



BACHARELADO EM ENGENHARIA MECÂNICA

Matheus Maciel Basso

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE REDUÇÃO DE POLUENTES DE MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA DE CICLO DIESEL**

PORTO ALEGRE

Dezembro de 2022

MATHEUS MACIEL BASSO

**ESTUDO DE VIABILIDADE DE REDUÇÃO DE POLUENTES DE MOTORES DE  
COMBUSTÃO INTERNA DE CICLO DIESEL**

Trabalho de conclusão de curso em engenharia apresentado ao Centro Universitário Ritter dos Reis, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Telles Bartex

PORTO ALEGRE

Dezembro de 2022

## **DEDICATÓRIA**

Dedico este trabalho aos meus pais e meus avós, que me educaram e sempre me apoiaram e me incentivaram em todas minhas escolhas.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço aos meus pais Tatiana Maciel e Carlos Basso, por sempre me fornecerem suporte e incentivo necessário para que eu pudesse estudar e avançar na minha vida pessoal e profissional, sempre elogiando e apoiando as minhas conquistas.

Agradeço aos meus avós Clarice Lima e Selvino Basso (*in memorian*) e Joceli Maciel (*in memorian*), por todos os ensinamentos compartilhados e por todo apoio que me forneceram.

Agradeço aos meus amigos e colegas de graduação Andressa e Kevin, por me ajudarem e me apoiarem durante a graduação de engenharia mecânica.

Agradeço aos meus colegas de trabalho, Engenheiro eletricista Henrique Ravello e o Engenheiro mecânico Fernando Koefender, por me ajudarem e me apoiarem durante o processo de elaboração deste trabalho de conclusão de curso, ao gerente Clayton Dias pelo apoio e liberação nos dias necessários para elaboração deste trabalho.

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Sérgio Telles Bartex, pelo apoio, atenção, compreensão e ensinamentos ao longo da graduação.

## RESUMO

Este trabalho apresentou as tecnologias envolvidas no tratamento de gases de escape de motores de ciclo diesel, em referência a legislação, o PROCONVE estágio "P" ou EURO V. Assim, esse trabalho teve como objetivo geral, propor um estudo de caso, para facilitar o entendimento dos métodos abordados que são: catalisador por oxidação DOC, recirculação dos gases de escape EGR e controle de emissão de poluentes por ECM. A metodologia que foi utilizada para este estudo de caso foi feita com referenciais teóricos, livros e *sítes*, onde foi possível entender como são os métodos para diminuição de emissões de poluentes em motores de ciclo diesel, assim elaborando e buscando compreender qual é o melhor método para um motor de ciclo diesel de até 3,9 litros com a utilização de combustível Diesel S10. Os resultados mostraram que o método catalisador por oxidação DOC é 37,65% mais econômico se comparado ao controle de poluentes por ECM. Também o catalisador por oxidação DOC consegue transformar 98% de gases tóxicos em substâncias menos ofensivas, comparado ao método de recirculação de gases por ECM que consegue transformar 70% de gases tóxicos em substâncias menos ofensivas. Com base no estudo o método catalisador por oxidação DOC se apresentou o com maior número de benefícios, quando comparado aos outros dois métodos (controle de poluentes por ECM e catalisador por oxidação DOC).

**Palavras chaves:** Emissões de poluentes; EURO V; Catalisador por oxidação; Controle de poluentes por ECM; Recirculação de gases.

## **LISTA DE SIGLAS**

SCR - Sistema de Redução Catalítica Seletiva

ARLA - Agente de Redução Líquido Automotivo

PROCONVE - Programa de Controle da Emissões do Ar por Veículos Automotores

ESC - Ciclo de Regime Constante

ELR - Ciclo Europeu de Resposta em Carga

ETC - Ciclo de Regime Transiente

MCI - Motores de combustão interna

EPA - Agência de Proteção Ambiental Americana

COV - compostos orgânicos voláteis

FAP - Filtro anti-partículas

DPF - Diesel Particulate Filter

EGR - Recirculação dos gases de escape

ECM - Electronic Control Module

CAN - rede de área do controlador

IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente

DOC - Catalisador por oxidação

## LISTA DE FIGURA

Figura 1: Gráfico indicando aumento de veículos em Porto Alegre – RS.....	15
Figura 2: Tempos dos motores de 4 tempos de ciclo diesel .....	17
Figura 3: Diagrama PV de um motor de combustão interna operando em ciclo diesel .....	18
Figura 4: Tabela de limite de emissões de poluentes 2019 .....	19
Figura 5: Imagem de patente de motores de ciclo diesel, 1893 .....	23
Figura 6: sistema de admissão e exaustão em MCI de ciclo Diesel.....	24
Figura 7: Sistema de MCI ciclo diesel com turbinas.....	25
Figura 8: Catalisador com vista de corte para ilustrar a admissão dos gases e como e o processo interno de sua deposição.....	27
Figura 9: Sistema EGR em modo de funcionamento .....	28
Figura 10: Componentes do Sistema de Gerenciamento Eletrônico.....	29
Figura 11: Processo de redução catalítica seletiva SCR.....	30
Figura 12: Estratégia de pesquisa.....	32
Figura 13: Sistema de catalisador por oxidação DOC.....	36
Figura 14: Sistema de recirculação de gases de escape (EGR).....	37
Figura 15: Componentes do Sistema de Gerenciamento Eletrônico.....	38
Figura 16: Diagrama dos sensores nos motores Diesel.....	39
Figura 17: Layout esquemático do sistema SCR integrado com filtro de partículas Diesel.....	42
Figura 18: Opacímetro (NA-9000).....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Componentes do sistema de recirculação de gases de escape (EGR).....	37
Tabela 2: Componentes sistema (ECM) .....	39
Tabela 3: Principais funções que podem ser controladas pelo ECM .....	40
Tabela 4: Principais características dos métodos abordados no trabalho.....	45

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>12</b>
1.1 PROBLEMA DE PESQUISA .....	13
1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA.....	13
1.3 OBJETIVOS .....	13
<b>1.3.1 Objetivo Geral</b> .....	<b>13</b>
<b>1.3.2 Objetivos Específicos</b> .....	<b>13</b>
1.4 JUSTIFICATIVA .....	14
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA</b> .....	<b>16</b>
2.1 MOTORES DE CICLO DIESEL.....	16
2.2 PROCONVE.....	19
<b>2.2.1 Tecnologias para a Eliminação dos Particulados Diesel</b> .....	<b>20</b>
<b>2.2.2 Diesel</b> .....	<b>21</b>
<b>2.2.3 Histórico de Motores a Ciclo Diesel</b> .....	<b>22</b>
<b>2.2.4 Sistema de Admissão e Exaustão</b> .....	<b>24</b>
<b>2.2.5 Emissões no Ciclo Diesel</b> .....	<b>25</b>
<b>2.2.6 Combustão em Motores Diesel</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.7 Estudo para a Redução das Emissões de Poluentes em Motores Diesel em Processos Mecânicos</b> .....	<b>26</b>
<b>2.2.8 Estudo para a Redução das Emissões de Poluentes em Motores Diesel em Processos Eletrônico</b> .....	<b>28</b>
<b>2.2.9 Sistema Redução Catalítica Seletiva</b> .....	<b>29</b>
<b>3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS</b> .....	<b>31</b>
3.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO .....	31
<b>3.2 Problematização dos poluentes emitidos por motores ciclo diesel</b> .....	<b>32</b>
<b>3.3 Fundamentações teóricas no Brasil</b> .....	<b>33</b>
<b>3.4 Análise de métodos do MCI</b> .....	<b>33</b>
<b>3.5 parametrizações dos motores</b> .....	<b>34</b>
<b>3.5.1 Tamanho do motor</b> .....	<b>34</b>
<b>3.5.2 Tipo de combustível das comparações</b> .....	<b>34</b>
<b>3.6 Orçamentação</b> .....	<b>34</b>
<b>3.7 Resultados esperados</b> .....	<b>35</b>

<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>36</b>
4.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE EXASUTÃO .....	36
4.1.1 Catalisador por Oxidação DOC .....	36
4.1.2 Recirculação dos Gases de Escape (EGR) .....	37
4.1.3 Controle de Emissão de Poluentes por (ECM) .....	39
4.1.4 Aplicações do Sistema de Gerenciamento Eletrônico (ECM) .....	41
4.1.5 Aplicações do Sistema por SCR.....	42
4.1.6 Análise de Emissões de poluentes.....	43
4.2 COMPARAÇÃO E RESULTADOS .....	45
4.3 DISCUSSÕES DOS SISTEMAS .....	47
4.3.1 Considerações Catalisadores de Oxidação (DOC).....	47
4.3.2 Considerações Recirculação dos Gases de Escape (EGR).....	47
4.3.3 Considerações Controle de Emissão de Poluentes (ECM).....	47
4.3.4 Considerações do Sistema de SCR.....	48
4.3.5 considerações Finais .....	48
<b>5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....</b>	<b>49</b>
5.1 CONCLUSÕES DO PRESENTE TRABALHO .....	49
5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	50
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>51</b>

## 1. INTRODUÇÃO

Ao longo de anos, devido ao avanço da tecnologia e políticas ambientais, o desenvolvimento de novos padrões para o processo de emissão de gases poluentes a atmosfera, derivados do processo de combustão de automóveis de motores de ciclo diesel, conseqüentemente vem se estudando como se diminuir o nível de gases gerados após o processo de combustão de motores a diesel. Segundo instituto nacional de câncer (INCA), o diesel é um dos combustíveis mais utilizados em veículos no Brasil e com isso necessitamos elaborar novas tecnologias para diminuir a quantidade de gases liberados após o processo de combustão, que são altamente prejudiciais à saúde e ao meio ambiente. (JOSÉ ALENCAR, 2012).

Os motores diesel são máquinas básicas que geram energia para veículos utilizados principalmente em trabalhos que necessitam de elevadas potências, como ônibus, grandes caminhões, tratores e máquinas para dragagem e mineração. Os motores diesel vêm atraindo uma porção crescente do mercado mundial de veículos de carga leve, cujos motores fornecem baixa potência. Na Europa, por exemplo, 100% dos veículos de carga pesada, e cerca de 60% dos de carga leve, incluindo os utilitários, e ainda 20% dos carros para transporte de passageiros, o que inclui as vans, são movidos à diesel segundo matéria da revista química nova. (SILVANA, 2004).

Pode se reduzir o número de particulados ("*particulate traps*") diesel pelo uso de tecnologias para o processo de exaustão, como por exemplo filtros para particulados que diminui a fumaça preta liberada, cujo objetivo era apenas reter as partículas sólidas geradas no processo de combustão. Como também através de estudos se desenvolveu catalisadores de oxidação bastante conhecidos como "*honeycomb*" e como catalisadores de três vias ("*three-way catalysts*") logo esse modelo de catalisador utiliza-se de um filtro de fluxo contínuo como apoio para os catalisadores de oxidação, os quais são capazes de oxidar CO e os HC presentes nos gases de exaustão e, ainda, reduzir a emissão de material particulado pela oxidação da fração orgânica solúvel e dos compostos absorvidos no processo de catalização, que dependendo do motor pode chegar a oxidar de 30 a 80% dos HC gasosos, e de 40 a 90% do CO presente na exaustão diesel segundo matéria da revista química nova. (SILVANA, 2004).

## 1.1 PROBLEMA DE PESQUISA

No Brasil e no mundo um grande problema que vem sendo discutido é a emissão de gases poluentes no processo de exaustão de motores de ciclo diesel que, ao serem inalados, podem provocar o desenvolvimento de doenças respiratórias, logo motores de ciclo diesel vem sendo um grande emissor de poluentes. Desta forma, as questões propostas por este trabalho são:

- Como reduzir a emissão de poluentes de motores de ciclo diesel.
- Estudo de viabilidade de como diminuir a emissão de poluentes sem ter perda significativa de potência em motores de ciclo diesel.

## 1.2 DELIMITAÇÃO DA PESQUISA

Neste trabalho será estudado e analisado motores de ciclo diesel de até 3,9 litros, que são utilizados em automóveis e veículos de carga leve além dos parâmetros estabelecidos pelo CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) sobre níveis aceitados para emissão de poluentes de motores de ciclo diesel.

## 1.3 OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho foram divididos em objetivo geral e objetivos específicos, os quais são apresentados a seguir.

