

Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA  
Engenharia Automotiva

# **Análise das Emissões Atmosféricas em Motores a Diesel com legislação Proconve P7 e P5 com Diferentes Porcentagens de Biodiesel em Ciclo de Condução**

Autor: Nicolas Lima de Oliveira  
Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF  
2024



Nicolas Lima de Oliveira

**Análise das Emissões Atmosféricas em Motores a Diesel  
com legislação Proconve P7 e P5 com Diferentes  
Porcentagens de Biodiesel em Ciclo de Condução**

Monografia submetida ao curso de graduação  
em Engenharia Automotiva da Universidade  
de Brasília, como requisito parcial para ob-  
tenção do Título de Bacharel em Engenharia  
Automotiva.

Universidade de Brasília – UnB

Faculdade UnB Gama – FGA

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Brasília, DF

2024

---

Nicolas Lima de Oliveira

Análise das Emissões Atmosféricas em Motores a Diesel com legislação Proconve P7 e P5 com Diferentes Porcentagens de Biodiesel em Ciclo de Condução/  
Nicolas Lima de Oliveira. – Brasília, DF, 2024

59 p. : il. (algumas color.) ; 30 cm.

Orientador: Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa

Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade de Brasília – UnB  
Faculdade UnB Gama – FGA , 2024.

1. Biodiesel. 2. Motor à Diesel. I. Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa. II. Universidade de Brasília. III. Faculdade UnB Gama. IV. Análise das Emissões Atmosféricas em Motores a Diesel com legislação Proconve P7 e P5 com Diferentes Porcentagens de Biodiesel em Ciclo de Condução

CDU 02:141:005.6

---

Nicolas Lima de Oliveira

# **Análise das Emissões Atmosféricas em Motores a Diesel com legislação Proconve P7 e P5 com Diferentes Porcentagens de Biodiesel em Ciclo de Condução**

Monografia submetida ao curso de graduação em Engenharia Automotiva da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do Título de Bacharel em Engenharia Automotiva.

Trabalho aprovado. Brasília, DF, 2024 – Data da aprovação do trabalho:

---

**Prof. Dr. Fábio Cordeiro de Lisboa**  
Orientador

---

**MSc. João Carlos Wohlgemuth**  
Convidado 1

---

**Msc. Saleh Barbosa Khalil**  
Convidado 2

Brasília, DF  
2024

# Agradecimentos

Primeiramente, gostaria de agradecer a CNT (Confederação Nacional dos Transportes) por auxiliar a realização do experimento e entregar uma base para realização deste trabalho.

Agradeço a Deus por me sustentar e me dar forças durante a jornada, pois sem Ele e sem suas misericórdias eu não teria chegado até aqui.

Quero expressar minha gratidão aos meus amigos que me apoiaram, me motivaram e não me deixaram desistir diante dos obstáculos que encontrei ao longo da minha trajetória acadêmica, em particular Pablo Santos, Gustavo Silva e Rafael Ramos.

Agradeço à minha companheira Beatriz, que esteve ao meu lado em todos os momentos, me incentivando, me confortando e me ajudando a superar os desafios.

Gostaria de expressar minha profunda gratidão à minha mãe Elaine, que me apoiou em todos os momentos da minha jornada acadêmica. Ela foi uma fonte de inspiração, motivação e orientação para mim, sempre me incentivando a buscar meus sonhos e a superar os desafios. Ela me ensinou o valor da educação, do trabalho duro e da perseverança. Ela também me deu amor, carinho e compreensão, sem os quais eu não teria chegado até aqui. Por muitas vezes suprimia algum problema de saúde para não me preocupar durante a escrita do trabalho de conclusão de curso.

Aos meus professores, responsáveis até aqui pela minha formação em engenharia, estes serviram como pilares da minha jornada acadêmica e sou grato a todos que de alguma forma contribuíram para minha formação como engenheiro e como pessoa.

*Nícolas Lima de Oliveira*

*“ Seja você quem for,  
seja qual for a posição social que você  
tenha na vida, a mais alta ou a mais baixa,  
tenha sempre como meta muita força,  
muita determinação e sempre faça tudo com  
muito amor e com muita fé em Deus,  
que um dia você chega lá.  
De alguma maneira você chega lá.”  
(Ayrton Senna da Silva)*

# Resumo

A progressão tecnológica impulsionou o desenvolvimento de regulamentações mais rigorosas sobre emissões para mitigar o impacto ambiental causado por motores de baixa eficiência energética. Diante dessa realidade, a realização de pesquisas que avaliam os níveis de emissão de poluentes e a eficácia dos motores automotivos tornou-se essencial. Estudos específicos foram realizados alterando a composição do biodiesel em 7%, 15% e 20%, com o propósito de caracterizar, por meio de um ciclo de condução (ETC/WHTC), as condições que replicam o uso cotidiano dos veículos, visando estabelecer os níveis médios de emissão para veículos com distintas certificações. Os poluentes examinados incluíram Monóxido de Carbono (CO), Hidrocarbonetos (HC), Óxidos de Nitrogênio (NOx) e Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>). Complementarmente, testes de imposição de carga foram realizados para definir o ciclo ESC, coletando-se dados nas mesmas proporções de concentração. Durante o ciclo ESC, observou-se variações no desempenho do motor em sua capacidade máxima, conforme a alteração do percentual de biodiesel. O primeiro veículo analisado foi um Ford Cargo 815, produzido em 2010 e certificado conforme as normas PROCONVE P5, seguido por um Mercedes-Benz Accelo 815, fabricado em 2022, sob a certificação PROCONVE P7. Os procedimentos de teste ocorreram em um dinamômetro de chassi, adotando-se a metodologia da ABNT NBR 15634 e utilizando o sistema de análise de gases NAPRO PC-Multigás.

**Palavras-chave:** Ciclo de Condução, Diesel, Proconve.

# Abstract

Technological advancement has spurred the development of stricter emission regulations to mitigate the environmental impact caused by low energy-efficient engines. In light of this reality, conducting research to assess pollutant emission levels and the efficacy of automotive engines has become crucial. Specific studies were carried out by altering the biodiesel composition by 7%, 15%, and 20%, aiming to characterize, through a driving cycle (ETC/WHTC), the conditions that replicate the daily use of vehicles, with the goal of establishing average emission levels for vehicles with different certifications. The pollutants examined included Carbon Monoxide (CO), Hydrocarbons (HC), Nitrogen Oxides (NO<sub>x</sub>), and Carbon Dioxide (CO<sub>2</sub>). Additionally, load imposition tests were conducted to define the ESC cycle, collecting data in the same concentration proportions. During the ESC cycle, variations in engine performance at its maximum capacity were observed, according to the change in the percentage of biodiesel. The first vehicle analyzed was a Ford Cargo 815, produced in 2010 and certified according to PROCONVE P5 standards, followed by a Mercedes-Benz Accelo 815, manufactured in 2022, under the PROCONVE P7 certification. The testing procedures took place on a chassis dynamometer, adopting the methodology of ABNT NBR 15634 and utilizing the NAPRO PC-Multigas gas analysis system.

**Key-words:** Driving Cycle. Diesel. Proconve.



# Lista de ilustrações

Figura 1 – Evolução da idade média da frota dos sistemas de ônibus urbano. Fonte: (NTU) . . . . .	15
Figura 2 – Emissão de poluentes no estado de São Paulo em 2020   Fonte: CETESB	17
Figura 3 – Ciclo Termodinâmico Adaptado   Fonte: Universidade Chevrolet . . . . .	22
Figura 4 – Sistema de Recirculação dos Gases - EGR   Fonte: (MOURA, 2023) . . . . .	23
Figura 5 – Sistema de Redução Catalítica Seletiva SCR   Fonte: (EMITECO, 2023) . . . . .	24
Figura 6 – Sistema de Pós Tratamento DPF   Adaptado Fonte:(LÁZARO et al., 2011)	25
Figura 7 – Cinta de Amarração . . . . .	32
Figura 8 – Freio Magnético Dinamômetro Dynamite   Fonte: (DYNOMITE, 2014) . . . . .	33
Figura 9 – Arranjo dos Equipamentos   Fonte autoral . . . . .	34
Figura 10 – Dinamômetro - Lab. de Performance Automotiva - UnB - Gama Fonte: autoral . . . . .	34
Figura 11 – Fonte: Manual PC - MULTIGÁS - NAPRO   Fonte: (NAPRO, 2013) . . . . .	35
Figura 12 – Identificação dos itens do PC - MULTIGÁS; Adaptado   (Fonte:(NAPRO, 2013) . . . . .	36
Figura 13 – <i>Software</i> Modal 2010   Fonte: (NAPRO, 2003) . . . . .	39
Figura 14 – Comparativo CO - Ciclo ETC   Fonte: autoral . . . . .	44
Figura 15 – Óxidos de nitrogênio e Consumo específico - Ciclo ETC   Fonte: autoral . . . . .	45
Figura 16 – Comparativo CO - Ciclo ESC   Fonte: autoral . . . . .	46
Figura 17 – Óxidos de nitrogênio e Consumo específico - Ciclo ESC   Fonte: autoral . . . . .	46
Figura 18 – Comparativos de Potência   Fonte: autoral . . . . .	48
Figura 19 – Comparativos de Torque   Fonte: autoral . . . . .	48
Figura 20 – Dióxido de Carbono - CO <sub>2</sub> - Ciclo ETC   Fonte: autoral . . . . .	49
Figura 21 – Dióxido de Carbono - CO <sub>2</sub> - Ciclo ESC   Fonte: autoral . . . . .	50
Figura 22 – Configuração do Experimento . . . . .	57
Figura 23 – Disposição dos Equipamentos . . . . .	58
Figura 24 – Disposição das Cintas de Fixação . . . . .	58
Figura 25 – Frota de veículos diesel no Brasil por UF   Fonte: Ministério dos Transportes	59

# Lista de tabelas

Tabela 1 – Evolução fases Proconve   Fonte: (MACEDO et al., 2011) . . . . .	18
Tabela 2 – Especificações Técnicas PC - MULTIGÁS   Fonte:(NAPRO, 2013) . . . . .	35
Tabela 3 – Especificações Técnicas dos Caminhões   Fonte:(MERCEDES-BENZ, 2020), (FORD, 2010) . . . . .	36
Tabela 4 – Instrução para execução do ciclo de condução . . . . .	37
Tabela 5 – Dados médios de poluentes - Ciclo ETC . . . . .	42
Tabela 6 – Dados médios de emissões - Ciclo ESC . . . . .	43
Tabela 7 – Valores de densidade dos componentes de emissões - NBR 15634 . . . . .	43
Tabela 8 – Limites de Poluentes para ensaios ETC   Fonte: (MACEDO et al., 2011)	44
Tabela 9 – Limites de Poluentes para ensaios ESC   Fonte: (MACEDO et al., 2011)	45

# Lista de abreviaturas e siglas

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IPEA	Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
PROCONVE	Programa de Controle de Emissões Veiculares
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
PROMOT	Programa de Controle da Poluição do Ar por Motociclos e Veículos Similares
DOC	<i>Diesel Oxidation Catalyst</i>
DPF	<i>Diesel Particulate Filter</i>
EGR	<i>Exhaust Gas Recirculation</i>
SCR	<i>Selective Catalytic Reduction</i>
WHTC	<i>World Harmonized Transient Cycle</i>
NO <sub>x</sub>	Óxidos de Nitrogênio
CO	Monóxido de Carbono
HC	Hidrocarbonetos
MP	Material Particulado
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
FPT	<i>Federal Test Procedure</i>
UDDS	<i>Urban Dynamometer Driving Schedule</i>
HHDDT	<i>Heavy-Duty Diesel Truck Cycle</i>
ETC	<i>European Transient Cycle</i>
ESC	<i>European Stationary Cycle</i>
ELR	<i>European Load Response</i>
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
PCI	Poder Calorífico Inferior

