais gases poluentes emitidos por sua queima, principalmente o óxido de nitrogênio (NOx) e o material particulado (MP), elementos fundamentais para o estudo devido à sua limitação perante a lei.

Em seguida foi feita uma descrição aprofundada dos sistemas que operam no movimento de um automóvel, fazendo uso de uma fundamentação teórica que permite o entendimento do funcionamento do motor de combustão interna movido a Diesel e como a queima do combustível contribui para a poluição do meio ambiente. Isso foi feito por meio da identificação dos principais gases exauridos e como cada um deles impacta negativamente o meio ambiente e a saúde humana.

Tendo isto em vista, foram avaliadas algumas das principais tecnologias que atuam na redução da emissão de poluentes para a atmosfera, sendo o EGR (*Exhaust Gas Recirculation*, recirculação de gases de exaustão) e o SCR (*Selective Catalytic Reduction*, redução catalítica seletiva) os principais métodos mencionados neste trabalho.

O EGR possibilita a volta de parte dos gases de exaustão ao coletor de admissão, diminuindo assim a temperatura de combustão e reduzindo conseqüentemente a quantidade de óxidos de nitrogênio na mistura queimada, porém traz como desvantagem uma emissão de material particulado mais alta, o que exige um controle desse elemento no sistema de escape. O EGR contribui com a diminuição das emissões agindo diretamente na combustão, alterando a maneira como ela ocorre.

Em contrapartida, o SCR não altera a combustão, mas sim atua nos produtos gerados por ela, evitando assim afetar o desempenho do motor, pois sua ação se resume a uma conversão dos óxidos de nitrogênio oriundos da queima em água e gás nitrogênio, por meio da reação com a amônia. Apesar disso, a tecnologia exige um controle rígido da temperatura por parte do desenvolvimento dos sistemas e a calibração do motor, pois faixas de temperatura muito abaixo ou acima podem gerar produtos indesejados após a reação com o Arla 32.

Com o avanço das tecnologias e com o auxílio de sensores de temperatura, acoplados ao motor e ao longo do sistema de escapamento, o SCR se tornou a opção mais viável para a atualização do veículo estudado tendo em vista sua capacidade de tratar os gases de forma eficiente sem diminuir a eficiência do motor, evitando possíveis insatisfações do consumidor após a compra do produto.

A realização deste trabalho permite compreender que é possível alinhar os interesses de empresas do setor privado com um interesse significativo da sociedade, que é a redução da poluição da atmosfera terrestre. Isso é possível por meio de estudos aprofundados de soluções de engenharia que permitam alinhar a expectativa dos consumidores com as exigências feitas pelos órgãos governamentais.

Sendo assim, evidencia-se que a parceria entre a indústria automotiva e o setor ambiental do governo pode render bons frutos em busca de um denominador comum, que é a preservação do meio ambiente e da saúde do ser humano.

6 INDICAÇÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Tendo em vista que a preocupação mundial com a degradação do meio ambiente tende a aumentar, em função de uma maior conscientização da população com os impactos negativos dos poluentes, é de se esperar que novas fases da legislação PROCONVE sejam publicadas ao longo das próximas duas décadas. Na Europa, já se discute um avanço para a norma Euro 7, o que impactará profundamente no desenvolvimento de novas tecnologias para o tratamento de emissões e principalmente na viabilidade da adaptação dos modelos de veículos existentes. Sendo assim, fica evidente que novos estudos sobre o assunto serão de grande relevância para o meio da Engenharia.

Além disso, é perceptível que os combustíveis derivados do petróleo, apesar de sua eficiência e praticidade, aliados à aceitação do público devido à sua adaptação na sociedade atual, apresentam perigos à natureza devido ao grande número de poluentes emitidos após a sua queima. Sendo assim, um caminho interessante para pesquisas futuras deve envolver fontes alternativas, como por exemplo os automóveis elétricos movidos a bateria.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA SENADO. **Protocolo de Kyoto**. Brasília: Senado Notícias, 2022. Disponível em: <<https://www12.senado.leg.br/noticias/entenda-o-assunto/protocolo-de-kyoto>>. Acesso em julho de 2022.