### 1.3.1 Objetivo Geral

Objetivo geral deste trabalho consiste no estudo e na seleção do sistema de redução de poluentes mais eficiente, levando em consideração o custo/benefício apresentado.

### 1.3.2 Objetivos Específicos

- Levantar parâmetros aceitáveis para emissão de poluentes no processo de combustão de motores a ciclo diesel, mediante a legislação PROCONVE que é baseada na EURO 5.

- Compreender, na emissão de motores de ciclo diesel, qual dos sistemas de redução de poluentes é mais eficiente em relação aos parâmetros aceitáveis de emissões.
- Comparar resultados dos sistemas compreendidos em relação aos parâmetros aceitáveis de emissões.

#### 1.4 JUSTIFICATIVA

Ao longo de anos, devido ao avanço da tecnologia e políticas ambientais, o desenvolvimento de novos padrões para o processo de emissão de gases poluentes a atmosfera, derivados do processo de combustão de automóveis de motores de ciclo diesel, conseqüentemente vem se estudando como se diminuir o nível de gases gerados após o processo de combustão de motores a diesel.

De acordo com (BRAUN *et al.*, 2003), métodos de reduzir emissão de poluentes em motores de combustão interna, de ciclo diesel podem ser divididos em dois grupos:

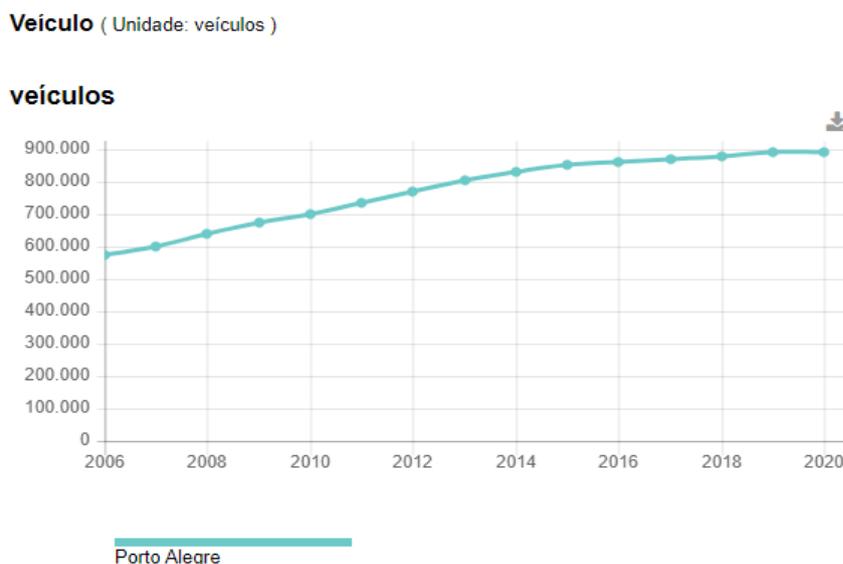
a) o que busca a redução do material particulado pelos processos que ocorrem em motores de combustão interna. Como exemplo, pode-se destacar as melhorias no óleo diesel e óleos e lubrificantes, a utilização de aditivos ou combustíveis misturados. Também estão incluídas melhorias na injeção de combustível na câmara de combustão e na recirculação dos gases de exaustão.

b) destinado a remover do particulado dos compostos da exaustão, após a sua formação e antes de serem lançadas na atmosfera. Este grupo inclui filtros de particulados, a utilização destes filtros em combinação com aditivos óleo diesel, catalisadores de oxidação e catalisadores de partículas.

Além disso, nos últimos anos, pode-se destacar o grande crescimento da frota de veículos no Brasil. Na Figura 1, pode-se observar um aumento significativo do número de veículos (leves e pesados), na última década, na Região Metropolitana de Porto Alegre.

A Figura 1, é o indicativo do aumento da quantidade de veículos motores, na cidade de Porto Alegre, no estado do Rio grande do sul do ano de 2006 até o ano de 2020.

Figura 1: Gráfico indicando aumento de veículos em Porto Alegre – RS



Fonte: IBGE (2020).

Conseqüentemente, o aumento das emissões dos automóveis levou o governo a implementar medidas e regulamentações ambientais no país. Destaque especial para o PROCONVE, Programa Nacional de Controle da Emissões Veicular, que funciona estabelecendo limites máximos de emissão para veículos novos vendidos no mercado interno.

Com base em estudos realizados pela empresa CHIPTRONIC foi criado o sistema SCR, ou Sistema de Redução Catalítica Seletiva. Um sistema SCR é basicamente um sistema de pós-tratamento de gases de escape que melhora o desempenho do veículo e reduz as emissões de gases poluentes. O princípio básico envolve a injeção de um fluido denominado ARLA (ARLA (Agente de Redução Líquido Automotivo), que é continuamente monitorado por um sistema eletrônico. Este líquido à base de ureia de alta pureza reage com um catalisador com NOx (óxidos de nitrogênio) e CO<sub>2</sub> (dióxido de carbono) para produzir amônia e água naturalmente não tóxicas.

O sistema SCR só passa a funcionar quando o motor, já em funcionamento, atinge certa temperatura. O sensor de NOx envia constantemente as informações coletadas para a ECU, que se certifica de que todos os resíduos foram devidamente transformados em componentes atóxicos, este sistema pode reduzir em 95% as emissões de NOx e de 4 a 6% do dióxido de carbono.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo irá abordar as bibliografias utilizadas para a construção do trabalho como um todo, a fim de fornecer compreensão aprofundada dos conceitos e métodos utilizados para conduzir a pesquisa.

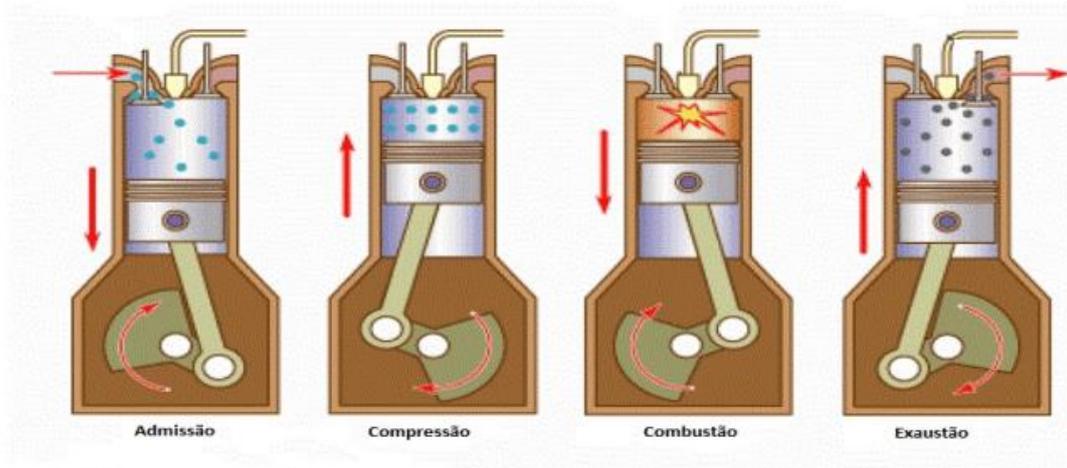
### 2.1 MOTORES DE CICLO DIESEL

Para entender como se diminuir a emissão de poluentes de motores de ciclo diesel, é necessário compreender o seu funcionamento. Um motor de ciclo diesel é uma máquina que transforma energia térmica em energia mecânica. Essa energia é obtida a partir da combustão do diesel no cilindro do motor que por sua vez é semelhante ao ciclo Otto possuindo o mesmo princípio de admissão, compressão, combustão e exaustão. No entanto, o motor de ciclo diesel utiliza maior compressão, inflamando o combustível em vez de usar a vela de ignição.

O trabalho do motor começa com a ignição, devido à compressão do ar a temperatura na câmara aumenta e a combustão ocorre para que atinja o ponto de autoignição do combustível. O óleo diesel introduzido na câmara através do injetor fica em contato com o ar esquentado durante a fase de combustão. Por fim, o acelerador ajusta a quantidade de combustível fornecida pela bomba e consequentemente a potência que o motor irá atingir, segundo (MARSHALL BRAIN, 2000).

Um motor de combustão interna pode ser definido como um conjunto de partes fixas e móveis que utiliza a energia térmica do combustível para realizar trabalho. Motores de ciclo diesel é o motor de combustão interna com ignição por compressão, chamados ICO, esses motores podem ser motores de quatro tempos ou dois tempos, neste estudo, nos concentraremos em motores de quatro tempos, o nome refere-se às fases em que o motor ocorre em seu ciclo de operação, cada fase é classificada como tempo, e há quatro tempos durante o ciclo do motor. Segundo (VARELLA & SANTOS, 2010), mostrado na Figura 2 onde representa os 4 tempos de motores a ciclo diesel.

Figura 2: Tempos dos motores de 4 tempos de ciclo diesel



Fonte: Simão Brito Kislansky (2017).

A seguir tem-se o detalhamento de cada fase, conforme (SEARS, F. W.; ZEMANSKY, M.W., 1973):

- **Admissão:** As válvulas de admissão se abrem e o embolo desloca-se até o PMI, admitindo ar para dentro do cilindro.
- **Compressão:** As válvulas de admissão se fecham e o embolo desloca-se do PMI ao PMS comprimindo o ar contido no interior do cilindro.
- **Combustão:** O combustível é injetado dentro do cilindro pouco antes da compressão máxima, devido ao súbito aumento de temperatura proveniente do aumento da pressão o combustível em contato com o ar inflama-se, a força gerada pela queima da mistura ar combustível empurra o embolo para o PMI.
- **Exaustão:** As válvulas de escape abrem e o embolo desloca-se do PMI ao PMS expulsando os resíduos provenientes da queima do combustível.

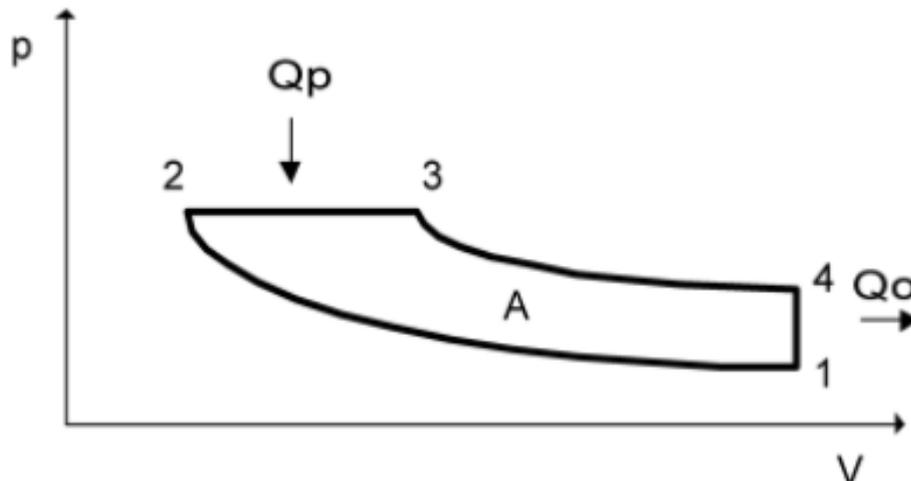
Em geral, o estado inicial de um ciclo diesel é aquele que promove a compressão adiabática e move o motor para o próximo estado. Neste estado, ocorre uma transição isobárica à medida que o motor recebe calor. Durante a transição de um estado para o outro, ocorre a expansão adiabática. Finalmente, ocorre uma transformação isovolumétrica onde o motor perde calor e o ciclo começa a partir daí. (MARSHALL BRAIN, 2000).

Na Figura 3, é um diagrama P-V do ciclo diesel, onde QP é o calor recebido e QO é o calor perdido pelo meio. Observe que os pontos numerados 1, 2, 3 e 4 são estados do sistema termodinâmico. (SCHULZ, 2009).

Onde nos processos demonstrados no gráfico pode-se compreender que: segundo Christian Strobel em Máquinas Térmicas I Ciclos térmicos a vapor:

- Primeiro para segundo estágio ocorre a compressão isentrópica (pressão constante);
- Segundo para terceiro estágio ocorre a expansão isobárica (fase da ignição);
- Terceiro para quarto estágio ocorre a expansão isentrópica (expansão do gás);
- Quarto para primeiro estágio ocorre a descompressão isocórica (abertura da válvula de escape, para eliminação dos gases gerado no processo de combustão).