# Lista de símbolos

$T_c$	Taxa de Compressão
$V_d$	Volume Deslocado
$V_c$	Volume da Câmara de Combustão
$P_e$	Potência Efetiva
$N$	Rotação do Motor
$\tau$	Torque presente no volante do motor
$P_i$	Potência Indicada
$x$	Tempo do Motor
$W_{ci}$	Trabalho Indicado por Ciclo
$\eta_m$	Rendimento Mecânico
$IMEP$	Potência Média Efetiva
$dV_a$	Variação do volume no interior do cilindro em função do ângulo da árvore de manivelas
$V_t$	Volume total do Motor
$\dot{Q}$	Potência Térmica
$\dot{m}_c$	Massa de combustível
$C_e$	Consumo específico
$\dot{W}_f$	Potência de atrito
$\lambda_e$	Proporção Ar/Combustível
$m_{ar}$	Massa de Ar
$\phi$	Razão de Equivalência
$(A/F_r)$	Razão Ar/Combustível Real
$(A/F_s)$	Razão Ar/Combustível Estequiométrico
$V_b$	Volume de Biodiesel

$V_d$	Volume de Diesel
$\dot{\eta}_i$	Rendimento Térmico
$\dot{\eta}_e$	Rendimento Efetivo
$\dot{\eta}_v$	Rendimento Volumétrico

# Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>15</b>
<b>1.1</b>	<b>Evolução da Legislação de Emissões no Brasil</b>	<b>16</b>
1.1.1	Histórico das Legislações	17
<b>1.2</b>	<b>Combustíveis</b>	<b>18</b>
<b>1.3</b>	<b>Ciclo de Condução</b>	<b>19</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivo</b>	<b>19</b>
1.4.1	Objetivos Específicos	19
<b>1.5</b>	<b>Organização do Trabalho</b>	<b>20</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>21</b>
<b>2.1</b>	<b>Combustão e Emissões (Ciclo Diesel)</b>	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>Controle de Emissões</b>	<b>22</b>
<b>2.3</b>	<b>Ciclo de Condução</b>	<b>25</b>
<b>2.4</b>	<b>Norma Regulamentadora</b>	<b>26</b>
2.4.1	Ciclo ETC	26
2.4.2	Ciclo ESC	27
<b>2.5</b>	<b>Parâmetros de Desempenho</b>	<b>27</b>
2.5.1	Taxa de Compressão	27
2.5.2	Potência	28
2.5.2.1	Potência Efetiva	28
2.5.2.2	Potência Indicada	28
2.5.2.3	Potência Média Efetiva	29
2.5.3	Proporção Ar/Combustível	30
2.5.4	Razão de Equivalência	31
<b>3</b>	<b>MATERIAIS E MÉTODOS</b>	<b>32</b>
<b>3.1</b>	<b>Fixação do Veículo no Dinamômetro</b>	<b>32</b>
<b>3.2</b>	<b>Instrumentos de Medição</b>	<b>32</b>
3.2.1	Balança	32
3.2.2	Dinamômetro de Chassi	33
3.2.3	Analizador de Gases e Condicionador de Gases	34
3.2.3.1	Detalhes do PC - MULTIGÁS	35
<b>3.3</b>	<b>Disposição dos equipamentos</b>	<b>36</b>
<b>3.4</b>	<b>Veículos</b>	<b>36</b>
<b>3.5</b>	<b>Parametrização do ciclo de condução nos veículos</b>	<b>37</b>
<b>3.6</b>	<b>Dados</b>	<b>37</b>

<b>3.7</b>	<b>Preparação das Concentrações de Diesel S10 + Biodiesel</b>	<b>38</b>
<b>3.8</b>	<b>Experimento</b>	<b>38</b>
<b>3.9</b>	<b>Métodos de Análise</b>	<b>39</b>
3.9.1	Rotação real	39
3.9.2	Torque real	40
3.9.3	Consumo Específico	40
3.9.4	Rendimento	40
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b>	<b>42</b>
<b>4.1</b>	<b>Tratamento dos Dados</b>	<b>42</b>
<b>4.2</b>	<b>Resultados Emissões Ciclo ETC</b>	<b>43</b>
<b>4.3</b>	<b>Resultados Emissões Ciclo ESC</b>	<b>45</b>
4.3.1	Comparação de Desempenho	47
<b>4.4</b>	<b>Emissões de CO2 Ciclo ESC e ETC</b>	<b>49</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>51</b>
<b>5.1</b>	<b>Ciclo ETC</b>	<b>51</b>
<b>5.2</b>	<b>Ciclo ESC</b>	<b>52</b>
<b>5.3</b>	<b>Impacto na Frota Brasileira</b>	<b>53</b>
<b>5.4</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>53</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>54</b>
	<b>APÊNDICES</b>	<b>56</b>

# 1 Introdução

O crescimento urbano é um fenômeno global que tem como consequência o aumento da demanda por transporte. No Brasil, esse aumento tem sido acompanhado pelo crescimento do transporte individual motorizado, o que tem gerado uma série de desafios para o transporte coletivo.

Outro desafio é a ineficiência do transporte público. O transporte coletivo muitas vezes é lento, irregular e inseguro, o que leva os usuários a optar pelo transporte individual motorizado. O aumento das tarifas de ônibus urbano, juntamente com o aumento da renda da população, pode levar à substituição do transporte coletivo por outros meios de transporte individual (CARVALHO, 2016).

No Brasil, os meios de transporte urbano consistem primariamente em ônibus equipados com motores a diesel. Como qualquer equipamento, estão sujeitos às vicissitudes climáticas e ao desgaste natural. Ademais, é importante ressaltar que veículos mais antigos foram produzidos sob normativas de emissões menos rigorosas, vigentes no período de sua fabricação.

Conforme o Anuário 2022 - 2023 publicado pela Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (1), verifica-se que a idade média da frota brasileira é de 6,3 anos, equivalente a seis anos e quatro meses. Este índice é o mais elevado registrado em relação à média de idade dos veículos de transporte urbano nos últimos vinte e oito anos. Os indicadores são estabelecidos com base nas médias apuradas nos meses de abril e outubro, sendo que a Figura 1 ilustra a trajetória da idade média dos sistemas de transporte urbano, abrangendo o período de 1995 até o ano de 2022.



Figura 1 – Evolução da idade média da frota dos sistemas de ônibus urbano. Fonte: (NTU)



O aumento do transporte individual motorizado tem como consequência uma série de problemas, como congestionamentos, poluição do ar e sonora, e acidentes de trânsito. Segundo o Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), a frota de veículos individuais motorizados (automóveis e motocicletas) no Brasil aumentou 331% entre 2001 e 2020 (PEREIRA et al., 2021) .

## 1.1 Evolução da Legislação de Emissões no Brasil

O PROCONVE, que é a abreviação para Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores, é um programa de alcance nacional no Brasil. Este programa foi estabelecido pela resolução CONAMA n.º 18/865 e tem como principais objetivos a redução da emissão de poluentes atmosféricos provenientes do transporte rodoviário e a promoção do desenvolvimento tecnológico no país. O programa é implementado por meio da fixação de limites máximos de emissão para os veículos automotores. Esses limites são estabelecidos com base em tecnologias disponíveis no mercado e são revistos periodicamente para garantir a melhoria da qualidade do ar.

De forma mais específica, o PROCONVE visa impulsionar o avanço da indústria automobilística e de sua cadeia produtiva. Através dessas ações, o programa contribui significativamente para a melhoria da qualidade do ar, especialmente nos centros urbanos, onde a poluição do ar é uma preocupação constante.

Além disso, o programa realiza a certificação de protótipos/projetos e o acompanhamento estatístico em veículos de produção. Essas atividades visam garantir que os veículos comercializados no Brasil atendam aos limites de emissão estabelecidos pelo programa.

Segundo o Relatório de Síntese (SYR) mais recente do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), as atividades humanas por meio das emissões dos gases de efeito estufa têm acelerado o aquecimento global.

Foi observado entre os anos de 2011-2020 um incremento na temperatura da ordem de 1,1°C, superando o período de 1850-1900. O relatório (CALVIN et al., 2023) apresenta que os níveis de emissões continuaram com aumento durante o período de 2010-2019 com níveis históricos devido a fatores como alteração no estilo de vida e padrões de consumo e produção.

De acordo com um estudo detalhado realizado pela CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo em 2022 (2), observou-se que as principais fontes de emissão de NOx (óxidos de Nitrogênio) e MP (Material Particulado) são veículos pesados como caminhões, semipesados e ônibus urbanos. Esses veículos são notáveis pelo uso intensivo do motor ciclo diesel, que contribui significativamente para a poluição atmosférica urbana.

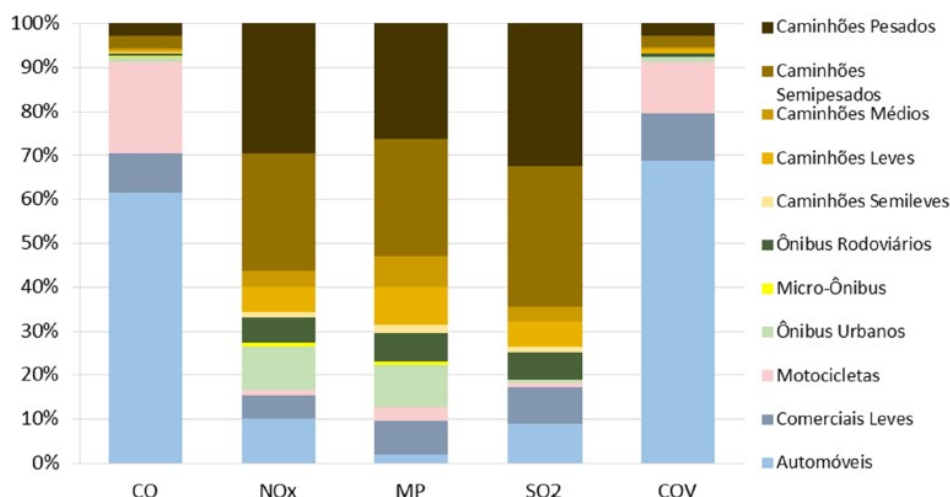


Figura 2 – Emissão de poluentes no estado de São Paulo em 2020 | Fonte: CETESB

A emissão de dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>) está intrinsecamente relacionada ao nível de enxofre nos combustíveis fósseis vendidos no Brasil. Uma quantidade considerável vem do diesel S500, utilizado por veículos pesados e semipesados mais antigos, contendo 500 mg/kg de enxofre. Contudo, com o endurecimento das regulamentações de emissões, há uma redução progressiva no uso desses tipos de combustíveis. Isso contribui para a diminuição do limite máximo de enxofre permitido tanto na gasolina quanto no diesel.

### 1.1.1 Histórico das Legislações

A evolução da legislação de emissões de poluentes por veículos a diesel no Brasil reflete um crescente reconhecimento da importância da sustentabilidade ambiental e da saúde pública. Inicialmente, as regulamentações eram menos rigorosas, permitindo níveis mais altos de emissões. Contudo, com o passar dos anos, o Brasil começou a adotar padrões internacionais, como o Euro, que estabelece limites mais estritos para a emissão de poluentes. A implementação do PROCONVE foi um marco significativo, introduzindo exigências progressivamente mais severas para a fabricação de veículos novos.

As fases do PROCONVE, que são atualizadas periodicamente, têm como objetivo alinhar o Brasil às melhores práticas globais, reduzindo substancialmente os poluentes como óxidos de nitrogênio (NO<sub>x</sub>), material particulado (MP) e hidrocarbonetos não queimados. Essas medidas não apenas promovem uma melhoria na qualidade do ar urbano mas também impulsionam a indústria automotiva nacional a inovar e buscar soluções tecnológicas mais limpas e eficientes. A transição para combustíveis de melhor qualidade, como o diesel S-10, com baixo teor de enxofre, é outro aspecto relevante dessa evolução legislativa, que visa compatibilizar os interesses econômicos com a preservação ambiental. A Tabela 1 apresenta as fases correspondentes para veículos a diesel no Brasil.