ALMEIDA, V. C. *et al.* Análise dos compostos orgânicos voláteis no reaproveitamento de resíduos no desenvolvimento de materiais construtivos. **Brazilian Journal of Development**, [s.l.], v. 6, n. 3, p. 15511-15530, 2020.

ANFAVEA - Associação Nacional dos Fabricantes de Veículos Automotores. **Diesel e Emissões: A Nova Legislação 2012**. São Paulo: Motorpress Brasil Editora, 2012. 8 p.

BAIRD, C.; CANN, M. **Química ambiental**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2011. 844p.

BEPO. **Tanque Arla S368**. Disponível em: <<https://www.bepo.com.br/produtos/linha-pesada/tanques-de-combustivel/tanques-de-combustivel-plastico/tanque-arla-plastico-compativel-com-sc-s5-20122018>>. Acesso em agosto de 2022.

BOCK, C. P. **Redução dos poluentes emitidos por caminhões**. XVIII CONGRESSO METODISTA DE INICIAÇÃO E PRODUÇÃO CIENTÍFICA - XVII SEMINÁRIO DE EXTENSÃO - XII SEMINÁRIO PIBIC/UMESP. São Paulo, 2015.

BOSCH, R. **Bosch Automotive Handbook**. 5. ed. SAE International, 2000. 277p.

BRADY, R. N.; Encyclopedia of Energy. **Internal Combustion (Gasoline and Diesel) Engines**. Burnaby: HiTech Consulting Ltd, Canadá, 2013. p. 515-528.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Diretoria de Educação Ambiental; Ministério da Educação. Coordenação Geral de Educação Ambiental. **Programa Nacional de Educação Ambiental – ProNEA**. 3. ed. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 2005. 105p.

BRUNETTI, F. **Motores De Combustão Interna**. Vol. 1 & 2. São Paulo: Blucher, 2012.

CAJUEIRO, R. **Manual Para Elaboração De Trabalhos Acadêmicos: Guia Prático Do Estudante**. 1ª ed. Petrópolis, RJ: Vozes, 2015. 158p.

CAPANA, G. H. **Estudo Do Impacto Do Enxofre Presente No Diesel Na Emissão De Poluentes E Em Tecnologia De Pós-Tratamento De Gases De Escape**. 117 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automotiva) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Análise da proposta de Resolução CONAMA para a nova fase de controle de veículos pesados do PROCONVE (P-8) aprovada em reunião Plenária do CONAMA em 30 de outubro de 2018**. São Paulo, 2018.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Qualidade do ar – Poluentes**. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em junho de 2022.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Câmara técnica de qualidade ambiental e gestão de resíduos. 7ª e 8ª reuniões extraordinárias**. Brasília, 2018. Documentos disponíveis em <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/>>. Acesso em julho de 2022.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **O que é o CONAMA?** Brasília, 2018. Disponível em: <<http://conama.mma.gov.br/o-que-e-o-conama>>. Acesso em julho de 2022.

CUMMINS. **ISF3.8 FOR LIGHT COMMERCIAL VEHICLE**. Disponível em: <<https://mart.cummins.com/imagelibrary/data/assetfiles/0043005.pdf>>. Acesso em junho de 2022.

CUMMINS. **Selective Catalytic Reduction (SCR) Engines**. Disponível em: <<https://www.cummins.com/en/in/engines/bsiv-selective-catalytic-reduction-scr>>. Acesso em 21 de maio de 2022.

DAEMME, L. *et al.* **Impacto Do Processo De Regeneração Do Filtro De Partículas (DPF) Nas Emissões Reguladas E Não Reguladas Em Veículo Comercial Leve Do Ciclo Diesel**. XXVII Simpósio Internacional de Engenharia Automotiva. São Paulo, 2019.

FPT Industrial. **STAGE V / TIER 4 FINAL**. Disponível em: <<https://www.fptindustrial.com/global/en/pages/emission-offroad-stagev-hiescr2.aspx>>. Acesso em junho de 2022.