Figura 3: Diagrama PV de um motor de combustão interna operando em ciclo diesel



Fonte: Schulz (2009).

## 2.2 PROCONVE

Programa de Controle da Emissões do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) criado em 1986 pela Resolução nº 20 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). 18/1986, aprovou resoluções, diretrizes, prazos e normas legais, emissões admissíveis para diferentes categorias de veículos a motor. (IBAMA, 2016).

Os limites adotados pelo PROCONVE são baseados nos limites estabelecidos da norma Euro 5, esses limites podem ser observados na tabela seguinte:

Figura 4: Tabela de limite de emissões de poluentes 2019

	NO <sub>x</sub> g/kWh	IIC g/kWh	CO g/kWh	CH <sub>4</sub> <sup>(2)</sup> g/kWh	MP g/kWh	NMIIC g/kWh	Opaci- dade (m <sup>-1</sup> )	NH <sub>3</sub> (ppm) valor médio
Ensaio ESC/ ELR	2,00	0,46	1,5	N.A.	0,02	N.A.	0,5	25
Ensaio ETC <sup>(1)</sup>	2,00	N.A.	4,00	1,10	0,03 <sup>(3)</sup>	0,55	N.A.	25

(1) Motores a gás são ensaiados somente neste ciclo

(2) Somente motores a gás são submetidos a este limite

(3) Motores a gás não são submetidos a este limite

Fonte: Coleção meio ambiente PROCONVE terceira edição (2011).

Para poder compreender melhor a Figura 4, tabela de limites de emissões se faz necessário compreender um pouco melhor a compreensão de algumas siglas:

- Ciclo ELR – Ciclo Europeu de Resposta em Carga – Ciclo de Teste Consiste em quatro estágios de rotação contínua com cargas aumentando de 10 a 100% para determinar a opacidade das emissões de escape;
- Ciclo ESC - conhecido como ciclo europeu em regime constante - consiste em um ciclo Testado com 13 modos de operação em estado constante;
- Ciclo ETC – conhecido como o ciclo europeu em estado transitório – ciclo de teste consiste em 1.800 modos transitórios que simulam as condições do mundo real segundo a segundo;

- CH<sub>4</sub> – metano;
- CHO – aldeídos totais;
- CO – Monóxido de carbono;
- CO<sub>2</sub> – dióxido de carbono;
- HC – Hidrocarbonetos;
- NMHC – hidrocarbonetos não metano – parcela dos hidrocarbonetos totais, descontada a fração de metano;
- MP – Material particulado;
- NH<sub>3</sub> – amônia;
- THC – Total de Hidrocarbonetos – substâncias orgânicas, já contendo frações de combustível não queimado no processo de combustão do motor e subprodutos resultados da combustão, que estão presentes no gás de escapamento e que são detectados através do detector de ionização de chama. (PORCONVE PROMOT, 2011).

Ensaio e testes para medir níveis de monóxido de carbono, hidrocarbonetos, óxidos de nitrogênio e Material particulado no escapamento de motores de veículos pesados Deve seguir métodos e procedimentos estabelecidos para o Ciclo de Regime Constante (ESC), o Ciclo Europeu de Resposta em Carga (ELR) e o Ciclo de Regime Transiente (ETC) da Diretiva 1999/96 do Parlamento Europeu e do Conselho, de 13 de dezembro de 1999, suas sucedâneas e complementos, até a publicação de norma brasileira equivalente. (PROCONVE PROMOT, 2011.)

### **2.2.1 Tecnologias para a Eliminação dos Particulados Diesel**

Muitas soluções têm sido propostas visando a eliminação dos particulados, como exemplo o uso de combustíveis alternativos, tais como óleos vegetais modificados ou gás natural comprimido, a adição de metanol ou etanol ao Diesel. Outro modo de reduzir particulados é a adição de compostos organometálicos ao Diesel, esses se decompõem na câmara de combustão, que por seguinte se forma micropartículas metálicas ou de óxido do metal, que os quais vão agir como catalisadores de oxidação, assim minimizando a formação de particulados, este procedimento vem se destacando como um dos mais eficientes do momento.

### 2.2.2 Diesel

O óleo diesel à base de petróleo, inflamável, moderadamente tóxico, volátil, transparente, isento de sólidos em suspensão, com odor forte e característico, inclui principalmente átomos de carbono e hidrogênio e, em menor quantidade, enxofre, nitrogênio e oxigênio. (PETROBRAS, 2014).

O diesel é o resultado de frações destiladas do processo craqueamento, o ponto de ebulição está entre querosene e óleo lubrificante, Entre 180°C e 360°C, é regulado pelo teor de enxofre, com quatro tipos comerciais S1800, S500, S50, S10 e outros modelos. Apenas o S-500 e o S10 estão disponíveis para venda e distribuição no setor de transporte rodoviário. A sigla indica o teor de enxofre em miligramas por quilograma (ppm de combustível) ou partes por milhão de enxofre. (COSTA, 2017).

O diesel S10, um combustível com baixo teor de enxofre, foi produzido e comercializado no Brasil desde 2009. Com diesel S10, as emissões de NOx podem ser reduzidas em até 98% e Teor de enxofre até 80%. O cetano melhora a eficiência da combustão de combustível, Melhora as partidas a frio e reduz a formação de fumaça branca. S10 possui um teor de cetano de 48 muito mais que o S500, que pode chegar a 42. Veículos produzidos após 2012 só podem usar o S10 e Veículos mais antigos também podem usar esse combustível. (CARBOROIL, 2018).

O biodiesel é obtido através de um processo chamado transesterificação. Triglicerídeos presentes em materiais: óleos e gorduras de origem vegetal ou animal reagidos com álcoois primários, etanol ou metanol a fim de gerar dois produtos: éster e glicerina. Somente após o seguinte processo de purificação para atender às especificações de qualidade, o éster pode ser utilizado para motores ciclo diesel. (ANP, 2020).

Devido ao seu uso limitado em motores a diesel, o biodiesel tornou-se um Alternativa ao combustível diesel de origem fóssil. Tem uma aplicação importante quando misturado com diesel com baixo teor de enxofre, pois proporciona a este último uma melhor Propriedades de lubrificação. nomenclatura específica usado mundialmente para determinar a concentração de biodiesel em misturas. Biodiesel BXX, onde XX é a porcentagem em volume de biodiesel mistura. (BIODIESELBR, 2006).

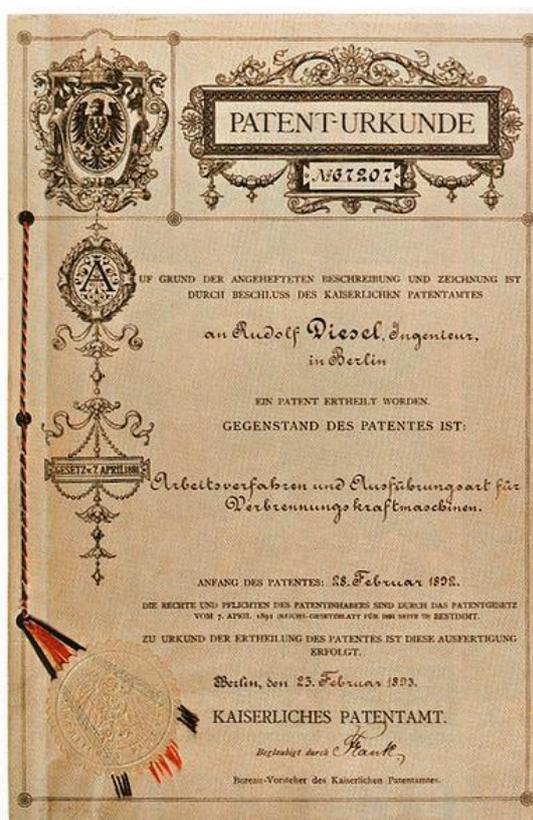
O Brasil usou pelo menos 11% desde setembro de 2019. O biodiesel misturado ao óleo diesel e comercializado em todo o território nacional com possibilidade de utilizar ainda mais. (BIODIESELBR, 2006).

### 2.2.3 Histórico de Motores a Ciclo Diesel

Em 1890, um inventor alemão, Rudolf Diesel patenteou sua invenção de um eficiente motor de ignição por compressão. O ciclo original proposto por Rudolf Diesel era um ciclo de temperatura constante. Nos anos posteriores, seu ciclo original foi alterado e adotou o ciclo de pressão constante, conhecido como ciclo de Diesel, na figura 5 consta o documento de patente datado de 1893, data de patente do motor de ciclo diesel. (CONNOR NICK, 2019).

O ciclo diesel é um dos ciclos termodinâmicos mais comuns encontrados em motores de automóveis e descreve o funcionamento de um motor de pistão de ignição por compressão típico, de acordo com a Figura 5, pode-se observar o registro de patente feita para motores de ciclo diesel. (CONNOR NICK, 2019).

Figura 5: Imagem de patente de motores de ciclo diesel, 1893



Fonte: Wikipédia (2005).

Algumas das diferenças que existe entre motores de ciclo diesel e motores de ciclo otto, vai ser apresentadas abaixo, Segundo (NICK CONNOR, 2019):

- O motor diesel usa ignição por compressão em vez de ignição por faísca;
- Devido à alta temperatura desenvolvida durante a compressão adiabática, o combustível inflama espontaneamente à medida que é injetado. Portanto, não são necessárias velas de ignição, como utilizadas em motores de ciclo otto.

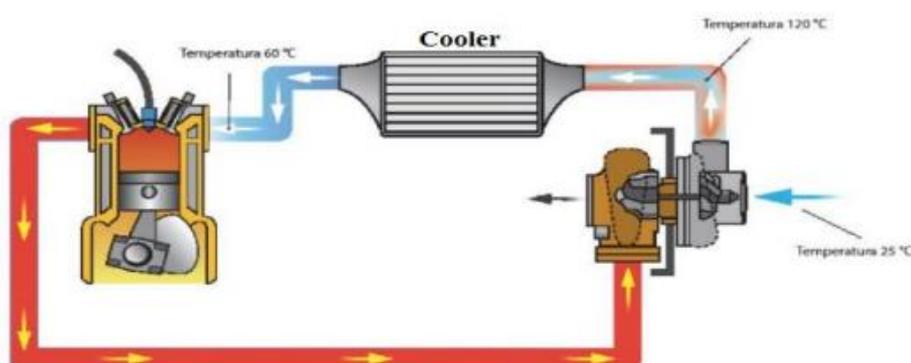
#### 2.2.4 Sistema de Admissão e Exaustão

A função do sistema de admissão de ar é inicialmente garantir a entrega de ar interno nos cilindros com qualidade e temperatura de combustão adequadas. então no sistema de exaustão, os gases produzidos pela combustão são retirados dos cilindros e emitido para a atmosfera com a menor quantidade de partículas. pode ser destacado A possível reutilização desses gases, que constitui um dos principais métodos Melhorar o MCI (Motores de combustão interna), para reduzir as emissões de poluentes no meio ambiente. (TELERMAN, 2019).

O ar ambiente é aspirado através dos filtros de ar e comprimido pelo turbo compressor, neste momento, a temperatura sobe por dois motivos: a proximidade dos gases quentes do escapamento e a própria compressão exercida pelo rotor. Então O ar aquecido passa pelo cooler ou inter-coolers, reduzindo a temperatura e a sua densidade aumentada; portanto, o número de moléculas de oxigênio a serem colocadas no cilindro é maior. (TELERMAN, 2019).

A Figura 6 indica uma geral do sistema de admissão e exaustão nos motores de combustão interna de ciclo Diesel.

Figura 6: sistema de admissão e exaustão em MCI de ciclo Diesel

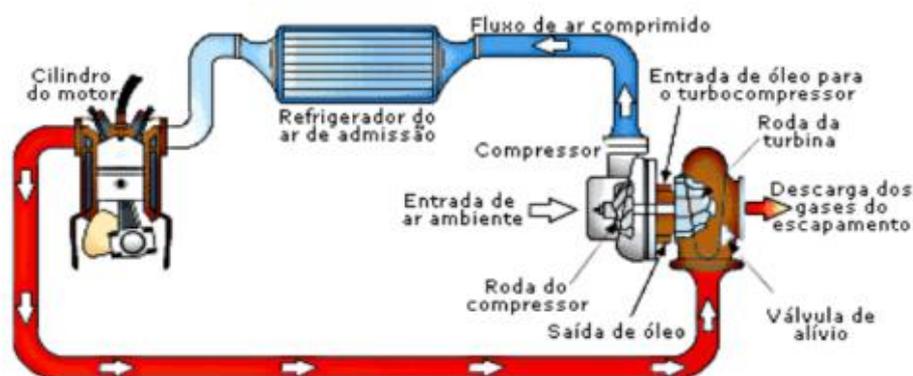


Fonte: Portal máquinas agrícolas (2019).