FASE PROCONVE	FASE EURO	CICLO DE CONDUÇÃO	GASES					VIGÊNCIA	RESOLUÇÕES
			g/kWh			ppm (Partes por milhão) ENXOFRE			
			CO	HC	NOx				
P1	—	—	14*	3,5*	18*	—	—	1989 a 1993	Resolução 18/ 1986
P2	EURO 0	—	11,2	2,45	14,4	0,6*	3.000 a 10.000	1994 a 1995	Resolução 8/ 1993
P3	EURO 1	—	4,9	1,23	9	0,4 ou 0,7**	3.000 a 10.000	1996 a 1999	Resolução 8/ 1993
P4	EURO 2	—	4	1,1	7	0,15	3.000 a 10.000	2000 a 2005	Resolução 8/ 1993
P5	EURO 3	ESC / ELR / ETC	2,1	0,66	5	0,1 ou 0,13***	500 a 2.000	2006 a 2008	Resolução 315/ 2002
P6	EURO 4	ESC / ELR / ETC	1,5	0,46	2	0,02	50	2009 a 2011	Resolução 315/ 2002
P7	EURO 5	ESC / ELR / ETC	1,5	0,46	2	0,02	10	2012 a 2022	Resolução 403/2008
P8	EURO 6	WHTC	4	0,16	0,46	0,01	10	A partir de janeiro de 2023	Resolução 490/2018

Tabela 1 – Evolução fases Proconve | Fonte: (MACEDO et al., 2011)

Onde:

\* Não foram exigidos legalmente;

\*\* 0,7 para motores com até 85kW (114 cv) e 0,4 para motores com potência superior a 85kW;

\*\*\* Motores com cilindrada unitária inferior a  $750\text{cm}^3$  e potência nominal superior a 3000 RPM.

## 1.2 Combustíveis

Os seres humanos sempre buscaram formas de se locomover com mais rapidez, conforto e segurança. Desde os tempos antigos, quando usavam animais, carruagens e barcos, até os dias atuais, com aviões, trens e carros, a história da humanidade é marcada pela invenção e aperfeiçoamento de meios de transporte.

Um dos meios de transporte mais populares e importantes do mundo é o carro. O carro é um veículo movido por um motor que usa combustível para gerar energia e fazer as rodas girarem. O carro permite que as pessoas se desloquem de um lugar para outro com mais autonomia, rapidez e praticidade do que outros meios de transporte.

A maior parte da energia consumida mundialmente tem origem no petróleo, carvão mineral e gás natural. No entanto, esses componentes são finitos, e, devido a isso, irão se esgotar no futuro devido ao alto consumo humano. Portanto, torna-se necessário buscar alternativas para a substituição das fontes energéticas fósseis por fontes renováveis.

Desde o final do século XIX, foram realizados testes com óleos de origem vegetal para motores a diesel, com resultados promissores. A ideia de utilizar combustíveis de origens agrícolas em motores com funcionamento de combustão instantânea se apresenta como uma proposta atrativa, uma vez que as fontes são renováveis, possibilitando a criação de uma matriz energética sustentável e autossuficiente.

De acordo (FERRARI et al., 2005) com biodiesel pode ser considerado como monoalquil-éster de ácidos graxos derivado de fontes renováveis, como óleos vegetais e gorduras animais, obtido através do processo de , nos quais o processo de transesterificação consiste na obtenção de um éster a partir de outro éster. Devido sua característica orgânica, o biodiesel possui alguns atributos vantajosos sobre os combustíveis fósseis, como serem

virtualmente livre de enxofre e compostos aromáticos, alto número de cetano, teor médio de oxigênio e maior ponto de fulgor.

## 1.3 Ciclo de Condução

Segundo (NESAMANI; SUBRAMANIAN, 2011), uma forma de caracterizar o padrão de condução de um veículo em uma determinada região é através de um ciclo de condução, que consiste em uma série de estados operacionais do veículo (marcha lenta, aceleração, desaceleração e cruzeiro). Esse conceito é usado em estudos de emissões, pois permite estimar a quantidade de poluentes emitidos pelo veículo em diferentes condições.

O Ciclo de Condução Harmonizado Mundial (WHTC) é um teste usado para avaliar as emissões de poluentes de veículos pesados, como caminhões e ônibus, que usam motores a diesel. Ele foi criado a partir de dados de condução globais e simula condições reais de operação em diferentes cenários de tráfego e foi utilizado junto com o ciclo WHSC (Ciclo de Condução Estacionário Harmonizado Mundial) para substituir os ciclos ESC e ETC. O WHTC é dividido em duas partes: uma fase de baixa velocidade, que simula o tráfego urbano, e uma fase de alta velocidade, que simula o tráfego rodoviário.

Este ciclo é um requisito da fase P-8 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE), que define limites mais rigorosos para as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), material particulado (MP), monóxido de carbono (CO) e hidrocarbonetos (HC) por veículos pesados. A fase P-8 do PROCONVE foi implementada em 2022 para novos modelos de veículos e em 2023 para todos os veículos.

## 1.4 Objetivo

Este estudo tem como objetivo avaliar o impacto do uso de biodiesel em concentrações diferentes nas emissões de veículos pesados. Além disso, visa investigar a conformidade de motores a diesel, que funcionam de acordo com as normas do PROCONVE P5 e P7, em relação às diferentes misturas de biodiesel. A análise focará em entender como as variações na concentração de biodiesel podem influenciar no desempenho dos motores e nos níveis de emissões.

### 1.4.1 Objetivos Específicos

O estudo proposto visa realizar ensaios de emissões em veículos de grande porte, empregando diferentes proporções de biodiesel em combinação com o diesel. O objetivo é analisar como essas variações na mistura influenciam os índices de emissões dos veículos.

Além disso, será examinado o impacto dessas diferentes concentrações de biodiesel no desempenho de cada veículo bem como o consumo específico de combustível.

Por fim, os resultados desses ensaios serão comparados com as normativas do PRO-CONVE P5 e P7, a fim de avaliar a conformidade ambiental e regulatória e a viabilidade do uso de concentrações maiores biodiesel junto ao diesel.

## 1.5 Organização do Trabalho

Este trabalho está dividido em cinco capítulos, que a seguir são brevemente apresentados.

O presente capítulo apresenta a contextualização do trabalho, elucidando os desafios enfrentados pelas organizações para controlar o nível de emissões de veículos automotores e introduzindo o conceito do ciclo de condução juntamente com o órgão de controle de emissões Brasileiro.

O capítulo 2 - apresenta a revisão bibliográfica, na qual o leitor é introduzido aos principais tópicos para compreender o desenvolvimento do experimento. Sendo abordados os conceitos sobre ciclo diesel, ciclo de condução e os requisitos para normalização do experimento de acordo com a NBR 15634.

O capítulo 3 - apresenta os materiais e métodos aplicados para a elaboração do experimento, abrangendo os equipamentos com suas respectivas resoluções e forma de aquisição de dados.

O capítulo 4 - Resultados e Discussão a respeito de cada ensaio realizado para cada ciclo e suas respectivas particularidades em relação aos poluentes emitidos pelos veículos durante os testes e os fatores que podem ter influenciado no aumento ou redução de cada tipo de poluente

O capítulo 5 - Conclusão dos resultados obtidos e construção de pensamento para futuros trabalhos.

## 2 Revisão Bibliográfica

Neste capítulo são apresentados os conhecimentos necessários para o desenvolvimento ciclo de condução, onde serão abordados, o conceito do motor diesel, o processo de criação do ciclo de condução e as normas envolvidas para realização do experimento. O conteúdo apresentado neste capítulo foi obtido através de livros, artigos de engenharias e normas regulamentadoras.

### 2.1 Combustão e Emissões (Ciclo Diesel)

O mecanismo de combustão dos motores do Ciclo Diesel caracteriza-se pela compressão, o que dispensa a necessidade de um agente externo para iniciar a ignição, diferentemente dos motores Ciclo Otto. Esta particularidade deve-se ao fato de que, nos motores Diesel, a compressão do ar é suficiente para elevar sua temperatura a um ponto em que o combustível injetado auto-ignita. Ademais, uma distinção notável desses motores é a sua alta taxa de compressão, que oscila entre 14:1 e 24:1.

Outro aspecto relevante é que o motor Diesel não opera com uma proporção fixa de ar para combustível; essa relação é flexível e se ajusta de acordo com a demanda de potência do motor, resultando em uma mistura mais pobre em situações de baixa demanda ou aproximando-se da proporção estequiométrica sob carga plena.

O Ciclo Diesel, um processo termodinâmico dividido em quatro etapas distintas, é fundamental para o funcionamento dos motores a diesel. Analisando o diagrama [3a](#), primeira etapa ocorre a compressão adiabática de 1 para 2, onde o ar aspirado é comprimido sem troca de calor, elevando sua temperatura a níveis que permitem a autoignição do combustível injetado. Segue-se a segunda etapa, têm-se a expansão isobárica de 2 para 3, caracterizada pela combustão a pressão constante; aqui, o aumento do volume dos gases, decorrente da combustão, compensa a potencial queda de pressão. A terceira etapa, 3 para 4, é novamente uma expansão, todavia esta é adiabática, durante a qual os gases se expandem sem transferir calor para o motor. E por fim, a quarta etapa sendo de 4 para 1, ocorre quando os gases, agora a baixa pressão, são expelidos do motor através da válvula de escape, completando o ciclo. ([TILLMANN, 2013](#))

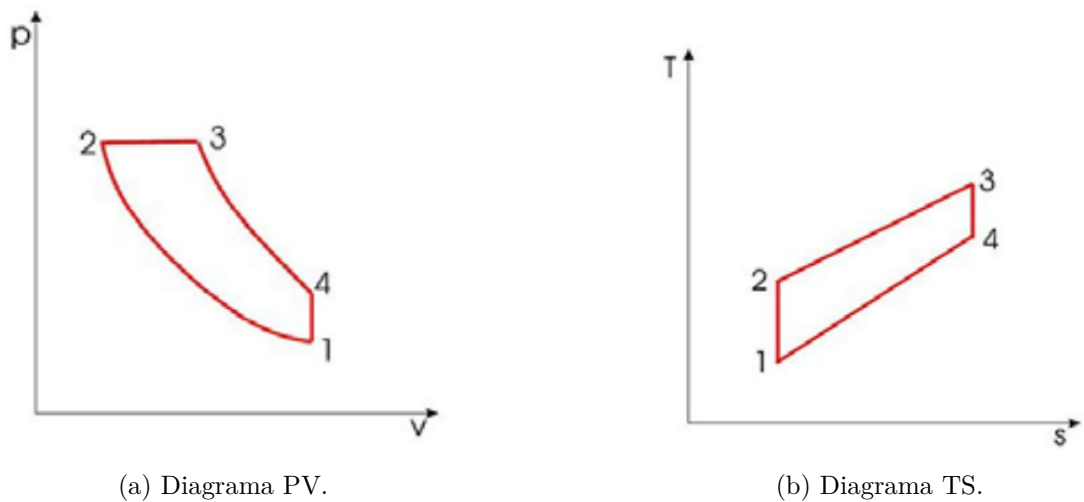


Figura 3 – Ciclo Termodinâmico Adaptado | Fonte: Universidade Chevrolet

## 2.2 Controle de Emissões

A transformação global da energia e a evolução do mercado de combustíveis no Brasil requerem uma compreensão aprofundada do padrão de consumo de energia em vários segmentos econômicos. Nesse contexto, um aspecto é o controle de emissões, especialmente no que se refere aos motores diesel.

O controle de emissões é um conjunto de medidas que visam reduzir a poluição ambiental causada pelo motor diesel. As principais emissões do motor diesel são: óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), material particulado (MP) e dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). Para controlar essas emissões, existem técnicas que podem ser aplicadas no projeto do motor, no tratamento do combustível ou no tratamento dos gases de escape. Algumas dessas técnicas são: a recirculação dos gases de escape (EGR), a redução catalítica seletiva (SCR), o filtro de partículas diesel (DPF), a injeção de ureia (DEF) e a otimização da combustão. (BAI et al., 2018).

Para melhor explicar como funciona cada técnica de controle de emissão, se faz necessário compreender o mecanismo de funcionamento e o momento de atuação de cada técnica. Para tanto temos:

- EGR - Nos motores de combustão interna contemporâneos, a Recirculação de Gases de Escape (EGR) é uma técnica empregada para regular as emissões de óxidos de nitrogênio (NOx), que são gerados como um subproduto durante a combustão.

O ar atmosférico, que é predominantemente uma mistura de oxigênio e nitrogênio, se combina com o combustível e se inflama na câmara de combustão. Com o aumento das temperaturas, ocorre a produção de emissões de NOx, que é prejudicial ao meio ambiente.

O sistema EGR opera recirculando uma fração dos gases de escape de volta às câmaras de combustão do motor por meio do coletor de admissão. Este processo resulta na diminuição das temperaturas de combustão e, conseqüentemente, na redução da emissão de NOx.