FRANÇA, M. L. **Estimativa das emissões de gases do efeito estufa e proposta de mitigação dos impactos ambientais gerados por um empreendimento da construção civil: um estudo de caso**. 111 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016.

GALDINO, T. **Tecnologias para controle das emissões de NOx em motores diesel – PROCONVE P-7**. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Natal, 2021.

GUARIEIRO, L. L. N. *et al.* Poluentes Atmosféricos Provenientes da Queima de Combustíveis Fósseis e Biocombustíveis: Uma Breve Revisão. **Revista Virtual de Química**. Salvador, v. 3, n. 5, p. 434-445. 2011.

JOHNSON, T. V. Review of Selective Catalytic Reduction (SCR) and Related Technologies for Mobile Applications. Nova Iorque: Springer Science+Business Media. **Emerging Technologies and Regulations, Corning Environmental Technologies**. Corning Incorporated, EUA, 2014.

JOHNSON MATTHEY. **Diesel particulate filter**. Disponível em: <<https://matthey.com/products-and-markets/transport/mobile-emissions-control/diesel-applications/diesel-particulate-filter>>. Acesso em maio de 2022.

KATARE, S. R. *et al.* Diesel Aftertreatment Modeling: A Systems Approach to NOx Control. Dearborn: **Chemical Engineering Department, Ford Research and Advanced Engineering**. Michigan (EUA), 2007.

KELLER, V. **Otimização do Processo de Análise de Qualidade em um Laboratório**. Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Química) – Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2021.

KHAIR, M. **A Review of Diesel Particulate Filter Technologies**. Costa Mesa: **Southwest Research Institute**. Califórnia (EUA), 2003.

LADOMMATOS, N. *et al.* **The Effects on Diesel Combustion and Emissions of Reducing Inlet Charge Mass Due To Thermal Throttling With Hot EGR**. Detroit: **SAE Technical Paper, International Congress and Exposition**. Michigan (EUA), 1998.

MAN Engines. **On-Road Engines and Components**. Disponível em: <https://www.man.eu/ntg_media/media/content_medien/doc/man_engines_1/produkte/on_road/OnRoad_EN.pdf>. Acesso em julho de 2022.

MAN Truck & Bus. **The Euro 6 Driveline for MAN TGX and TGS**. Disponível em: <<https://youtu.be/4P7GXk9i13w>>. Acesso em agosto de 2022.

MENDES, F. E. **Avaliação de programas de controle de poluição atmosférica por veículos leves no Brasil**. 189 f. Tese (Doutor em Ciências em Planejamento Energético) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2004.

MENEZES, E. **Produção De Trabalho, Geração De Contaminantes E Tratamento Pós-Combustão Em Motores Ciclo Diesel**. 170 f. Tese (Doutor em Química) – Instituto de Química da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.

MERCEDES-BENZ. **Por que BlueTec5?** Disponível em: <<https://www.mercedes-benz-trucks.com.br/onibus/motores-bluetec/por-que-bluetec>>. Acesso em julho de 2022.

MURARO, M. A. **Efeito Do Uso De Recirculação De Gases De Exaustão (EGR) Na Contaminação Do Lubrificante E No Desgaste De Anel E Camisa De Motor De Combustão Interna Com Ciclo Diesel**. 241 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2016.

MARQUES NETO, J. **Avaliação Da Utilização Do Atual Diesel (Combustível) Comercial Brasileiro (Ano De Referência 2003-2004) Para Motores Com Gerenciamento Eletrônico De Combustível E Sistema De Recirculação De Gases De Escape (EGR), Certificados Pela**

Legislação EPA 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, Guaratinguetá, 2003.

PEREIRA, D. T. P. **Análise Dos Métodos De Controle E Redução Dos Poluentes Emitidos Pelos Motores De Combustão Interna No Brasil.** Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal Fluminense, Niterói, 2019.