Após a mistura de ar e combustível ser queimar na câmara de combustão, alguns resíduos desse processo precisam ser removidos do interior do motor. Isso deve ser feito quando o pistão sobe, a válvula de escape abre e os gases gerados no processo vão ser expelidos. Deve-se notar que a energia de exaustão do motor é utilizada para girar o rotor da turbina conectada por meio de um eixo ao rotor do compressor, o qual tem a função de bombear ar para dentro dos cilindros. (TELERMAN, 2019).

A Figura 7 também fornece uma visão mais detalhada das Instruções para este sistema e seus principais componentes.

Figura 7: Sistema de MCI ciclo diesel com turbinas



Fonte: Canal parada solicitada, como funciona uma turbina (2013).

### 2.2.5 Emissões no Ciclo Diesel

A Agência de Proteção Ambiental Americana (EPA) é um dos órgãos mundiais responsáveis pelo estudo e estabelecimento de normas para proteção do meio ambiente, muitas normas e regulamentações vigentes em alguns países tem como referência as recomendações da EPA. A agência define os critérios de poluentes do ar, que são: o ozônio, material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre e chumbo. Segundo a agência, o ozônio (O<sub>3</sub>) pode ser criado por uma reação química entre os óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>) e compostos orgânicos voláteis (COV) na presença da luz solar.

Quando os níveis de ozônio são altos, também podem ser reduzidas as funções pulmonares e aumentar as inflamações no revestimento pulmonar. As emissões veiculares são também apontadas como a maior fonte de emissão de COVs e essas

emissões podem ser originadas tanto pelas emissões de escapamento quanto provindas da evaporação dos combustíveis. (SANTANA, 2012).

### **2.2.6 Combustão em Motores Diesel**

Nos motores Diesel a injeção de combustível é realizada dentro do cilindro próximo da fase final de compressão. Durante esta etapa acontece um pequeno retardamento de ignição gasto na formação das pequenas partículas e do vapor de combustível que se misturará com o ar. Este efeito ocorre em fração de segundos em que o pistão continua seu movimento de compressão causando assim uma grande agitação das moléculas ar-combustível, aumentando a temperatura e gerando uma condição favorável para autoignição do Diesel.

A forma como a oxidação do combustível aconteça influencia diretamente na velocidade e temperatura da chama da combustão, fatores de maior importância no processo. O controle de esses dois fatores é fundamental, e estão diretamente relacionadas à formação dos poluentes emitidos pelos motores. (MAUTONE, 2003).

### **2.2.7 Estudo para a Redução das Emissões de Poluentes em Motores Diesel em Processos Mecânicos**

Uma das primeiras modificações no projeto do motor de combustão interna para reduzir as emissões de gases foi a válvula de ventilação positiva do cárter. Essa válvula permite que alguns gases de dentro do motor que seriam expulsos ao ambiente (“blowby”) e outros gases sejam novamente injetados no coletor de admissão ao invés de serem lançados à atmosfera. (SAMPALIO, 2011).

#### **A) Catalisador de Oxidação – DOC**

Componente do sistema de escape que vem sempre depois do catalisador e serve para travar as partículas nocivas provenientes dos motores diesel. Um filtro de partículas diesel, filtro anti-partículas (FAP) em inglês, Diesel Particulate Filter (DPF)

como também é conhecido, é um dispositivo projetado para remover partículas diesel ou fuligem dos gases de escape de um motor diesel.

O mecanismo da reação em um catalisador de oxidação diesel é explicado pela presença de meios catalíticos ativos que estão depositados na superfície do catalisador e tem a habilidade de adsorver o oxigênio. A reação catalítica possui três estágios: (1) o oxigênio é ligado ao meio catalítico, (2) os reagentes, como o CO e o HC, atingem a superfície catalítica e reagem com o oxigênio, (3) os produtos da reação, como o CO<sub>2</sub> e o vapor de água, deixam o meio catalítico e são liberados do catalisador para a tubulação de escape, conforme demonstrado na figura 8, onde mostra o processo de entrada e saída dos gases no catalisador.

A densidade das células vem sendo cada vez mais aumentada, visando à melhoria da eficiência de conversão do HC e do CO. Na maioria dos casos, são utilizados substratos de cerâmica (cordierite).

Figura 8: Catalisador com vista de corte para ilustrar a admissão dos gases e como é o processo interno de sua deposição.



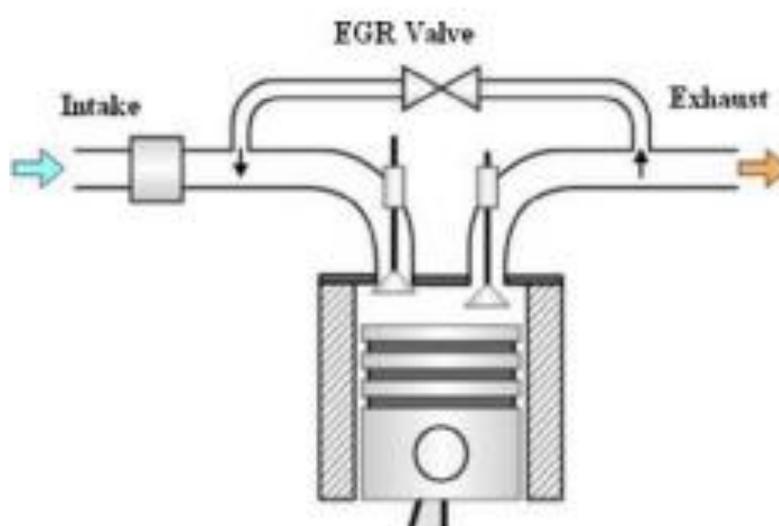
Fonte: Capana (2008).

#### B) Recirculação dos gases de escape (EGR)

O sistema de recirculação dos gases de escape (EGR), consiste em realizar a reintrodução dos gases na câmara de combustão a fim de realizar a redução das emissões de NO<sub>x</sub> devido ao resfriamento desses gases. (MENEZES, 2009).

Na Figura 9 pode-se visualizar a representação de um sistema EGR. Esse sistema realiza a recirculação dos gases de escape entre o ponto de exaustão e o ponto de admissão de um motor de combustão interna.

Figura 9: Sistema EGR em modo de funcionamento



Fonte: Palash *et al.*, (2013).

Com o uso do sistema de recirculação de gases, reduz a concentração de oxigênio e a temperatura máxima do ciclo e com isso acontecendo a redução da emissão de NO<sub>x</sub>, porém em contrapartida essa recirculação aumenta a emissão de fuligem e material particulado influenciando diretamente no desgaste dos componentes do motor. (MURARO, 2016).

### 2.2.8 Estudo para a Redução das Emissões de Poluentes em Motores Diesel em Processos Eletrônico

Controle eletrônico nos motores de ciclo diesel

De acordo com Souza *et al.* (2007), pode-se observar que logo seguinte a ao aprimoramento, do sistema de injeção e da introdução do turbocompressor como também do intercooler em motores de ciclo Diesel, ainda se observa necessária a

adição de controles eletrônicos no conjunto do motor para se atingir os níveis de emissões exigidos.

Com a aplicação de dispositivos eletrônicos obteve-se um grande avanço tecnológico nos motores de combustão interna, com isso a sensibilidade às variações de sensores e atuadores é muito mais eficiente e fazendo com que pequenas variações sejam facilmente detectadas e cuidadosamente controladas.

Com a introdução no motor de um módulo eletrônico de controle inteligente, denominado de ECM (Electronic Control Module) onde pode-se observar na figura 10, com trabalho em paralelo de sensores e atuadores que gerenciam a injeção de combustível no motor. (MOLLENHAUER, *et al.*, 2010).

Para o circuito de entrada conseguir converter os sinais recebidos (em níveis de leituras, tensões analógicas de sensores e mensagens através de interfaces seriais como CAN - rede de área do controlador) em valores digitais e os fornece processados para o microcontrolador. Para o lado de saída o computador gera valores em sinais elétricos para as válvulas e atuadores de injeção como também pode gerar mensagens para interfaces seriais.

Figura 10: Componentes do Sistema de Gerenciamento Eletrônico



Fonte: Pereira (2019).

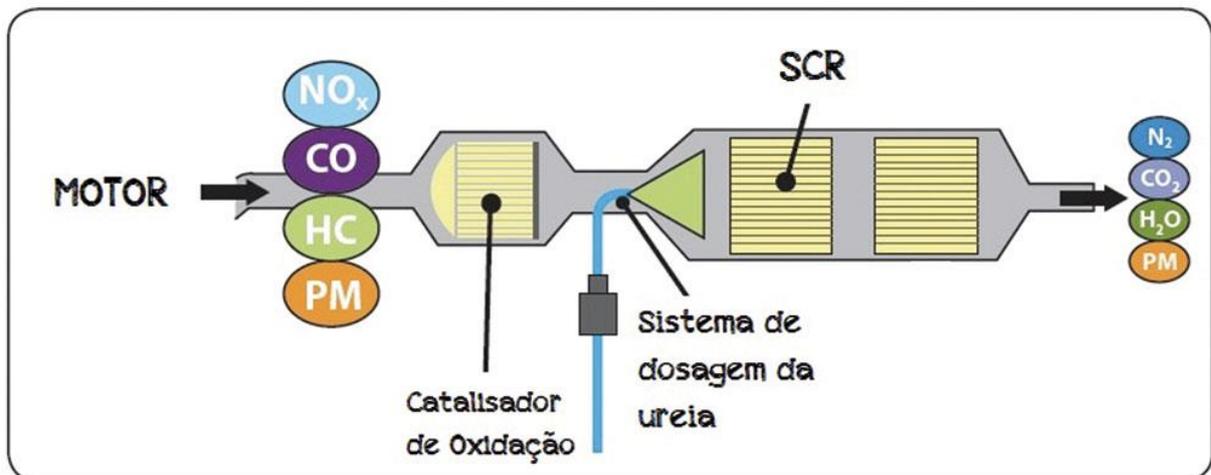
### 2.2.9 Sistema Redução Catalítica Seletiva (SCR)

O processo de redução catalítica seletiva (SCR) é um método de tratamento das partículas de NO<sub>x</sub> que permite a redução catalítica através da injeção de um redutor, amônia (NH<sub>3</sub>), que se combina com as partículas NO<sub>x</sub> para formar N<sub>2</sub> e O<sub>2</sub> (MENEZES, 2009).

Para prover a amônia necessária no processo é utilizada uma solução aquosa de ureia a 32,5% que é forçada a passar por uma superfície de cerâmica superaquecida e realizando assim a redução do NO<sub>x</sub> (WERONKA, 2015).

As soluções utilizadas no sistema SCR possuem diferentes denominações de acordo com a localização na qual são utilizadas. Na Europa, por exemplo, a solução é chamada de AdBlue. Já no Brasil, o Agente Redutor Líquido Automotivo é comumente conhecido por ARLA 32 pois, sua composição consiste em 32% de ureia numa solução aquosa (WERONKA, 2015). O sistema de injeção de ARLA 32 possui como desvantagem o consumo de ureia, que é estimado em cerca de 1 litro de ARLA 32 para cada 20 litros de combustível diesel (MENEZES, 2009). Como pode-se observar na figura 1, o sistema que injeta um agente líquido-redutor em um catalisador, para o fluxo de escape de um motor diesel.

Figura 11: Processo de redução catalítica seletiva (SCR)



Fonte: André Miura, 2016.

### 3. PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

Os processos de redução de particulados expelidos pelos motores diesel, após o processo de combustão, evoluíram em paralelo aos limites aceitáveis de emissões. As tecnologias empregadas tanto para análise dos parâmetros aceitáveis, quanto para o atendimento desses, diferenciam os sistemas existentes entre si quanto a eficiência.