A válvula EGR, que é o componente central do sistema EGR, geralmente permanece fechada. Esta estabelece a conexão entre o coletor de escape e o coletor de admissão e é normalmente regulada por vácuo ou podendo ser comandada de forma eletrônica. A principal função da válvula EGR é gerenciar o fluxo dos gases de escape que estão sendo recirculados, variando de acordo com a carga do motor, conforme ilustra a Figura 4.

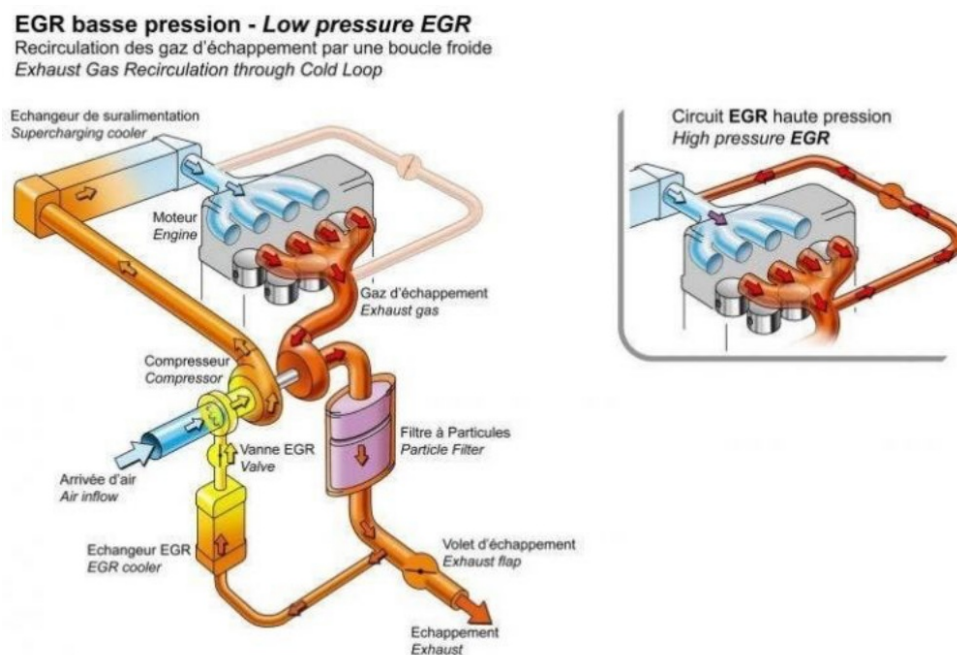


Figura 4 – Sistema de Recirculação dos Gases - EGR | Fonte: (MOURA, 2023)



- SCR - (Redução Catalítica Seletiva, do inglês *Selective Catalytic Reduction*) é um sistema focado no tratamento dos gases de escape. Este sistema, de estrutura simples e com poucos componentes, inclui um tanque para o aditivo ARLA32 (equivalente ao aditivo AdBlue utilizado na Europa), uma bomba de sucção, um dispositivo de dosagem, uma unidade injetora e um catalisador. O SCR foi projetado com o objetivo de diminuir os níveis de óxidos de nitrogênio (NOx). Isso é realizado por meio de um sistema de pós-tratamento dos gases de exaustão que transforma os óxidos de nitrogênio em nitrogênio e vapor de água.

O mecanismo de funcionamento do sistema SCR se dá através de uma bomba aspirando o aditivo ARLA32 (Agente Redutor Líquido Automotivo a 32%), que está armazenado em um tanque específico, pressurizando-o a 5 bar e o injetando no sistema de escape, por onde circulam os gases originários do motor. A ureia presente no ARLA32, ao ser exposta à alta temperatura do escape, transforma-se em amônia e se combina com os gases de escape. Esta mistura é conduzida até o catalisador, onde a ureia reage com os óxidos de nitrogênio (NOx), convertendo-os em nitrogênio e vapor de água. O consumo de ARLA32 representa aproximadamente 4 a 5% do consumo de diesel. No entanto, a eficiência de combustão aprimorada do novo motor contribui para a redução do consumo de combustível. O ARLA32 é um líquido estável, incolor, totalmente seguro e inodoro. A substância ativa nele contida, a ureia, é derivada do gás natural. A composição deste aditivo consiste em 32,5% de ureia diluída em água desmineralizada.

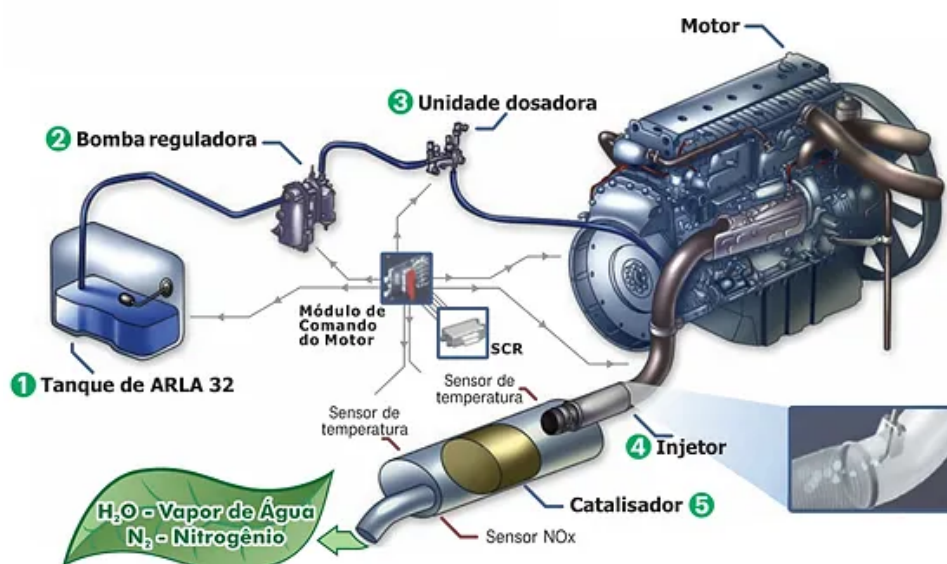


Figura 5 – Sistema de Redução Catalítica Seletiva SCR | Fonte: (EMITECO, 2023)

- DPF - O Filtro de Partículas Diesel (6) representa um componente no sistema de pós-tratamento de veículos a diesel, desempenhando uma função de captura de par-

tículas de fuligem e cinzas resultantes do processo de combustão. Este dispositivo é composto por um filtro de material cerâmico, cuja estrutura porosa é meticulosamente projetada para reter as partículas nocivas. Durante o funcionamento do veículo, o DPF acumula estas partículas, e periodicamente, inicia-se um processo de regeneração, que consiste em um ciclo de combustão controlado com o objetivo de incinerar a fuligem acumulada, convertendo-a em compostos menos nocivos.

A regeneração do DPF pode ocorrer de duas maneiras distintas: passiva e ativa. A regeneração passiva é um processo que se beneficia das condições normais de operação do veículo, onde a temperatura elevada, gerada por cargas altas e velocidades consideráveis, promove a oxidação natural da fuligem acumulada no filtro, resultando na formação de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), que é então expelido de maneira eficiente.

Em contrapartida, a regeneração ativa é necessária quando as condições de operação do veículo não são suficientes para induzir a reação de oxidação. Neste cenário, o motor toma medidas adicionais, injetando combustível adicional na corrente de exaustão. Este combustível, ao entrar em contato com o Catalisador de Oxidação Diesel (DOC), é submetido a um processo de oxidação que gera o calor necessário para transformar a fuligem retida no DPF em  $\text{CO}_2$ , garantindo assim a eficácia e a longevidade do sistema de pós-tratamento.

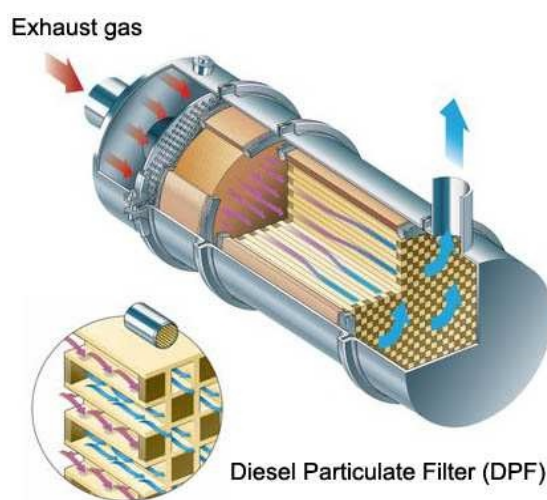


Figura 6 – Sistema de Pós Tratamento DPF | Adaptado Fonte:([LáZARO et al., 2011](#))

## 2.3 Ciclo de Condução

Para um tipo específico de veículo, o consumo de combustível e as taxas de emissão de poluentes dependem principalmente de como o veículo é usado (por exemplo, se as viagens são curtas ou longas, frequentes ou esporádicas) e das condições de operação

do veículo (por exemplo, se a velocidade é alta ou baixa, se o motor trabalha em altas ou baixas rotações, se as acelerações são suaves ou bruscas, se a temperatura é quente ou fria). Além disso, esses fatores são influenciados pelas condições de tráfego e pelo comportamento individual do motorista. Assim, para fazer uma avaliação realista das emissões, dos métodos de redução da poluição e da eficácia das tecnologias de controle de emissões, é preciso levar em conta as condições reais de operação dos veículos ([ANDRE et al., 1995](#)).

De acordo com artigo *Driving cycles that reproduce driving patterns, energy consumptions and tailpipe emissions*, que fala sobre a padronização do ciclo de condução ([QUIRAMA et al., 2020](#)), os ciclos de condução mais relevantes juntamente com seus métodos são FPT 72, FPT 75, que utiliza o método de seleção de rota, usando como parâmetros para avaliação do ciclo, a média de velocidade e aceleração e a velocidade máxima atingida, este ciclo trata-se de um ciclo urbano do qual visa avaliar veículos utilizando o sistema UDDS (*Urban Dynamometer Driving Schedule*). Já para veículos pesados equipados com motores Diesel, existem os ciclos HHDDT (*Heavy-Duty Diesel Truck Cycle*) e WHTC (*World Harmonized Transient Cycle*), o primeiro utiliza métricas como velocidade média, período em marcha lenta, engarrafamentos, aceleração, velocidade de cruzeiro, desaceleração e velocidade máxima atingida no trecho, já o segundo ciclo pode ser considerado como ciclo de condução global contendo 1800 segundos de condições de transformação de procedimentos de teste de ciclo transiente, incluindo três partes, respectivamente, são a partida a frio, a imersão a quente e a partida a quente. O programa de teste requer um teste completo de partida a frio WHTC primeiro, seguido por 10 min de tempo de imersão a quente (motor fechado e sem dados aquisição), então um teste de partida a quente WHTC. ([MYUNG et al., 2013](#))

## 2.4 Norma Regulamentadora

A norma ABNT NBR 15634 estabelece os métodos para a medição quantitativa dos poluentes gasosos, das partículas sólidas e da opacidade da fumaça, provenientes de motores do ciclo Diesel que utilizam Óleo Diesel ou Etanol como combustíveis nos testes definidos para cada caso, seguindo os ciclos ETC (*European Transient Cycle*), ESC (*European Stationary Cycle*) e ELR (*European Load Response*), e dos poluentes gasosos originados de motores do ciclo Otto, que funcionam com gás natural ou gás liquefeito de petróleo, seguindo o ciclo ETC, aplicados aos veículos rodoviários automotores.

### 2.4.1 Ciclo ETC

O Ciclo Transiente Europeu (ETC), estabelecido pela Diretiva 1999/96/EC em 2000, é um padrão de teste para certificar as emissões de veículos pesados com motores

a diesel na Europa. Criado pelo Instituto FIGE em Aachen, Alemanha, o ETC replica condições reais de tráfego e é dividido em três fases: urbana, rural e autoestrada, cada uma com duração de 600 segundos, totalizando 1800 segundos. Na fase urbana, simula-se o trânsito da cidade com velocidades de até 50 km/h, com arranques e paradas frequentes. A fase rural envolve aceleração contínua até uma média de 72 km/h. Por fim, a fase de autoestrada reflete uma condução mais constante a uma média de 88 km/h. O teste é realizado em um dinamômetro que registra a velocidade e o torque do motor durante o ciclo completo.