PETROBRAS. **ÓLEO DIESEL: Informações Técnicas.** Disponível em: <https://petrobras.com.br/data/files/04/93/72/4C/5A39C710E2EF93B7B8E99EA8/Manual-de-Diesel_2021.pdf>. Acesso em junho de 2022.

REVISTA O MECÂNICO. **Saiba o que é material particulado e como combatê-lo.** Disponível em: <<https://omecanico.com.br/saiba-o-que-e-material-particulado-e-como-combate-lo/>>. Acesso em julho de 2022.

ROCHA, G. O. *et al.* Química Sem Fronteiras: O Desafio Da Energia. São Paulo: **Química Nova**, v. 36, n. 10, p. 1540-1551, 2013.

RODRIGUES, E. **Manutenção e eficácia do sistema SCR para reduzir os níveis de emissão de poluentes, provenientes de motores a Diesel.** Trabalho de Graduação (Graduação em Engenharia Mecânica) – Centro Universitário UNIFACVEST, Lages, 2019.

RUSSELL, A.; EPLING, W. Diesel Oxidation Catalysts. Waterloo: **Catalysis Reviews: Science and Engineering**. 53:4, p. 337-423, Ontário (Canadá), 2011.

SILVA, T. **Inventário Da Emissão Do Material Particulado Proveniente De Diesel E Biodiesel Brasileiro: Estudo em um banco de provas de motores.** 88 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

SIMÊNCIO, E. C. A. **Motores de Combustão Interna.** Londrina: Editora e Distribuidora Educacional S.A., 2019. 214 p.

SINDIREPA-MT. Sindicato Intermunicipal da Indústria de Reparação de Veículos e Acessórios do Estado de Mato Grosso. **Cuidados com a manutenção em sistemas EGR**

aplicados em Vans e Utilitários com motor Diesel. Disponível em: <<http://www.sindicatodaindustria.com.br/noticias/2017/08/72,115384/cuidados-com-a-manutencao-em-sistemas-egr-aplicados-em-vans-e-utilitarios-com-motor-diesel.html>>. Acesso em julho de 2022.

SQUAIELLA, L. **Efeito Do Sistema De Recirculação Dos Gases De Escape No Controle De Emissões De NOx Em Motores A Diesel.** 160 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Automobilística) - Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2010.

TENNECO. **Clean Air Overview.** Disponível em: <<https://www.tenneco.com/products-brands/clean-air>>. Acesso em julho de 2022.

TWIGG, M. Roles of Catalytic Oxidation in Control of Vehicle Exhaust Emissions. Royston: **Catalysis Today: Elsevier**, 117(4), 407–418. Reino Unido, 2006.

UMICORE. **Umicore comemora 30 anos da produção de catalisadores no Brasil e redução das emissões de poluentes.** Disponível em: <<https://www.umicore.com.br/pt/news/umicore-comemora-30-anos-da-producao-de-catalisadores/>>. Acesso em junho de 2022.

VARELLA, C.; SANTOS, G. **Noções Básicas de Motores Diesel.** 5. ed. Seropédica: Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2010. 44 p.

VAN GERPEN, J. *et al.* The Biodiesel Handbook. **Basics of Diesel Engines and Diesel Fuels.** Moscow: Academic Press and AOCS Press, Universidade de Idaho (EUA), 2010. p. 21-30.

VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS. **Delivery 11.180.** Disponível em: <<https://man-static-hml.s3.amazonaws.com/3d324bce-f2ac-4aa2-ab93-32141acdf36a.pdf>>. Acesso em junho de 2022.

VOLKSWAGEN CAMINHÕES E ÔNIBUS. **Tecnologias para motores diesel – EGR.** Disponível em: <<https://youtu.be/ckBawOyITkI>>. Acesso em maio de 2022.

WERONKA, F. **Inventário Da Emissão Do Material Particulado E Gasoso Proveniente De Motores Euro V: Eficiência Dos Sistemas De Pós-tratamentos EGR e SCR.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

YANG, S. *et al.* Diesel Particulate Filter Design Simulation: A Review. Pequim: **Advances in Mechanical Engineering**, vol. 8(3) 1–14, China, 2016.