A metodologia utilizada consiste em uma análise da literatura pertinente à área de interesse, neste caso refere-se a métodos de melhoria de ICMs para redução de emissões de poluentes na atmosfera. Para isso, é fundamental conhecer as principais legislações ambientais nacionais adotadas pelo PROCONVE, bem como conhecer o sistema operacional dos motores a diesel de até 3,9 litros, com utilização de Diesel S10.

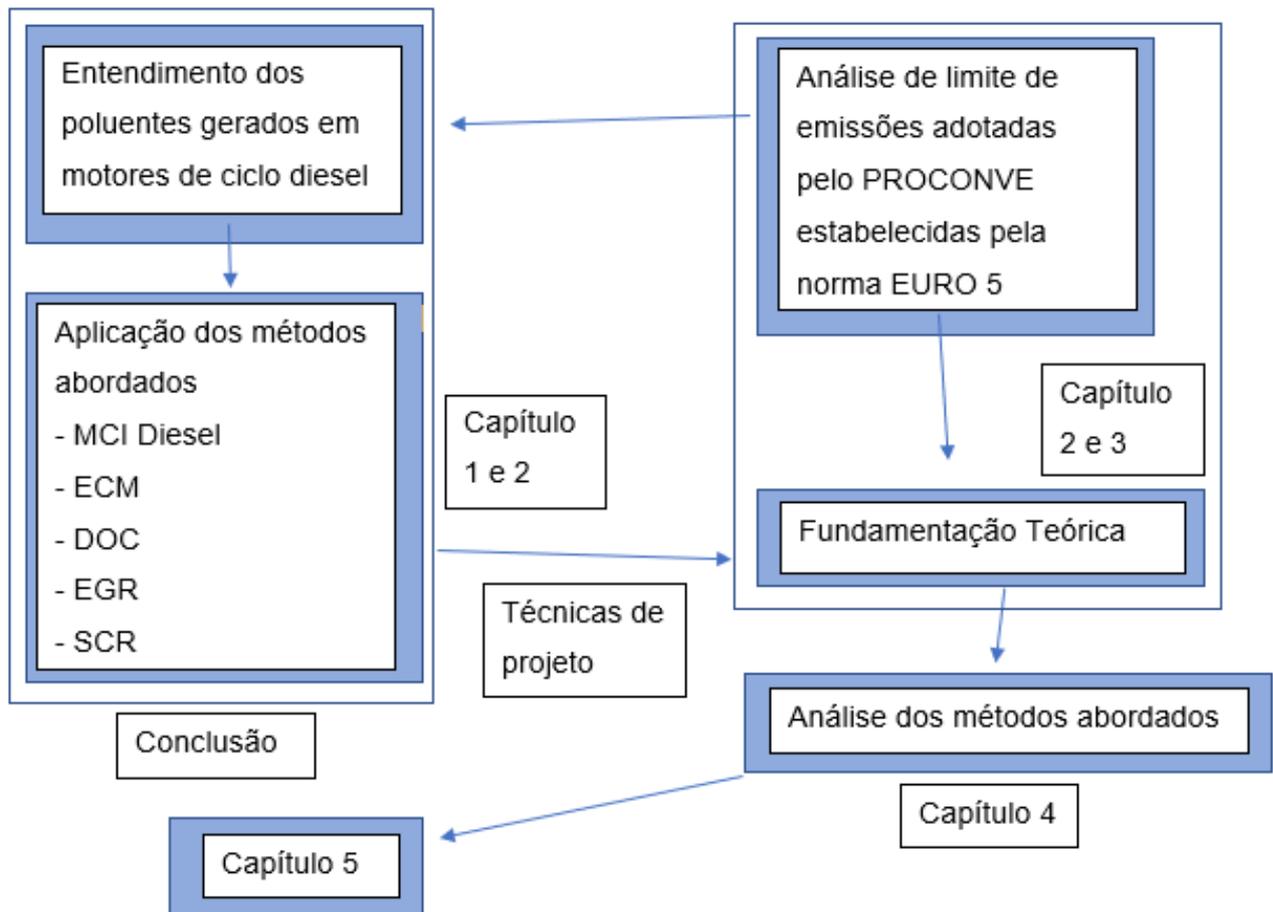
Para obter uma ampla gama de buscas, selecionamos palavras-chave em português e inglês, o que facilitou o processo de pesquisa. Os principais portais de pesquisa a serem consultados são o Google Scholar e o Periódico Capes para explorar diversos artigos e periódicos relacionados ao tema relevante. Além disso, a plataforma online do IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis).

Realizar pesquisas aplicáveis aos objetivos mencionados na Seção 1.3.2. os objetos de estudo foram as principais soluções tecnológicas dos motores de combustão interna de ciclo Diesel.

#### 3.1 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A Figura 12 esquematiza, as estratégias e análises que serão realizadas no estudo. O trabalho consiste em 5 capítulos, no total. Indicando, dessa forma, a metodologia utilizada para que os objetivos propostos fossem alcançados e, por fim, a elaboração da conclusão sobre o trabalho.

Figura 12: Estratégia de pesquisa



Fonte: elaborado pelo autor (2022)

### 3.2 Problematização dos poluentes emitidos por motores ciclo diesel

Problematizando o problema dos poluentes emitidos pelos motores de combustão interna do ciclo diesel: esse problema é uma preocupação mundial devido aos poluentes produzidos pelos motores de combustão interna do ciclo diesel. O objeto de pesquisa concentra-se em demonstrar a solução técnica mais promissora voltada para a minimização das emissões de poluentes dos motores de combustão diesel. Apresento o órgão responsável por definir os limites máximos de emissão para veículos no país: PROCONVE. É responsável por desenvolver estratégias e metas para reduzir os níveis de emissão de poluentes. Neste trabalho, o dado em destaque é o “estágio P”, que se refere aos motores a diesel.

### 3.3 Fundamentações teóricas no Brasil

Os fundamentos teóricos balizam as principais legislações e estratégias de controle das emissões de poluentes dos veículos diesel MCI no Brasil. O histórico do direito ambiental, desde a criação do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) gerou sistema regulatório das taxas de emissão nacionais (PROCONVE), com múltiplas fases de controle desenvolvidas ao longo dos anos. Por exemplo, em 1994, foi implantada a fase P-1, que foi responsável pelo desenvolvimento de um novo modelo de motor que visava reduzir o consumo de combustível e promover o aumento de potência, além de reduzir as emissões de óxido de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), por meio da introdução de *intercoolers* e turbo *Supercharger*. Nessa fase, as emissões de CO (43%) e HC (50%) foram significativamente reduzidas. Os sistemas de admissão, exaustão, sistema de injeção de combustível e sistema de arrefecimento serão base dos diversos métodos de aperfeiçoamento dos MCI que visam reduzir a emissão de poluentes na atmosfera, portanto, mudar o interno do motor não era a única opção. Para este trabalho foram escolhidos três métodos (Catalisador por oxidação DOC, Recirculação de gases de escape EGR e o sistema de gerenciamento eletrônico ECM), a escolha destes três métodos, se justifica por serem métodos que trabalham de forma diferente sendo: processos que ocorre no MCI e processos de exaustão, após formados. Além disso, outra parte da fundamentação teórica deste trabalho é o entendimento dos principais sistemas operacionais dos motores a diesel.

### 3.4 Análise de métodos do MCI

A análise dos métodos de aperfeiçoamento do MCI de ciclo diesel, são divididos em dois grandes grupos:

- Os que trabalham para redução do material particulado, pelo aperfeiçoamento do processo que ocorre MCI;
- Os que visam a eliminação / remoção do particulado do processo de exaustão, após formados e antes que sejam liberados para atmosfera.

Através de pesquisa de preços no site de compras mercado livre, foi possível estabelecer preços, para os métodos abordados neste trabalho (Catalisadores por oxidação DOC, Recirculação dos gases de escape EGR e Controle de poluentes por

ECM). Com precificação dos métodos nos capítulos 4 e 5, conseguiremos fazer análise comparativa com base nos valores.

### **3.5 PARAMETRIZAÇÃO DOS MOTORES**

Como se trata de um estudo teórico e o espectro de aplicação dos motores diesel são muito amplos, essa pesquisa parametrizou alguns pontos para aplicação em motores, que serão descritos nos subtítulos a seguir.

#### **3.5.1 TAMANHO DO MOTOR**

Neste presente trabalho, para efeito de comparação, foram considerados motores de ciclo diesel de até 3,9 litros de volume deslocado. Com isso, a pesquisa visou métodos que reduzem emissões de poluentes nos processos de aperfeiçoamento do MCI e processo que visam a eliminação do particulado do processo de exaustão, após formados e antes que sejam liberados na atmosfera.

#### **3.5.2 TIPO DE COMBUSTÍVEL DAS COMPARAÇÕES**

Para este trabalho, foram utilizados como base, motores que utilizem combustível diesel S10. Esse combustível apresenta 10 partes por milhão de enxofre, diferentemente dos outros modelos de diesel o diesel S10 apresenta a maior redução da emissão de óxido de nitrogênio e pode chegar até em 98% e a de óxido de enxofre e de outras partículas em até 80%.

### **3.6 ORÇAMENTAÇÃO**

A parametrização e levantamento de custos, foram obtidos através de referenciais bibliográficos e orçamentos que foram obtidos através de sites de vendas na internet. Para os sistemas catalisador por oxidação DOC (1), Recirculação de gases de escape EGR (2) e sistema SCR (4), os valores de custos foram obtidos através de sites de vendas da internet (os sites podem ser encontrados nas referências bibliográficas) e para o sistema Controles de poluentes por ECM (3) obteve-se através de referencial teórico.

### **3.7 Resultados esperados**

Os resultados esperados pelos órgãos indicam uma meta a ser batida pelas montadoras, visto que sem o atendimento da legislação o motor não pode entrar em circulação legalmente. Entre os modelos analisados para diminuição das emissões, cada um permitirá comprarmos os dados com a meta ambiental para medição da eficiência do indicador de emissões.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Foram descritos e analisados os principais métodos de aperfeiçoamento dos motores de combustão interna em motores de ciclo Diesel, que contribuíram à redução das emissões de poluentes da atmosfera, de acordo com os critérios e limites estabelecidos pelo PROCONVE. (CONTRAN nº 452, de 26 de setembro de 2013).

### **4.1 CARACTERÍSTICAS DO SISTEMA DE EXAUSTÃO**

Dentre os processos abordados neste trabalho estão catalisadores por oxidação DOC, recirculação dos gases de escape EGR e controle de poluentes por ECM, onde ambos processos apresentam finalidade iguais e características de processos diferentes, discriminadas nos tópicos 4.1.1 até 4.1.4.

#### **4.1.1 Catalisador por Oxidação DOC**

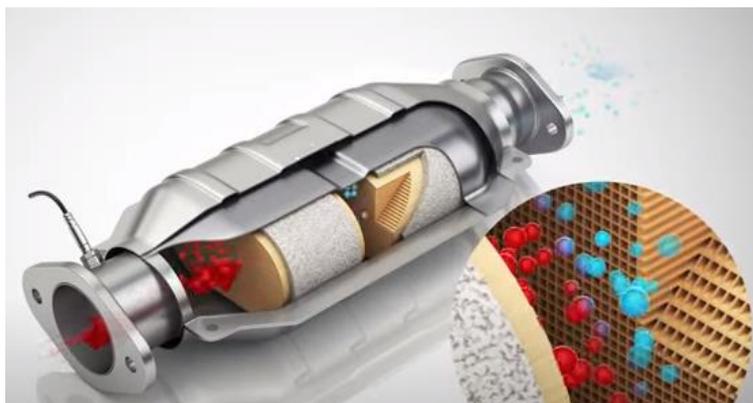
No processo de catalisação de oxidação, geralmente, filtra 85% ou mais da fuligem e, sob certas condições, pode atingir eficiência de remoção de fuligem quase 100%. Por vezes, os filtros não conseguem fazer sozinhos a sua limpeza, devido à temperatura que não conseguem atingir, que são 1000 ° graus Celsius, para fazer a regeneração das partículas provenientes do motor.