### 2.4.2 Ciclo ESC

O ciclo de teste European Stationary Cycle (ESC) serve também para certificar as emissões de motores diesel pesados na Europa, estabelecido pela Diretiva 1999/96/EC em 2000, substituindo o antigo teste R-49. Este ciclo consiste em 13 modos operacionais estáveis, onde o motor é testado em um dinamômetro seguindo uma ordem específica de operações. Cada modo é avaliado individualmente, com suas emissões medidas e ponderadas para calcular uma média, utilizando-se fatores específicos de ponderação. Durante o teste, partículas são acumuladas em um filtro único ao longo dos 13 modos. A performance do motor é expressa em gramas de emissão por quilowatt-hora (g/kWh), e o ESC é notável por testar os motores em altas cargas médias e temperaturas elevadas dos gases de escape, elementos estes utilizados para aferir o desempenho sob condições de carga constante.

## 2.5 Parâmetros de Desempenho

As características de um motor de combustão interna, como o torque ( $T$ ), a potência ( $P$ ) e o consumo específico ( $C_e$ ), são fundamentais para a construção das curvas características. Para a execução deste estudo, se faz necessário a apresentação de uma base teórica acerca dos motores de combustão interna. Esta fundamentação envolve a descrição detalhada dos conceitos fundamentais, bem como das equações pertinentes que são essenciais para o cálculo dos parâmetros operacionais do motor objeto de análise. A compreensão desses elementos teóricos são obrigatórios para a correta interpretação dos resultados obtidos e para a validação das hipóteses propostas no início da pesquisa. Dessa forma, assegura-se que o estudo esteja ancorado em sólidos conhecimentos técnicos, permitindo uma análise precisa e confiável do a cerca do funcionamento do motor.

### 2.5.1 Taxa de Compressão

A taxa de compressão constitui um parâmetro técnico que está intrinsecamente relacionado às características geométricas do motor. Essa taxa é definida pelo quociente

entre os volumes máximos e mínimos dentro da câmara do pistão, os quais são determinados pelas posições do pistão no ponto morto superior e no ponto morto inferior, respectivamente. Este índice é fundamental, pois influencia diretamente a eficiência termodinâmica e o desempenho do motor. Que de acordo com a seção 2.2 do livro (HEYWOOD, 2018), pode ser deduzido matematicamente por:

$$T_c = \frac{V_d + V_c}{V_c} \quad (2.1)$$

Sendo que:

$T_c \rightarrow$  é a Taxa de Compressão;

$V_d \rightarrow$  é o Volume Deslocado, popularmente conhecido como cilindrada;

$V_c \rightarrow$  é o Volume da Câmara de Combustão.

## 2.5.2 Potência

A potência, que é a taxa de realização de trabalho ao longo do tempo, nos motores de combustão interna, é gerada pela transformação da energia térmica, proveniente da combustão do combustível com o ar atmosférico, em energia mecânica. Esta transformação não é completamente eficiente, e por isso, diferencia-se potência indicada, efetiva e média efetiva, além da potência térmica.

### 2.5.2.1 Potência Efetiva

A potência efetiva de um motor é a potência transmitida diretamente ao eixo da árvore de manivelas, também conhecida como virabrequim. Essa potência pode ser descrita como disponível ou útil. O cálculo desse valor é feito pelo produto do torque pela velocidade angular, o qual já contempla as perdas mecânicas de potência inerentes ao sistema. Esta pode ser encontrada matematicamente conforme a seção 2.4 do livro de (HEYWOOD, 2018):

$$P_e = 2\pi N\tau \quad (2.2)$$

sendo que:

$P_e \rightarrow$  é a potência efetiva;

$\pi \rightarrow$  é o número pi;

$N \rightarrow$  é a rotação do motor

$\tau \rightarrow$  é o torque presente no volante do motor.

### 2.5.2.2 Potência Indicada

A potência indicada está associada ao trabalho realizado em cada ciclo dentro do cilindro do motor, à rotação do motor e ao número de voltas da árvore de manivelas.

Conforme a seção 2.5 do livro (HEYWOOD, 2018):

$$P_i = \frac{W_{ci} \times N}{\eta_r} \quad (2.3)$$

sendo:

$x \rightarrow$  representa o tempo dos motores, valendo 2 para motores 4 tempos e 1 para motores 2 tempos;

$W_{ci} \rightarrow$  é o trabalho indicado por ciclo

$N \rightarrow$  é o número de rotações do motor

Esta potência indicada pode ser descrita também como a razão entre a potência efetiva e o rendimento mecânico, segundo (VAGO, 2022):

$$P_i = \frac{P_e}{\eta_m} \quad (2.4)$$

Na dissertação, a autora enfatiza a necessidade de compreender a origem do valor do rendimento mecânico. Ela explica que o rendimento mecânico é derivado dos componentes internos do motor que produzem potência de atrito. Esta potência é inversamente proporcional ao rendimento, ou seja, se a potência de atrito for alta, o rendimento mecânico diminui.

### 2.5.2.3 Potência Média Efetiva

Parafraseando (VAGO, 2022), o torque de um motor é uma característica distintiva, influenciada pela variação dos tamanhos e configurações dos motores. Para atenuar o impacto dessa especificidade, emprega-se o conceito de pressão média indicada. Esta representa a pressão que deve ser aplicada no interior do cilindro, em um ciclo completo, para gerar o mesmo trabalho que seria produzido durante o funcionamento padrão do motor. Para a autora, a Potência Média Efetiva pode ser descrita como:

$$IMEP = \frac{\oint P_c \times dV_a}{V_t} \quad (2.5)$$

Sendo:

$P_c \rightarrow$  Pressão no cilindro;

$dV_a \rightarrow$  Variação do volume no interior do cilindro em função do ângulo da árvore de manivelas;

$V_t \rightarrow$  cilindrada total do motor.

Para um motor de combustão interna, são definidas quatro potências: potência térmica Eq. 2.5, potência indicada ( $P_i$ ), sendo esta a potência desenvolvida na cabeça dos pistões; potência de atrito ( $\dot{W}_f$ ) correspondendo às partes móveis do motor que geram

resistência e por fim, a potência efetiva ( $P_e$ ). Aqui estão as equações numéricas para cada uma:

Potência térmica ( $\dot{Q}$ ): É a energia total liberada pela combustão do combustível. Pode ser calculada pela equação:

$$\dot{Q} = \dot{m}_c \times PCI \quad (2.6)$$

onde PCI é o poder calorífico do combustível e  $\dot{m}_c$  é a massa de combustível queimado por unidade de tempo.

A relação entre as Potências pode ser descrita como:

$$P_e = P_i - \dot{W}_f \quad (2.7)$$

Onde a potência pode ser representada como uma função do torque (T) e da velocidade de rotação do motor (N), que é geralmente medida em rotações por minuto (RPM).

$$P_e = \omega \times T = \frac{2\pi \times N}{60} \times T \quad (2.8)$$

onde:

$\omega \rightarrow$  é a velocidade angular do motor.

### 2.5.3 Proporção Ar/Combustível

A razão ar combustível estequiométrica, também conhecida como razão teórica, é um conceito fundamental na química da combustão. Ela é representada pelo símbolo  $\lambda_e$  e refere-se à quantidade exata de ar necessária para a combustão completa de um combustível.

Matematicamente, pode-se expressar a razão estequiométrica como:

$$\lambda_e = \frac{\dot{m}_{ar}}{\dot{m}_c} \quad (2.9)$$

Nesta equação, a massa de ar é a quantidade de ar (em kg) necessária para a combustão completa do combustível, e a massa de combustível é a quantidade de combustível (também em kg) que está sendo queimada.

O valor de  $\lambda_e$  é normalmente utilizado como referência na análise da eficiência da combustão. Quando a razão ar/combustível real é equivalente à razão estequiométrica (ou seja,  $\lambda = \lambda_e$ ), se considera que a mistura ar/combustível é estequiométrica. Neste caso, todo o combustível e todo o oxigênio são completamente consumidos na reação de combustão.

### 2.5.4 Razão de Equivalência

Um parâmetro reconhecido como mais eficiente para avaliar o desempenho de um motor é a relação ar/combustível. Segundo(HEYWOOD, 2018), "os produtos resultantes da combustão variam de acordo com a riqueza da mistura em combustível, dado que a proporção estequiométrica ar/combustível é influenciada pela composição do combustível". A expressão matemática dessa relação pode ser representada da seguinte forma:

$$\phi = \frac{(A/F)_r}{(A/F)_s} \quad (2.10)$$

onde:

$\phi \rightarrow$  é a razão de equivalência;

$(A/F)_r \rightarrow$  se trata da razão ar/combustível real;

$(A/F)_s \rightarrow$  se trata da razão ar/combustível estequiométrica.



## 3 Materiais e Métodos

Neste capítulo serão apresentados os materiais e métodos para o estudo comparativo das emissões de poluentes atmosféricos provenientes da combustão de diesel e biodiesel em diferentes proporções. O objetivo é avaliar o impacto da adição de biodiesel ao diesel convencional. Para isso, foram utilizados dois caminhões com normas de emissão diferentes: o Mercedes Accelo, que segue a legislação P7 (equivalente à Euro 5), e o Ford Cargo, que segue a legislação P5 (equivalente à Euro 3). As emissões de oxigênio, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio e dióxido de enxofre, usando um sistema de amostragem e analisador de partículas e gases. Os combustíveis testados foram o diesel puro e misturas de diesel com biodiesel nas proporções de 7%, 15% e 20% em volume.

### 3.1 Fixação do Veículo no Dinamômetro

Para a fixação do veículo, foram utilizadas 4 cintas de amarração com catraca e gancho em “J” 7 com suporte de até 3 toneladas cada uma.



Figura 7 – Cinta de Amarração

O procedimento adotado para fixação foram as boas práticas de segurança quando se opera um veículo sob dinamômetro de chassi. Este procedimento envolve o uso de ganchos ancorados ao solo do laboratório, que servem como pontos de fixação para a amarração dos veículos durante os ensaios. Para garantir a estabilidade durante o ensaio, as cintas de fixação foram dispostas em um padrão cruzado, formando um "X". A configuração é ilustrada na Figura 24 no apêndice.

### 3.2 Instrumentos de Medição

#### 3.2.1 Balança

Para a aferição da massa de óleo diesel, utilizou-se uma balança eletrônica Toledo modelo 9094C/5. A informação de massa consumida pelo veículo é essencial para estimar

o consumo específico durante cada ensaio.

Acoplado à balança esta um computador responsável por registrar a variação de massa presente durante os ensaios. Esta balança, que possui resolução de classe de exatidão III do Inmetro ( $\pm 2g$ ), esta resolução permitiu a determinação da diferença gravimétrica.

Um computador estava conectado à balança, registrando a variação de massa que ocorre durante os ensaios. O protocolo de comunicação utilizado é o Prt1, que se caracteriza por: 1 Bit de parada; 8 Bits de dados; Sem paridade.

O processo de envio dos dados é iniciado quando a balança recebe o comando de solicitação “ENQ”, que é um caractere ASCII (05H) enviado pelo dispositivo externo. Com este comando e sob condição de peso estável, a balança enviará ao dispositivo externo um pacote de dados: [STX][PPPPP][ETX]. Neste pacote, STX é um caractere ASCII (02 H) que indica o início da transmissão, e PPPPP são 5 caracteres ASCII que representam o peso sem ponto decimal. (PRIX, 2023)

### 3.2.2 Dinamômetro de Chassi

Para a análise, foi empregado um dinamômetro de chassi da marca Dynamite, com 12 polegadas de diâmetro. Este equipamento, dotado de um freio de indução elétrica, conforme ilustra a Figura 8.



Figura 8 – Freio Magnético Dinamômetro Dynamite | Fonte: (DYNAMITE, 2014)

O dinamômetro possui a capacidade de suportar até 700 hp de potência. O sistema é complementado por um dispositivo de aquisição de dados (DAQ), que inclui sensores para o registro dos parâmetros do motor do veículo. Adicionalmente, uma estação meteorológica ajusta os dados coletados de acordo com as condições locais de temperatura e pressão. A Figura 9 ilustra a disposição dos equipamentos em relação ao dinamômetro.