Onde o custo de um catalisador de oxidação para um motor diesel de até 3,9 litros podendo chegar até 2307 reais, a variação deste custo varia de fabricante para fabricante, variando o metal para fabricação sendo platina e paládio os materiais mais nobres, sendo os com custo mais elevados e o catalisador por oxidação com custo mais baixo de fabricação vai ser de aço galvanizado. (Catalisador de oxidação universal diesel motores até 3.9 litros, mercado livre)

O catalisador por oxidação DOC, visa a remoção do particulado, ocorre após o processo de exaustão e antes que seja liberado para a atmosfera. O catalisador será instalado na parte inferior traseira do veículo, onde vira uma tubulação de exaustão do motor pela parte inferior do veículo e conectara na entrada do catalisador, assim fazendo os gases passarem por dentro do catalisador, após passarem por dentro do catalisador os gases vão ser liberados para a atmosfera.

Os gases gerados no processo de queima do MCI, passaram por dentro do catalisador onde vão ser apanhados por uma colmeia composta de paládio e molibdênio (este processo pode-se ser observado na figura 13, onde mostra o processo de entrada e saída dos gases pelo catalisador de oxidação DOC), onde o paládio e o molibdênio têm a capacidade de transformar 98% de gases tóxicos em substância menos ofensivas como dióxido de Carbono.

Figura 13: Sistema de catalisador por oxidação DOC



Fonte: Gauss indústria. Funcionamento do Catalisador. Apresentado por: Cesar (2020), 1 vídeo (2min 39s).

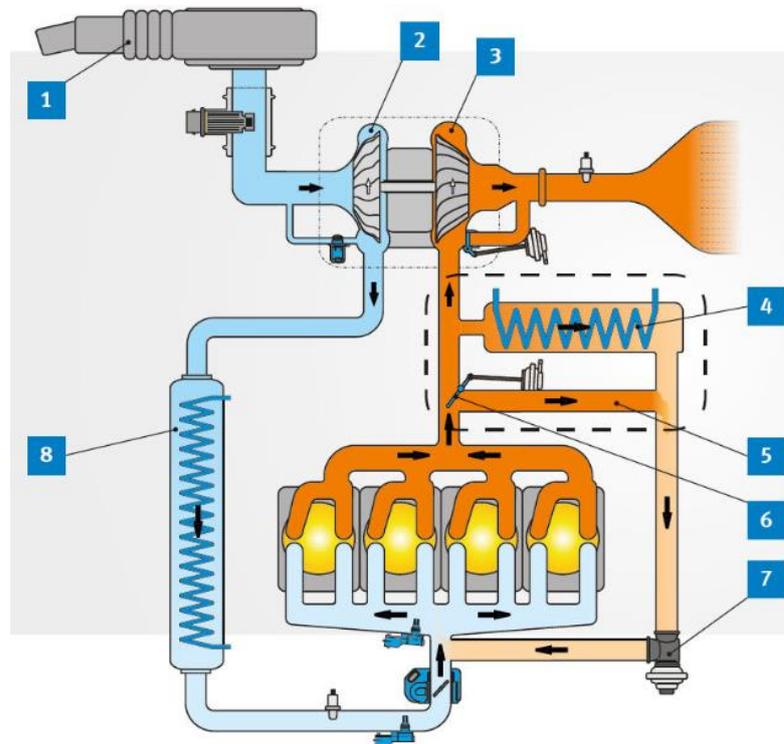
#### 4.1.2 Recirculação dos Gases de Escape (EGR)

No método de recirculação dos gases de escape é possível reduzir a concentração de oxigênio e a temperatura máxima do ciclo, onde os gases de escape são captados, conduzidos pela válvula EGR e adicionados novamente ao ar de admissão. Isto resulta em menos entrada de oxigênio nos cilindros.

Nos motores diesel, isso é válido especialmente para redução cada vez maior de óxidos de nitrogênio (NOx) em até 70%. Neste caso, a recirculação dos gases de escape (EGR) arrefecidos desempenha um papel de especial importância.

A recirculação dos gases de escape arrefecidos baixa as temperaturas da câmara de combustão reduzindo, assim, a formação de óxidos de nitrogênio. Na Figura 14 pode-se observar algum dos componentes que fazem parte do sistema de recirculação de gases de escape (EGR) e seus componentes podem ser visualizados na Tabela 1.

Figura 14: Sistema de recirculação de gases de escape (EGR).



Fonte: Rheinmetall Technipedia

Tabela 1: Componentes do sistema de recirculação de gases de escape (EGR).

1	Filtro de ar
2	Turbocompressor (compressor)
3	Turbocompressor (turbina)
4	Radiador EGR
5	Canal de by-pass
6	Borboleta de bypass (aqui regulada por vácuo)
7	Válvula EGR
8	Intercooler

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

O funcionamento do sistema de recirculação de gases de escape EGR, demonstrado na figura 14 tem seu funciona da seguinte forma, os gases de escape são captados imediatamente após os gases saírem dos cilindros do MCI, controlados pela válvula EGR e direcionados novamente para a parte de admissão, assim resultando na menor quantidade de oxigênio entrando nos cilindros, onde menos oxigênio produz uma temperatura de combustão mais baixa. A válvula EGR encontra-

se localizada em um tubo entre o coletor de escape e o coletor de admissão, onde seu funcionamento baseia-se no vácuo (onde vácuo é qualquer pressão menor que a pressão atmosférica), criado no lado da admissão assim controlando a abertura e fechamento da válvula, pode-se observar a mesma na Figura 14, item 7 da Tabela 1.

O custo de sistema de circulação de gases pode variar para cada tipo de motor onde variando o fabricante, levando em consideração um motor diesel de até 3,9 litros, onde possui os itens citados na tabela 01 com exceção da válvula EGR. O custo de uma válvula EGR pode chegar até 3260 reais, válvula EGR para motor de ciclo diesel de até 3,9 litros. (TELERMAN, 2019).

#### 4.1.3 Controle de Emissão de Poluentes por (ECM)

Na Figura 15 pode-se observar algum dos componentes que fazem parte do sistema de gerenciamento eletrônico dos MCI.

Figura 15: Componentes do Sistema de Gerenciamento Eletrônico



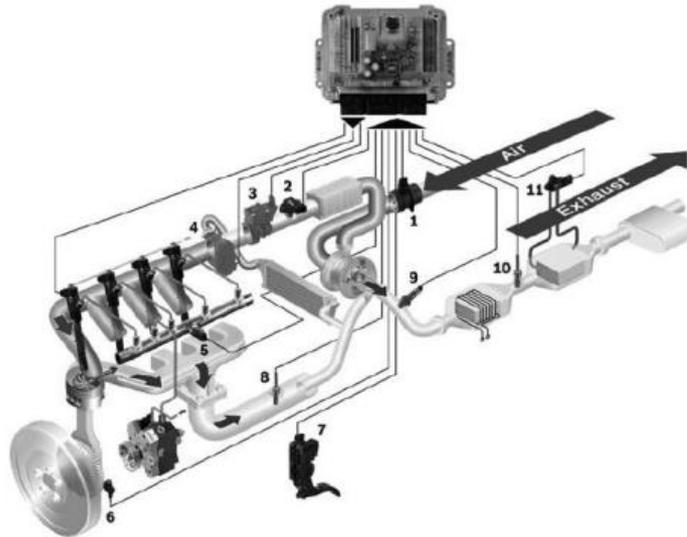
Fonte: Pereira, (2019).

O sistema de gerenciamento eletrônico possui alta disponibilidade e performance durante toda a vida de um motor, conforme operação completa sob condições ambientais extremas e operação em tempo real de todos os estados operacionais e de todas as rotações do motor.

O sistema de gerenciamento eletrônico apresenta componentes eletrônicos e eletrônica, onde são projetados para suportarem condições de estresse ambiental em condições de instalação e operação. O sistema consta que na parte de entrada e saída

de circuitos, devem proteger contra eletromagnetismo e irradiação. Na Tabela 2 pode ser visualizados os seus componentes e na Figura 16 pode-se observar os mesmos.

Figura 16: Diagrama dos sensores nos motores Diesel.



Fonte: HandBook of Diesel Engines (2010)

Tabela 2: Componentes sistema (ECM)

1	Sensor de massa de ar
2	Sensor de pressão de impulso
3	Válvula borboleta
4	Válvula de recirculação dos gases de escape
5	Sensor de pressão das linhas de ar
6	Sensor de velocidade
7	Módulo do pedal de aceleração
8	Sensor de temperatura de exaustão
9	Sensor lambda
10	Sensor de temperatura de exaustão
11	Sensor de pressão diferencial

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

No Sistema de controle de emissão de poluentes por (ECM), por possuir uma série de sensores, assim se faz ter uma precisão de monitoramento e sensibilidade maior, fazendo com que pequenas variações sejam facilmente detectadas. Logo o custo de um modulo de controle ECM, sem sensores, para um motor de até 3,9 litros, acaba sendo mais elevado, tendo seu custo base de até 3700 reais de acordo com modelo do motor.

#### 4.1.4 Aplicações do Sistema de Gerenciamento Eletrônico (ECM)

Desde medições da massa de ar, controle das válvulas de injeção, controle da relação ar/combustível da câmara de combustão e pós-tratamento dos gases de escape (para otimizar a qualidade e permanecer abaixo limites legais), constituem como aplicações e benefícios do sistema de gerenciamento eletrônico.

A Tabela 3 fornece uma visão geral das principais funções dos motores de combustão interna, as quais podem ser controladas pelo uso do ECM. Nesse trabalho, o foco será nos controles de gerenciamento eletrônico dos sistemas de ar (admissão e exaustão) e o sistema de injeção eletrônica, o qual tem um grande impacto na emissão de poluentes na atmosfera e, portanto, precisam ser bem monitorados.

Tabela 3: Principais funções que podem ser controladas pelo ECM

Sistema de saída de injeção
Controle de recirculação de gases do escape
Detecção de falhas na ignição
Coordenar a quantidade de combustível injetada
Controle do relé principal
Monitoramento água, óleo, pressões turbina
Sistema de diagnóstico
Controle de válvulas de entrada de ar

Fonte: Elaborado pelo autor (2022)

#### 4.1.5 Aplicações do Sistema de SCR

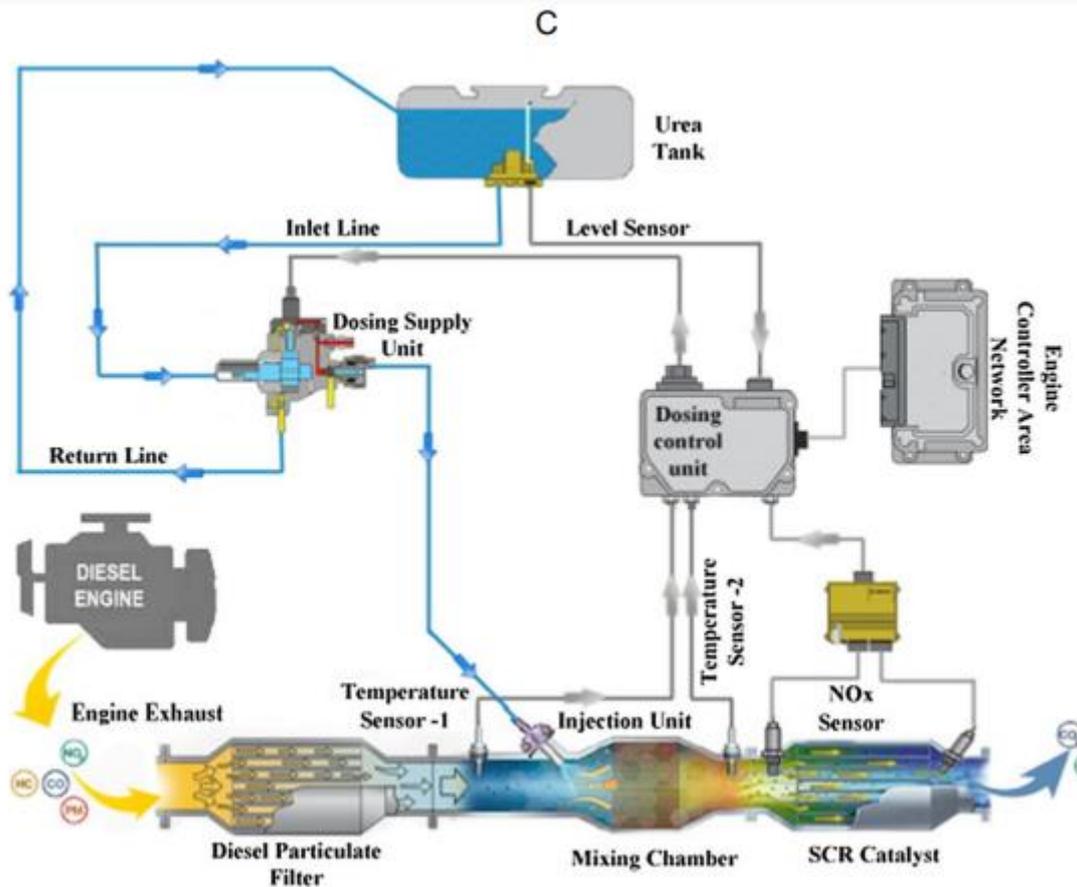
O Sistema de Redução Catalítica é amplamente conhecido como uma das melhores formas, de realizar o pós-tratamento dos gases de escape de um motor a diesel sem comprometer o seu desempenho. Por isso, muitos esforços são necessários para melhorar o sistema e torná-lo ainda mais sustentável para os veículos não visando apenas os componentes do SCR em si, mas realizando uma abordagem holística ao funcionamento das tecnologias de redução da emissão de poluentes (VIGNESH; ASHOK, 2020).