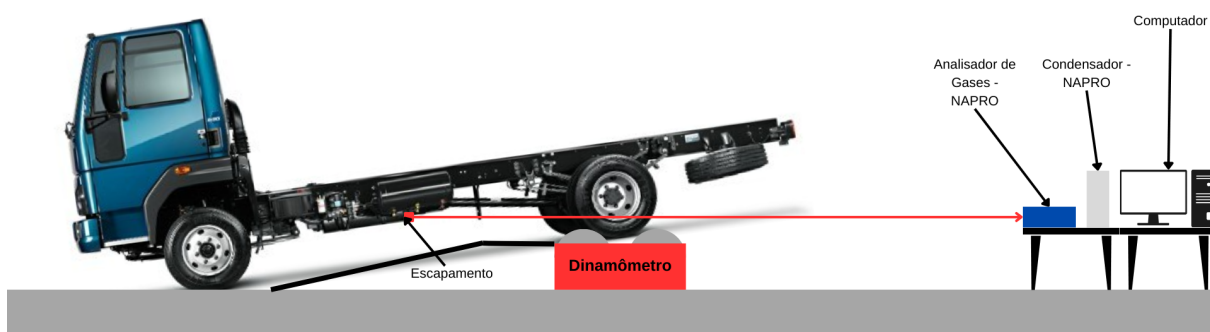


Figura 9 – Arranjo dos Equipamentos | Fonte autoral

O sistema também é equipado com um sensor de rotação e uma célula de carga, que são utilizados para a medição do torque. Com uma resolução de 5%, o sistema pode alcançar velocidades máximas de até 150 mp/h ou 240 km/h. (DYNOMITE, 2014) A Figura 10 apresenta o dinamômetro utilizado estando este localizado no Laboratório de Performance Automotiva da Universidade de Brasília - Campus Gama.

Figura 10 – Dinamômetro - Lab. de Performance Automotiva - UnB - Gama  
Fonte: autoral

### 3.2.3 Analisador de Gases e Condicionador de Gases

O analisador de gases utiliza o método de infravermelho não dispersivo para detectar CO, CO<sub>2</sub> e HC, e o método de células eletroquímicas para detectar O<sub>2</sub> e NO<sub>x</sub>, este método que cumpre com as exigências das normas NBR, OIML R99 CLASS1, ISO3930

e ASM/BAR 97 para a medição de gases . Além disso, este pode medir a rotação do motor por um sensor indutivo tipo *clamp* e a temperatura por um sensor termopar tipo J, dos quais não serão utilizados para o presente estudo. O analisador também controla o funcionamento do desumidificador, que retira a umidade da amostra de gás.



Figura 11 – Fonte: Manual PC - MULTIGÁS - NAPRO | Fonte: (NAPRO, 2013)

O equipamento calcula o valor de Lambda e AFR (*Air-Fuel Ratio*), que indicam a eficiência da combustão, com base nos gases medidos e em constantes específicas para cada tipo de combustível, seguindo a fórmula de Brettschneider para o equilíbrio das reações químicas.

Dados Técnicos	PC - MULTIGÁS
Alimentação:	12VCD ou 110/220VAC - 60Hz
Resolução	
CO:	0 - 15% (Monóxido de Carbono)
CO2:	0 - 20% (Dióxido de Carbono)
HC:	0 - 20000ppm Hexano (Hidrocarbonetos referenciado ao Hexano)
O2:	0 - 25% (Oxigênio)
NOx:	0 - 5000ppm (Óxido Nítrico)
Lambda:	0 - 9.99
AFR:	0 - 99.99 Air Fuel Ratio
Interface Serial:	RS 232C

Tabela 2 – Especificações Técnicas PC - MULTIGÁS | Fonte:(NAPRO, 2013)

### 3.2.3.1 Detalhes do PC - MULTIGÁS

Os procedimentos para a instalação do PC - MULTIGÁS devem ser seguidos de acordo com o Manual da NAPRO, a Figura 12 apresenta os componentes presentes no analisador de gases que são: Tomada de Alimentação, Fusível de Entrada, LED de alimentação para indicar se o equipamento está energizado e pronto para realizar a comunicação com o computador e o filtro, que auxilia na filtragem dos gases, evitando particulados sólidos e sujeiras dentro do equipamento.



Figura 12 – Identificação dos itens do PC - MULTIGÁS; Adaptado | (Fonte:(NAPRO, 2013))

3.3 Disposição dos equipamentos

Para facilitar a compreensão do experimento, foi criado um croqui que ilustra a disposição dos equipamentos no Laboratório de Performance Automotiva da Faculdade do Gama - UnB. Neste croqui, um modelo genérico de veículo foi usado para representar os veículos testados. As diferenças entre os veículos testados residem na saída dos gases de escape e na localização do tanque de combustível, que variam de lado. O croqui está presente na seção de apêndices (22 e 23).

3.4 Veículos

Para a realização dos testes, foram utilizados dois caminhões, com regulamentações diferentes para o motor, sendo o Mercedes Accelo 815 ano 2022 regido pela Proconve P7 (equivalente à Euro V), com a utilização do sistema de pós tratamento SCR com adição de Arla-32, válvula de recirculação dos gases de escape (EGR) e elemento filtrante de partículas (DPF) e segundo se trata de um Ford Cargo 815 ano 2010 regido pela Proconve P5 (equivalente à Euro III), com EGR e DPF. As especificações técnicas estão apresentadas Tabela 2.

Fichas Técnicas	Mercedes Accelo 815 2022	Ford Cargo 815 2010
Motor	MB OM 924 LA, 4 cilindros em linha, turbo-alimentado	Cummins / Interact 4 150 - P5, 4 cilindros em linha, turbo-alimentado
(B x S) Cilindrada	(106mm x 136mm) 4,8L	(102mm x 120mm) 3,9L
Combustível	Diesel	Diesel
Potência Máxima	156 cv (115 kW) a 2.200 rpm	150 cv (110 kW) a 2500 rpm
Torque Máximo	580 Nm (59 kgfm) a 1.200 - 1.600 rpm	550 Nm (56 kgfm) a 1500 rpm
Câmbio	EATON FSO 4505A	EATON FSO-4405-C
Sistema de Pós Tratamento	EGR, DPF e SCR	EGR e DPF

Tabela 3 – Especificações Técnicas dos Caminhões | Fonte:(MERCEDES-BENZ, 2020), (FORD, 2010)

### 3.5 Parametrização do ciclo de condução nos veículos

A duração total do ciclo de condução WHTC é de 1800 segundos, sendo 900 segundos para a fase de baixa velocidade e 900 segundos para a fase de alta velocidade. O ciclo é realizado em um dinamômetro de chassi em laboratórios especializados, onde o veículo é colocado sobre rolos que simulam a resistência do solo. O veículo é submetido a diferentes etapas de aceleração e desaceleração de acordo com o perfil de velocidade definido pelo ciclo.

Tempo (s)	Ordem de Marcha	Velocidade (km/h)
0 - 60	2	20
60 - 150	3	40
150 - 180	Neutro	0
180 - 210	2	20
210 - 240	Neutro	0
240 - 600	3	40
600 - 720	Neutro	0
720 - 900	3	40
900 - 1200	4	60
1200 - 1320	Neutro	0
1320 - 1800	4 e 5	80

Tabela 4 – Instrução para execução do ciclo de condução

### 3.6 Dados

Os dados coletados pelo dinamômetro e pelo analisador de gases foram armazenados em um computador, conectado aos equipamentos por meio de cabos USB. Os dados foram processados e analisados usando o *software* DYNO-MAX da própria fabricante do dinamômetro e para receber os dados provenientes do PC-Multigás, foi utilizado o MODAL 2010 *software*, *software* este disponibilizado pela NAPRO, ambos geram dados em formato CSV que serão utilizados para etapa de resultados.

O objetivo do experimento foi comparar o desempenho, o consumo e as emissões dos dois caminhões, sob as mesmas condições de operação, e verificar se há diferenças significativas entre eles. Além disso, o experimento buscou identificar os fatores que mais influenciam essas variáveis, como a carga, a velocidade, a aceleração e a inclinação do terreno.

De acordo com a ABNT NBR 15634, durante o ciclo de ensaio, o gás de exaustão deve passar pelos analisadores, cujos resultados devem ser armazenados por um dispositivo de registro de agulhas ou medidos por um sistema de aquisição de dados equivalente.

### 3.7 Preparação das Concentrações de Diesel S10 + Biodiesel

Para a realização do estudo, realizou-se o preparo das concentrações com 7%, 15% e 20% de biodiesel no diesel. O cálculo de concentrações de Diesel + Biodiesel é uma etapa importante em um experimento que visa avaliar o desempenho e as emissões de um motor a diesel alimentado com diferentes misturas de combustíveis.

O intuito desta mistura de Diesel + Biodiesel é avaliar se com o acréscimo de biodiesel o nível de emissões é reduzido mantendo o mesmo nível de performance. Para realizar o experimento, é necessário calcular as concentrações de Diesel + Biodiesel em cada mistura, considerando o volume de cada componente. A Equação 3.1 apresenta a razão entre massa de diesel e biodiesel, variando apenas suas concentrações, conforme requerido.

$$C_{(7\%/15\%/20\%)} = \frac{V_b}{V_d + V_b} \quad (3.1)$$

Sendo  $V_b$  o volume de biodiesel e  $V_d$  o volume de diesel.

### 3.8 Experimento

Em experimento, um reservatório de combustível foi alocado sob o prato da balança Toledo 9094C/5, com o objetivo de alimentar o motor. A resolução da balança é classe III do Inmetro ( $\pm 2g$ ). Após estabilizar o peso do óleo diesel na balança, é iniciado o ciclo de condução juntamente com um cronometro que serve de guia para o motorista em operação, este por sua vez estava sincronizado com o tempo apresentado pelo *software* DYNO-MAX, com as velocidade e ordem de marcha a ser seguida.

Dessa forma, foi possível determinar a quantidade de massa consumida em um determinado intervalo de tempo ( $t$ ). Essa medida representa a vazão em massa do combustível ( $\dot{m}_c$ ) consumido pelo motor. Portanto, esse método permite calcular a taxa de consumo de combustível. A cada período de troca de velocidade ou troca da ordem de marcha serão anotados os valores presentes de massa apresentado pela balança.

Antes de dar início ao experimento, foi realizado o Teste de Estanqueidade no equipamento. Este teste tem como objetivo identificar possíveis vazamentos em tubulações, dutos e acessórios. A realização deste procedimento é fundamental para garantir que não haja contaminação do gás que será analisado durante o experimento.

A coleta de dados foi realizada por meio da medição gráfica dos gases de escape, o que permite acompanhar a evolução dos valores de CO, CO<sub>2</sub>, O<sub>2</sub>, NO<sub>x</sub> e HC na interface do software (conforme ilustrado na Figura 13). Ao término do teste, são gerados valores médios das emissões durante o período de teste.

Figura 13 – *Software* Modal 2010 | Fonte: (NAPRO, 2003)

### 3.9 Métodos de Análise

Para realizar a análise dos dados coletados, torna-se necessário compreensão das operações envolvidas e das grandezas físicas relevantes ao processo. O propósito central é avaliar o desempenho quanto ciclo transiente estabelecido para motores de combustão interna veiculares, medindo os poluentes após a diluição completa dos gases de exaustão. As concentrações de NOx e HC devem ser determinadas durante o ciclo, integrando o sinal proveniente do analisador.

O consumo específico, nesse contexto, representa uma métrica que mensura a eficiência do motor, indicando a quantidade de combustível consumido por unidade de potência produzida. Já o rendimento, por sua vez, configura-se como uma medida abrangente da eficiência global do motor, sendo calculado como a relação entre a energia útil gerada pelo motor e a energia total fornecida a ele na forma de combustível.

#### 3.9.1 Rotação real

Para o processo de obtenção de dados referente às emissões, determinar a rotação do motor é necessário para o levantamento da curva de torque e também correlacionar rotação, torque e tempo. De acordo com a norma, a rotação real pode ser dada por:

$$n_{real} = \frac{\%n \times (n_{ref} - n_{\varepsilon})}{100} + n_{\varepsilon} \quad (3.2)$$

onde:

$\%n$  é a rotação normalizada do motor, tabela de acordo com a NBR 15634 seção 8.12, expressa em porcentagem (%).