A figura 17 ilustra o layout de funcionamento de um sistema de pós-tratamento dos gases de escapamento. O gás de exaustão queimado que flui pelo coletor de admissão consiste em HC, CO, NO<sub>x</sub>, MP e etc. Essa mistura de gases chega ao catalisador de oxidação diesel (DOC) e em seguida passa pelo filtro de partículas diesel (FPD) 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 (VIGNESH; ASHOK, 2020).

A quantidade injetada do redutor é definida de acordo com os valores lidos nos sensores de NO<sub>x</sub> e de temperatura, a mistura dos gases com o redutor acontece na câmara de mistura e segue para o catalisador para ser realizado a redução catalítica seletiva convertendo os óxidos de nitrogênio em N<sub>2</sub> e como subproduto desta reação a formação de água e uma pequena quantidade de CO<sub>2</sub> (VIGNESH; ASHOK, 2020).

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 eletrônica 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 (VIGNESH; ASHOK, 2020).

Figura 17 – Layout esquemático do sistema SCR integrado com filtro de partículas Diesel.



Fonte: (VIGNESH; ASHOK, 2020)

#### 4.1.6 Análise de Emissões de poluentes

De acordo com ensaios para medição de opacidade devem ser feitos, no que couber, de acordo com a Norma Brasileira NBR - 13037 - Gás de Escapamento Emitido por Motor Diesel em Aceleração Livre - Determinação da Opacidade - Método de Ensaio, mediante a utilização de opacímetro (NA-9000) que pode ser visualizado na figura 18, onde o modelo (NA-9000) tem um tempo de leitura de 0,9 - 1,1 segundo. Onde atende à Norma NBR 12897 - Emprego do Opacímetro para Medição do Teor de Fuligem de Motor Diesel.

Figura 18: opacímetro (NA-9000)



Fonte: site do fabricante Napro

O programa de controle de emissões do ar por veículos automotores é feito pelo PROCONVE, onde os níveis de monóxido de carbono, no processo de exaustão de MCI diesel é expressa por micrograma por metro cúbico ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ), a análise é feita através da utilização de um infravermelho não-dispersivo, em 1 hora, num padrão primário de  $40.000 \mu\text{g}/\text{m}^3$  (35 partículas por milhão PPM). (RESOLUÇÃO CONAMA Nº 007, de 31 de agosto de 1993).

De acordo com Portaria Nº 38 de 01 de abril de 2014, à análise de níveis de monóxido de carbono, também se realiza o teste de opacidade para motores diesel é um procedimento que visa medir o nível de opacidade de determinado veículo. Entende-se como opacidade a capacidade que um certo material possui de não permitir a passagem de luz. O principal objetivo deste teste é controlar a emissão de poluentes no meio ambiente. Desse modo, é possível conter a emissões atmosférica e garantir uma boa qualidade do ar. (CONTRAN nº 452, 2013).

Este serviço é realizado com o auxílio de um instrumento chamado opacímetro, que mede o grau de fumaça e gases de escapamento emitidos pelos veículos. O

aparelho avalia o índice K (quantidade de fumaça emitida por metro quadrado) e a tonalidade.

A tonalidade da fumaça é avaliada conforme a porcentagem de enegrecimento. Para medir o grau corretamente, existe uma escala que separa os níveis de 1 a 5, onde são:

- Padrão 1 – Tom branco para o cinza claro – até 20% de enegrecimento;
- Padrão 2 – Tom cinza claro para o cinza mediano – até 40% de enegrecimento;
- Padrão 3 – Tom cinza mediano para o cinza escuro – até 60% de enegrecimento;
- Padrão 4 – Tom cinza escuro para o preto – até 80% de enegrecimento;
- Padrão 5 – Tom preto – até 100% de enegrecimento;

O máximo estabelecido como tolerado pela legislação é de até 40% de enegrecimento. (CONTRAN nº 452, 2013).

## 4.2 COMPARAÇÃO E RESULTADOS

A Tabela 4, vai contemplar as principais características do três sistema abordado neste trabalho, sendo: catalisadores por oxidação DOC, recirculação dos gases de escape EGR e controle de poluentes por ECM.

Tabela 4: Principais características dos métodos abordados no trabalho

Sistemas	Principais Características	Preço	Número
Catalisador por oxidação DOC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Filtra 85% ou mais da fuligem e, sob certas condições pode atingir eficiência de remoção de fuligem quase 100%;</li> <li>• Redução de substâncias ofensivas como (NOx) m até 70%;</li> <li>• Capacidade de transformar 98% de gases tóxicos em substâncias menos ofensivas como dióxido de carbono.</li> </ul>	R\$: 2.260,00	1
Recirculação de gases de escape EGR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A recirculação dos gases de escape arrefecidos baixa as temperaturas da câmara de combustão reduzindo assim, a formação de óxidos de nitrogênio;</li> <li>• Redução de substâncias ofensivas como (NOx) em até 70%;</li> <li>• Contrapartida essa recirculação aumenta a emissão de fuligem e material particulado, influenciando diretamente nos desgastes dos componentes do motor.</li> </ul>	R\$: 2.307,00	2
Controles de poluentes por ECM	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Alto nível de sensor, logo maior precisão em monitoramento e sensibilidade maior, fazendo com que pequenas variações sejam facilmente detectadas;</li> <li>• Funcionalidade completa sob condições ambientais extremas e operações em tempo real de todos os estados operacionais do motor;</li> <li>• Tempo de vida útil desse sistema, é projetado para 10 anos ou 250 mil Km.</li> </ul>	R\$: 3.700,00	3
Sistema SCR	<ul style="list-style-type: none"> <li>• redução catalítica através da injeção de um redutor, amônia (NH3);</li> <li>• O Sistema de Redução Catalítica é amplamente conhecido como uma das melhores formas de realizar o pós-tratamento dos gases de escape de um motor a diesel sem comprometer o seu desempenho;</li> </ul>	R\$: 13.579,12	4

Fonte: elaborado pelo autor (2022)

Onde os números apresentados na quarta coluna da tabela número 4, fazem referência ao capítulo 3 item 3.6 que se refere a orçamentação, de onde foram obtidos os valores apresentados para cada método, Catalisador por oxidação DOC, Recirculação de gases de escape EGR, Controles de poluentes por ECM e Sistema SCR.

## 4.3 DISCUSSÕES DOS SISTEMAS

### 4.3.1 Considerações Catalisadores de Oxidação (DOC)

Caso o filtro não atinja a temperatura necessária, a regeneração não é feita adequadamente, cimentando-se as partículas nas paredes dele, obstruindo-o e fazendo que o veículo não se desenvolva.

Os metais nobres que são mais utilizados na composição do catalisador são platina e o paládio.

### 4.3.2 Considerações Recirculação dos Gases de Escape (EGR)

O método de recirculação dos gases de escape (ERG), consiste na modificação da combustão e exige um tempo maior de desenvolvimento; no entanto, os custos de aplicação são mais reduzidos do que alguns sistemas de pós-tratamento.

O principal efeito da tecnologia de recirculação dos gases de escape - conhecida como EGR - é a diluição parcial dos gases de admissão com os gases do escape originários da queima do combustível, que proporcionam um atraso no início da ignição, reduzindo a temperatura de chama, sendo este o principal agente que interfere na produção do NOx.

### 4.3.3 Considerações Controle de Emissão de Poluentes (ECM)

No sistema e gerenciamento de poluentes por (ECM), onde consiste o gerenciamento de injeção de combustível no motor, através de análises feitas por sensores instalados no motor. Suas características são para alta performance e alto grau de monitoramento, logo contrapartida acaba se tornando o modo abordado de mais alto valor de aquisição.

Com o uso de sensores em um veículo a motor de ciclo diesel, tem que ter um alto nível de sensibilidade às influências mecânicas, climáticas, químicas e eletromagnéticas. Como também não se pode confiar na alta confiabilidade e longo serviço de vida, logo vemos a importância de alta precisão que é exigida.

As características do controle eletrônico do motor são suas alta disponibilidade durante toda a vida de um veículo, funcionalidade completa sob condições ambientais extremas e operação em tempo real de todos os estados operacionais e de todas as

rotações do motor. O objetivo final é manter a emissão do motor dentro das especificações da norma, sem prejudicar o desempenho dele.

#### **4.3.4 Considerações do Sistema de SCR**

Para o sistema de SCR, consiste na injeção de um redutor, amônia (NH<sub>3</sub>), através de análises feitas por sensores instalados no motor, logo o seu custo e processo de instalação acaba sendo bem elevado e que necessita de mão de obra qualificada. O sistema SCR apresenta excelentes resultados de redução catalítica, onde é conhecido como uma das melhores formas, de realizar o pós-tratamento dos gases de escape de um motor a diesel sem comprometer o seu desempenho.

#### **4.3.5 Considerações Finais**

Diante dos quatro métodos abordados neste trabalho catalisadores por oxidação DOC, recirculação dos gases de escape EGR, controle de poluentes por ECM e sistema de SCR, com isso, foi possível fazer o direcionamento para o catalisador por oxidação DOC, sendo o método com maior eficiência de filtragem, como também seu custo vem ser o de menor valor entre os três métodos abordados. Com menor grau de complexidade para instalação o catalisador por oxidação DOC, comparado aos outros dois métodos que necessitam um conhecimento mecânico e eletrônico maior, com contrapartida o catalisador por oxidação DOC.

Necessitando de manutenções preventivas e corretivas maiores, visto que os filtros não conseguem fazer sozinhos a sua limpeza, devido à temperatura que não conseguem atingir, que são 1000 ° graus Celsius, para fazer a regeneração das partículas provenientes do motor.

Após análise dos três métodos abordados, o catalisador por oxidação vem ser o mais indicado para instalação em motores de até 3.9 litros.

## 5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

O processo de conclusão deste trabalho é dividido em dois subtítulos, onde no primeiro subtítulo 5.1 é apresentado a conclusão do presente trabalho e no subtítulo seguinte 5.2 vai ser indicado sugestões para trabalhos futuros.

### 5.1 CONCLUSÕES DO PRESENTE TRABALHO

Neste trabalho foram descritos e analisados os principais métodos de aperfeiçoamento dos motores de combustão interna de ciclo Diesel, que contribuíram com à redução das emissões de poluentes da atmosfera, de acordo com os critérios e limites estabelecidos pelo PROCONVE.

Onde na primeira parte do trabalho, teve como abordagem principal a contextualização teórica da área de conhecimento abordada. A compreensão da problemática ambiental está ligada à emissão de poluentes de motores diesel, logo as soluções encontradas e adotadas pelos programas nacionais socioambiental, para fazer a redução desse problema. Como também foi proposta a compreensão dos sistemas de funcionamento do MCI de ciclo diesel e suas principais funções e seus principais componentes.

Mediante os parâmetros aceitáveis de emissão verificados no parágrafo 2.2 (que atendem a legislação PROCONVE), pode-se compreender o atendimento ou não, pelos sistemas de redução de poluentes mais eficientes. Conforme Figura 3, tabela de limites aceitáveis de poluentes, pode-se priorizar a utilização do redutor de emissões catalisador por oxidação doc. o parâmetro que define este sistema, como mais sustentável é a maior capacidade de redução de NOx.