$n_{ref} \rightarrow$  é a rotação de referencia que pode ser calculada utilizando a equação abaixo:

$$n_{ref} = n_{|o} + 95\% \times (n_{hi} - n_{|o})$$

$n_{hi} - n_{|o} \rightarrow$  são encontrados na Seção 6.1 da NBR 15634.



### 3.9.2 Torque real

O torque correspondente a cada rotação real pode ser obtido por meio da tabela 8.12 presente na norma. Esse valor de torque resultante é utilizado para converter os valores reais durante o ciclo de ensaio. O Torque real pode ser descrito pela seguinte equação:

$$Torque_{real} = \frac{\%torque \times torque_{max}}{100} \quad (3.3)$$

onde: % torque é expresso pela NBR 15634 seção 8.12, em porcentagem (%)  
 $torque_{max}$  é o torque obtido através da curva de torque por rotação.

### 3.9.3 Consumo Específico

O consumo específico de combustível ( $C_e$ ) pode ser descrito pela quantidade de massa de combustível consome quando há a aplicação da potência efetiva, portanto a relação para se achar o consumo específico pode ser dada por:

$$C_e = \frac{\dot{m}_c}{(P_e)} \quad (3.4)$$

### 3.9.4 Rendimento

O rendimento de um motor de combustão interna é uma medida de sua eficiência e é definido como a razão entre a energia útil produzida e a energia total fornecida pelo combustível. Este rendimento é influenciado por fatores, como o tipo de combustível utilizado, a taxa de compressão, a eficiência volumétrica, a eficiência mecânica e as perdas térmicas.

O rendimento térmico pode ser expresso pela razão entre a Potência Indicada ( $P_i$ ) pelo produto da massa de combustível  $\dot{m}_c$  com o poder calorífico do combustível (PCI), conforme apresenta a Equação 3.5.

$$\eta_i = \frac{(P_i)}{\dot{m}_c PCI} \quad (3.5)$$

O rendimento mecânico Inclui as perdas devido ao atrito no motor. Essas perdas podem ser quantificadas por meio de um teste específico denominado Teste de Atrito Interno. No entanto, este teste só pode ser conduzido com o uso de um dinamômetro elétrico que possibilite a operação do motor de combustão em estado desligado. Mas teoricamente, pode-se encontrar o rendimento mecânico realizando a razão entre as potências efetivas e indicada.

$$\eta_m = \frac{(P_e)}{(P_i)} \quad (3.6)$$

O rendimento global do motor, pode ser descrito de forma semelhante ao rendimento térmico, todavia com a alteração da potência utilizada, que para o rendimento

global, se utiliza a potência efetiva. Conforme exhibe a Equação 3.7.

$$\dot{\eta}_e = \frac{(1)}{C_e PCI} \quad (3.7)$$

Sendo que os três rendimentos podem ser relacionados como:

$$\eta_e = \eta_i \cdot \eta_m \quad (3.8)$$

No entanto, é possível realizar os cálculos teóricos para o rendimento volumétrico, realizando a relação entre a massa de ar admitida pelo motor e a massa de ar que o motor poderia suportar se a temperatura e pressão fossem mantidas. Considerando um motor 4 tempos com volume deslocado, se têm que:

$$\eta_v = \frac{\dot{m}_{ar}}{\rho_{ar} V_d^{\frac{n+1}{60.2}}} \quad (3.9)$$

## 4 Resultados

A combustão de diesel e biodiesel gera emissões de gases e material particulado que podem afetar a qualidade do ar e a saúde humana. Neste capítulo, serão analisadas as emissões de oxigênio, monóxido de carbono, óxidos de nitrogênio, dióxido de enxofre e material particulado resultantes da queima de diesel com biodiesel em diferentes proporções (7%, 15% e 20%) em dois caminhões com normas de emissão distintas: o Mercedes Accelo, que atende à legislação P7 (equivalente à Euro 5), e o Ford Cargo, que atende à legislação P5 (equivalente à Euro 3).

Conforme estabelecido pelos procedimentos da norma ABNT NBR 15634, que foram detalhados na seção precedente, realizaram-se testes comparativos nos ciclos de condução ETC e ESC com os dois caminhões. Estes veículos possuíam tecnologias distintas, quanto ao sistema de pós tratamento, porém compartilhavam a mesma categoria de motores. Em termos gerais, a análise do comportamento das emissões foi restrita às médias dos resultados obtidos diretamente das leituras do analisador de gases com adequação à norma.

### 4.1 Tratamento dos Dados

Os resultados fornecidos pelo Analisador de Gases da NAPRO são expressos em partes por milhão (ppm), em termos de volume. Esses resultados necessitam ser interpretados conforme a norma NBR 15634, que estabelece a apresentação dos dados em função da massa. A Tabela 5 apresenta os valores medidos pelo dispositivo, correspondendo às médias das emissões registradas para cada veículo testado durante o ciclo ETC. Este ciclo é definido pela variação de velocidades e sequência de marchas, visando replicar as condições de tráfego urbano e rodoviário.

Dados médios analisador de gases NAPRO (ETC)				
Ford Cargo				
	CO (% <sub>vv</sub> )	HC (% <sub>vv</sub> )	NOx (ppm <sub>vv</sub> )	CO2 (% <sub>vv</sub> )
B7	0,011906283	5,685303514	221,6810437	2,9657082
B15	0,011554713	3,92524377	225,8873239	3,014626219
B20	0,011723027	4,500805153	241,7874396	3,095330113
Mercedes-Benz Accelo				
	CO (% <sub>vv</sub> )	HC (% <sub>vv</sub> )	NOx (ppm <sub>vv</sub> )	CO2 (% <sub>vv</sub> )
B7	0,014206783	2,971553611	201,6039387	2,532439825
B15	0,018817262	5,664890783	196,5444859	2,518913159
B20	0,019205508	5,423728814	221,2944915	2,683734617

Tabela 5 – Dados médios de poluentes - Ciclo ETC

A Tabela 6 exibe os valores médios obtidos pelo analisador no Ciclo ESC. Este ciclo é realizado sob condições de carga do motor elevadas, análogas às empregadas em testes de desempenho.

Dados médios analisador de gases NAPRO (ESC)				
Ford Cargo				
	CO (% <sub>vv</sub> )	HC (% <sub>vv</sub> )	NOx (ppm <sub>vv</sub> )	CO2 (% <sub>vv</sub> )
B7	0,817630058	2,797687861	520,8208092	6,767630058
B15	0,795244755	1,314685315	551,1608392	7,585314685
B20	0,909009901	0,792079208	592,6633663	9,646534653
Mercedes-Benz Accelo				
	CO (% <sub>vv</sub> )	HC (% <sub>vv</sub> )	NOx (ppm <sub>vv</sub> )	CO2 (% <sub>vv</sub> )
B7	0,011865285	1,580310881	213,1735751	2,002072539
B15	0,013585952	0,467652495	151,284658	1,244731978
B20	0,048486239	2,506880734	199,3027523	1,873165138

Tabela 6 – Dados médios de emissões - Ciclo ESC

Uma vez obtidos os dados médios expressos em volume por volume, é necessário converter esses dados para que representem emissões específicas. Essa conversão requer a consideração das densidades de cada poluente, conforme estipulado pela norma vigente. Tal conversão pode ser descrita matematicamente por:

$$GAS_x = \frac{\sum_{i=1}^{i=n} (m_{GASi} \times W_{Fi})}{\sum_{i=1}^{i=n} (P(n)_i \times W_{Fi})} \quad (4.1)$$

onde:

$m_{gas} \rightarrow$  é a massa de cada um dos gases;

$P(n) \rightarrow$  é a potência útil determinada conforme a Tabela 5 da NBR 15634;

$W_{Fi} \rightarrow$  é o fator de ponderação.

A Tabela 7 fornece os valores de densidade que devem ser aplicados a cada componente analisado.

Combustível	Gás de exaustão	NOx	CO	HC	CO2
Diesel	Bruto	0,001587	0,000966	0,000479	0,001518
	Diluído	0,001588	0,000967	0,00048	0,001519

Tabela 7 – Valores de densidade dos componentes de emissões - NBR 15634

## 4.2 Resultados Emissões Ciclo ETC

Os dados apresentados resultam da compilação de 1800 ciclos transientes de 1 segundo cada, realizados para avaliar cada modelo de caminhão em estudo. Os parâmetros limitantes seguem o estabelecidos à fase P5 (Ford Cargo), e à fase P7 (Mercedes-Benz Accelo). A Tabela 8 apresenta os valores máximos dos poluentes para o ensaio ETC.

Poluentes	Limites	
	Fase $P - 5^1$	Fase $P - 7$
	Desde 1º/1/2004	Desde 1º/1/2012
Monóxido de carbono (CO em $g/kWh$ )	5,45	4
Hidrocarbonetos (THC em $g/kWh$ )	0,78	0,55
Óxidos de nitrogênio (NOx em $g/kWh$ )	5	2

Tabela 8 – Limites de Poluentes para ensaios ETC | Fonte: (MACEDO et al., 2011)

1. Permaneceu em vigor nos anos de 2009, 2010 e 2011 por força do Termo de Ajustamento de Conduta homologado pelo Juízo Federal no estado de São Paulo.

Para a análise em ciclo transiente de emissões de CO, se utilizou o gráfico apresentado na Figura 14.

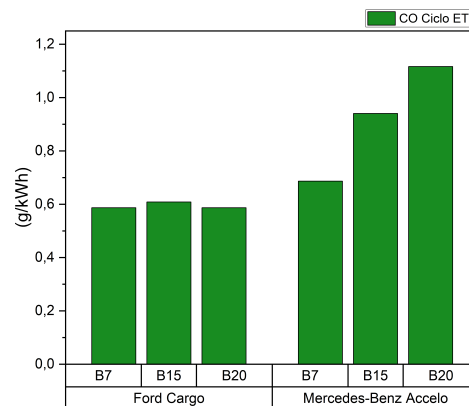


Figura 14 – Comparativo CO - Ciclo ETC | Fonte: autoral

Após análise, constatou-se que os dois veículos examinados estão em conformidade com os padrões estabelecidos para emissões de Monóxido de Carbono (CO) e Hidrocarbonetos (HC). Contudo, observa-se que, para ambos os caminhões, os níveis de CO medidos estão significativamente abaixo dos valores máximos permitidos. Quanto aos níveis de HC, podem ser considerados meramente residuais no fluxo dos gases expelidos pelo escapamento.

Outro poluente analisado, foi o Óxido de Nitrogênio (NOx) e foi realizado o comparativo do consumo específico com diferentes misturas de biodiesel, a fim de verificar a variação no consumo. Os gráficos 15a e 15b apresentam as diferenças encontradas com a alteração do teor de biodiesel.

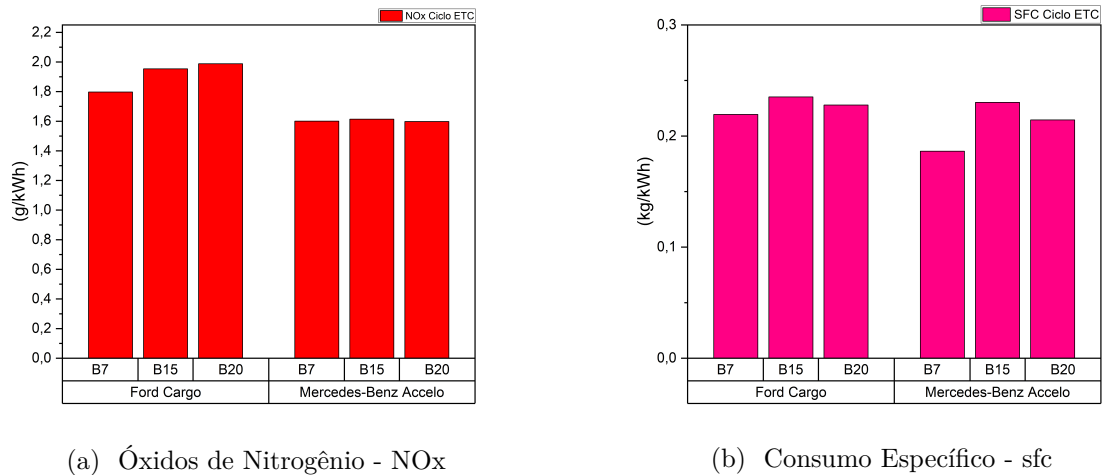


Figura 15 – Óxidos de nitrogênio e Consumo específico - Ciclo ETC | Fonte: autoral

Na análise dos dados de emissão de NOx para os dois modelos de caminhões, constatou-se que ambos estão em conformidade com as normativas vigentes para emissões. Observou-se uma variação de 9,59% no aumento das emissões de NOx para o modelo Ford Cargo com o incremento do teor de biodiesel. Por outro lado, para o modelo Mercedes-Benz Accelo, não se detectou uma variação significativa nas emissões. Em relação ao consumo específico de combustível, identificou-se que o cenário menos favorável para o veículo mais antigo, o P5, ocorreu com a utilização de B15, situação que se repetiu para o veículo mais recente. Especificamente, o Ford Cargo registrou uma variação de 6,7% no consumo entre o uso de B7 e B15, enquanto o Accelo apresentou uma variação de 19% para o mesmo comparativo.