Embora o catalisador por oxidação DOC atenda de forma plena o parâmetro tolerável para o meio ambiente, os outros sistemas também possuem um papel importante na redução das tolerâncias em diversos estados do motor. o sistema de controle de emissão de poluentes por ECM, possui uma alta disponibilidade e performance por conter uma série de sensores, que o tornam mais preciso, fazendo com que pequenas variações sejam facilmente detectadas e corrigidas durante o funcionamento. Mesmo assim a performance máxima não sobrepõe o catalisador por oxidação DOC.

O método de recirculação de gases EGR apresenta uma eficiência de redução de substâncias ofensivas como o NOx em até 70%, assim atendendo os parâmetros

aceitáveis estabelecidos pelo PROCONVE, em contrapartida o processo de recirculação de gases aumenta a emissão de fuligem e material particulado o que influencia no desgaste dos componentes do motor. O sistema de sistema de emissão de poluentes por ECM, por conter diversos sensores consegue prever falhas nos componentes e no motor, assim se tornando mais eficiente que o sistema recirculação de gases EGR.

## 5.2 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para futuros trabalhos sugerimos a continuação com a ampliação deste trabalho para o novo sistema EURO 6, o qual apresenta novos parâmetros para emissões de poluentes, onde estabelece um limite de 0,09 gramas para cada cavalo de potência do motor por hora de funcionamento. Isso representa uma redução de 72% no limite da norma anterior, que permite a liberação de até 0,34 gramas.

Também há significativas reduções na emissão de óxido de nitrogênio (NOx), que passa a ter um limite 80% menor, com emissão máxima de 0,29 g/cv, e de enxofre, passando de 0,02 ppm para 0,01 ppm (partes por milhão). (Chiptronic, 2021)

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CANAL PARADA SOLICITADA. Sistema de MCI ciclo diesel com turbinas. Disponível em: <http://canalparadasolicitada.blogspot.com/2013/01/como-funciona-turbina.html/>. Acesso em: 17 de junho de 2022.

BIODIESELBR. **O Que é Biodiesel?** <https://www.biodieselbr.com/biodiesel/definicao/o-que-e-biodiesel>. Acesso em: 27 de maio de 2022.

BRAIN, Marshall. **Como funcionam motores a diesel por**. 01 de abril de 2000 <https://pt.scribd.com/document/118818470/HowStuffWorks-Como-Funcionam-Os-Motores-de-Carros>. Acesso em 03 de junho de 2022.

BRASIL. Ministério da Infraestrutura. **Portaria Nº 38 de 01 de abril de 2014**. CONTRAN nº 452, de 26 de setembro de 2013. Disponível em: <https://www.gov.br/infraestrutura/pt-br/assuntos/transito/arquivos-senatran/portarias/2014/portaria0382014.pdf>. Acesso em: 26 de novembro de 2022.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia. ANP. **Especificação do biodiesel**. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel/especificacao-do-biodiesel>. Acesso em: 27 de maio de 2022.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Anexo III: Procedimento de avaliação da opacidade em aceleração livre em veículos com motor do ciclo diesel**. Disponível em: [http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com\\_sisconama&task=documento.download&id=17798](http://conama.mma.gov.br/index.php?option=com_sisconama&task=documento.download&id=17798). Acesso em: 26 de novembro de 2022.

BRASIL. Ministério do meio ambiente. IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Programa de controle de emissões veiculares PROCONVE**. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/emissoes/veiculos-automotores/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 13 maio de 2022.

BRASIL. Ministério do meio ambiente. IBAMA – Instituto Brasileiro de Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. **Tabela de limite de emissões**. Coleção Meio Ambiente. PROCON/PROMOT, 3ªed. 2011. Disponível em: [http://www.ibama.gov.br/phocadownload/veiculosautomotores/manual%20proconve%20promot\\_portugues.pdf](http://www.ibama.gov.br/phocadownload/veiculosautomotores/manual%20proconve%20promot_portugues.pdf). Acesso em: 20 de maio de 2022.

CARBOROIL. **Por que utilizar o diesel S10 é melhor?** Disponível em: <https://carboroil.com.br/por-que-utilizar-o-diesel-s10-e-melhor/>. Acesso em: 27 de maio de 2022.

CHIPTRONIC. **Sistema SCR**: desvendando a redução catalítica seletiva em motores diesel. 2021.. Disponível em: <https://chiptronic.com.br/blog/sistema-scr-desvendando-reducao-catalitica-seletiva-em-motores-diesel>. Acesso em: 08 abril de 2022.

COSTA, J. O. **Análise dos gases de exaustão em um motor diesel com injeção common rail alimentado com diesel, biodiesel e suas misturas**. [s.l.] Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, 2017. Acesso em 27 de maio de 2022.

COSTA, Joel de Oliveira. **Análise dos gases da exaustão em um motor diesel com injeção Common Rail alimentado com diesel, biodiesel e suas misturas**. 2017. 108 f. Monografia (Especialização) - Curso de Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Tecnologia de Materiais, PUC-RS, Porto Alegre, 2017. Disponível em: <http://tede2.pucrs.br/tede2/handle/tede/7786>. Acesso em: 08 abr. 2022.

GAUSS INDÚSTRIA. Funcionamento do Catalisador. Apresentado por: Cesar, publicação do vídeo: 2020. 1 vídeo (2min 39s). Publicado pelo canal Gauss Industria. Disponível em: <https://www.youtube.com/watch?v=oiLpA4UZGNg> . Acesso em nov. de 2022.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Gráfico indicando aumento de veículos em Porto Alegre – RS**. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/portoalegre/pesquisa/22/28120?tipo=grafico> Acesso em: 29 de abril de 2022.

Imagem de Catalisador de oxidação universal diesel motores até 3.9 litros. In: MERCADO LIVRE. Disponível em: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1101285914-catalisador-de-oxidaco-universal-diesel-motor-ate-39-litro-\\_JM](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-1101285914-catalisador-de-oxidaco-universal-diesel-motor-ate-39-litro-_JM). Acesso em: 26 de novembro de 2022.

Imagem de modulo de comando motores diesel 3.9 litros, mercado livre. In: MERCADO LIVRE. Disponível em: [https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2709558893-modulo-injeco-motor--815e-4898112-3969658\\_JM#position=32&search\\_layout=stack&type=item&tracking\\_id=ce554810-54c54a22-9238-cc3349293fa8](https://produto.mercadolivre.com.br/MLB-2709558893-modulo-injeco-motor--815e-4898112-3969658_JM#position=32&search_layout=stack&type=item&tracking_id=ce554810-54c54a22-9238-cc3349293fa8). Acesso em: 26 de novembro de 2022.

KISLANSKY, Simão Brito. **Maximização da eficiência do ciclo combinado de unidade termoeletrica através da modelagem e simulação computacional**. Dissertação (mestrado). Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2017, 147p. Disponível em: <https://docplayer.com.br/106483465-Simao-brito-kislansky-maximizacao-da-eficiencia-do-ciclo-combinado-de-unidade-termoeletrica-atraves-da-modelagem-e-simulacao-computacional.html>. Acesso em 13 de maio de 2022.

MIGUEL, P. *et al.* **Metodologia de Pesquisa em Engenharia de Produção e Gestão de Operações**. 3 ed. Grupo GEN, 2018.

MOLLENHAUER, Klaus. *et al.* **Handbook of Diesel Engines**. Springer, p 176, 2010.

PEREIRA, David Telerman Pacheco. **Análise dos Métodos de Controle e Redução dos Poluentes Emitidos pelos Motores de Combustão Interna no Brasil**. 2019. 64 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Mecânica, Universidade Federal Fluminense, Rio de Janeiro, 2019. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/bitstream/handle/1/16024/Projeto%20de%20Gradua%E7%E3o%20-%20David%20Telerman%20-%20David%20Telerman%20Pacheco%20Pereira.pdf;jsessionid=911C8AEF2FD9FD6B14A43EC66805EF04?sequence=1>. Acesso em: 08 abr. 2022.

PETROBRAS. Disponível em: <https://www.vibraenergia.com.br/>. Acesso em 27 de maio de 2022.

PRAÇA, F. S. G. Metodologia da pesquisa científica: organização estrutural e os desafios para redigir o trabalho de conclusão. **Revista Eletrônica Diálogos Acadêmicos**, v. 08, n. 01, 2015.

RHEINMETALL TECHnipedia. **Recirculação de Gases**. Disponível em <https://www.ms-motorservice.com.br/tecnipedia/post/recirculacao-dos-gases-de-escape-arrefecidos/>. Acesso em nov. 2022.

SANTOS, Daniel. **Especial Trator**: conheça o sistema de alimentação de ar para o motor. BMCOMM, 2019. Disponível em: <https://portalmquinasagricolas.com.br/especial-trator-entenda-importancia-sistema-de-alimentacao-de-ar-para-o-motor/>. Acesso em: 17 de junho de 2022.

SCHULZ, D. **Ciclo de Diesel**. UFRGS, Brasil [https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo\\_diesel.htm](https://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/ciclo_diesel.htm). Acesso em 03 de junho de 2022.

SOUZA, Gilberto. *et al.* **Motores Diesel Eletrônicos**: Contribuição Ambiental e Confiabilidade. Escola Politécnica da USP, p.2, 2007.

WIKIPEDIA, Enciclopédia Livre. **Ficheiro**: Lumbar Patent Dieselengine.jpg. Disponível em: [https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Lumbar\\_patent\\_dieselengine.jpg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Ficheiro:Lumbar_patent_dieselengine.jpg). Acesso em: 17 de junho de 2022.

BAUM, SILVANA; APPEL, LUCIA & MARTIN SCHMAL, Departamento de Química, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Julho de 2004. **A emissões gerada por máquinas de combustão interna movidas à diesel - a questão dos particulados. Estratégias atuais para a redução e controle das emissões e tendências futuras**. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/vG7RHJHrHTTcRnSCmHqvYCj/?lang=pt> Acesso: em 26 de novembro de 2022.

Nick Connor, Novembro de 2019. **O que é o motor diesel de quatro tempos – Definição.** Disponível em: <https://www.thermal-engineering.org/pt-br/o-que-e-o-motor-diesel-de-quatro-tempos>. Acesso: em 26 de novembro de 2022.

MENEZES, E. W. DE. **Produção De Trabalho, Geração De Contaminantes E Tratamento Pós-Combustão Em Motores Ciclo Diesel.** 2009. Acesso: em 11 de dezembro de 2022.

WERONKA, F. M. **Inventário da emissão do material particulado e gasoso proveniente de motores euro V: eficiência dos sistemas de pós-tratamentos EGR e SCR.** [s.l.] Universidade Federal do Paraná, 2015. Acesso: em 11 de dezembro de 2022.

Imagem de Sistema SCR (Redução Catalítica Seletiva), André Miura, 2016. disponível em: <https://www.oficinabrasil.com.br/noticia/reparador-diesel/desvendando-o-sistema-scr-reducao-catalitica-seletiva-dos-motores-diesel-euro-5-parte-1>. Acesso: em 11 de dezembro de 2022.

VIGNESH, R.; ASHOK, B. **Critical interpretative review on current outlook and prospects of selective catalytic reduction system for De-NOx strategy in compression ignition engine.** *Fuel*, v. 276, 15 setembro de 2020. Acesso: em 11 de dezembro de 2022.

Unidade da Bomba ARLA para motores até 3.9 litros. In: [https://www.volvopecas.com.br/unidade\\_da\\_bomba\\_22851845/p?idsku=1099&gclid=Cj0KCQiAnNacBhDvARIsABnDa68JjIDPVEr-2vR43GkxrYAcXwx-KLwRYrb5PtbeNIN7hUPpOIMyxYcaAn3IEALw\\_wcB](https://www.volvopecas.com.br/unidade_da_bomba_22851845/p?idsku=1099&gclid=Cj0KCQiAnNacBhDvARIsABnDa68JjIDPVEr-2vR43GkxrYAcXwx-KLwRYrb5PtbeNIN7hUPpOIMyxYcaAn3IEALw_wcB). Acesso: em 11 de dezembro de 2022.

Imagem opacímetro (NA-9000), Site do fabricante Napro, 2022. Disponível em: <http://www.napro.com.br/opacimetro.html>. 11 de dezembro de 2022.