### 4.3 Resultados Emissões Ciclo ESC

O teste do ciclo ESC é projetado para impor uma série de cargas ao motor, com o objetivo de extrair a máxima potência possível. Durante este procedimento, o veículo é submetido a diversos níveis de carga, que são posteriormente utilizados para quantificar as emissões geradas. Abaixo, a Tabela 9 apresenta os limites de poluentes para ensaios ESC.

Poluentes	Limites	
	Fase P – 5 <sup>1</sup>	Fase P-7
	Desde 1º/1/2004	Desde 1º/1/2012
Monóxido de carbono (CO em g/kWh)	2,1	1,5
Hidrocarbonetos (THC em g/kWh)	0,66	0,46
Óxidos de nitrogênio (NOx em g/kWh)	5	2

Tabela 9 – Limites de Poluentes para ensaios ESC | Fonte: (MACEDO et al., 2011)

1. Permaneceu em vigor nos anos de 2009, 2010 e 2011 por força do Termo de Ajustamento de Conduta homologado pelo Juízo Federal no estado de São Paulo.

Durante o ciclo de condução ESC, o motor do veículo é submetido a uma carga elevada. Esta condição permite uma observação nítida da resposta do motor, particularmente em relação às emissões atmosféricas, quando ocorre uma mudança no tipo de combustível de B7 para B20. O gráfico apresentado pela Figura 16 apresenta os níveis de emissões de CO dos caminhões ensaiados. Em relação aos níveis de emissões de HC, de forma semelhante ao Ciclo ETC, no ensaio estacionário, foram verificados traços, que podem ser considerados emissões residuais.

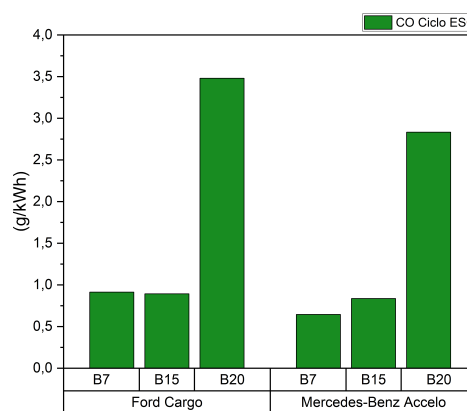
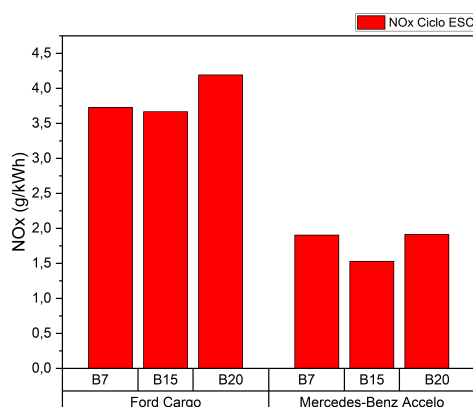
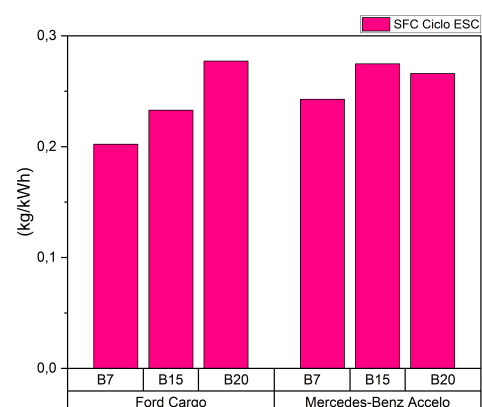


Figura 16 – Comparativo CO - Ciclo ESC | Fonte: autoral

Em relação ao NOx (óxido de Nitrogênio) e consumo específico dos veículos ensaiados, os resultados podem ser verificados de acordo com o gráfico 17a e 17b.



(a) Óxidos de Nitrogênio - NOx



(b) Consumo Específico

Figura 17 – Óxidos de nitrogênio e Consumo específico - Ciclo ESC | Fonte: autoral

Os veículos em questão estão em conformidade com as normativas vigentes, apresentando índices de emissões inferiores aos limites máximos permitidos para suas categorias. Observou-se que o sistema de pós-tratamento do Mercedes-Benz Accelo contribuiu significativamente para a diminuição das emissões. Este veículo está equipado com tecnologias de DPF (Filtro de Partículas Diesel), EGR (Recirculação de Gases de Escape) e SCR (Redução Catalítica Seletiva), que, em conjunto com a injeção de uma solução composta por 32,5% de arla e água desmineralizada, resultou na redução dos níveis de poluentes emitidos.

### 4.3.1 Comparação de Desempenho

A avaliação do desempenho dos veículos submetidos a testes com distintas concentrações de biodiesel revela uma relação direta com os níveis de emissões poluentes. Essa análise evidencia aspectos relevantes acerca da utilização de biodiesel em proporções elevadas.

O processo inicia-se com o motor em marcha lenta baixa, evoluindo por uma sequência de etapas que variam as porcentagens de carga e as velocidades do motor. Estas últimas podem ser definidas de acordo com a NBR 15634 como rotações A, B e C.

Do seguinte modo:

$$\text{Rotação } A = \eta_{lo} + 25\%(\eta_{hi} - \eta_{lo})$$

$$\text{Rotação } B = \eta_{lo} + 50\%(\eta_{hi} - \eta_{lo})$$

$$\text{Rotação } C = \eta_{lo} + 75\%(\eta_{hi} - \eta_{lo})$$

Os gráficos 18a e 18b ilustram a performance do Ford Cargo e do Mercedes-Benz Accelo sob a influência das variações de biodiesel. Vale ressaltar que o modelo Cargo atende à normativa Proconve P5 em termos de emissões, enquanto o Accelo segue a norma Proconve P7. Nota-se, ademais, que há um intervalo de onze anos entre as datas de fabricação dos dois modelos de veículos.



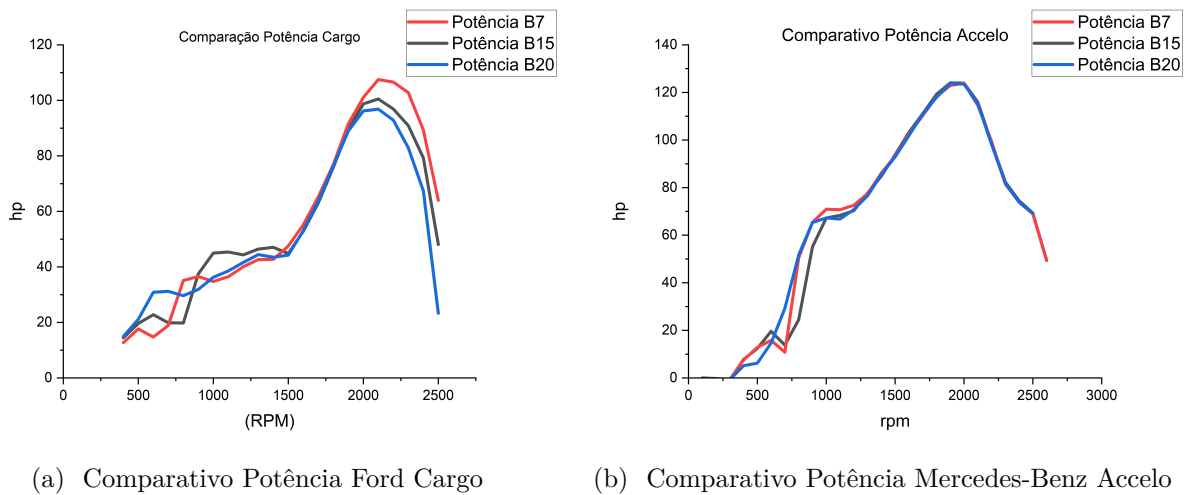


Figura 18 – Comparativos de Potência | Fonte: autoral

Pôde-se notar que o veículo mais antigo (Cargo), apresentou maior sensibilidade às trocas de concentrações ensaiadas, possuindo diferença aproximada de 10% entre os melhores resultados obtidos. Com o B7 alcançou 107,5 hp a 2100 rpm já com o B20, a potência ficou na casa dos 96,8 hp na mesma faixa de rotação. Já para o Accelo, não foi verificado alteração significativa de potência em regime máximo de operação.

Em relação ao torque, o comparativo é apresentado pelos gráficos 19a e 19b.

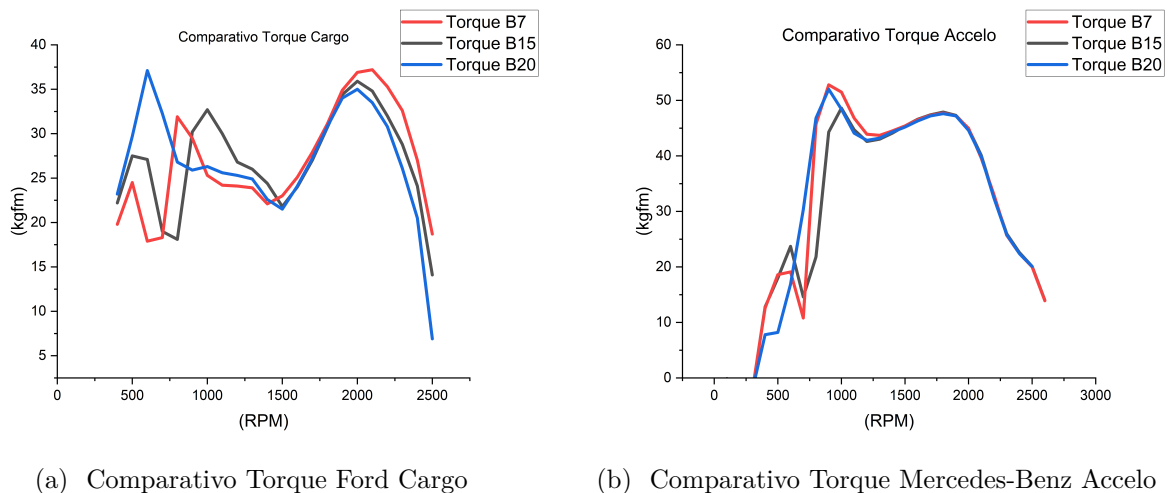


Figura 19 – Comparativos de Torque | Fonte: autoral

É notável que o cenário se repetiu, com o Cargo apresentando maior variação entre os resultados com a variação da concentração de biodiesel, esta variação corresponde a aproximadamente 5% entre o B7 e B20 a 2000 rpm, todavia nota-se que com o B7 houve maior elasticidade do motor, conseguindo manter o torque mais elevado, sendo 6% maior do que o torque quando ensaiado com B20 e 3,5% maior do que o B15 quando analisado no ponto de maior torque obtido.

Por outro lado, o Accelo apresentou variações em relação ao B7, quando abastecido com este nível de concentração, teve como pico de torque máximo 51,5 kgfm a 1000rpm, o que representa uma diferença de 6% quando comparado com o B20 na mesma rotação. No entanto, os picos de torque apresentam esta irregularidade e descontinuidade, devido a troca de marcha durante o ensaio, tendo seu torque estabilizado próximo dos 1500 rpm, e como foi possível verificar, não houve variação de torque até o final do ensaio, o que deixa nítido que a tecnologia empregada no Mercedes-Benz Accelo no seu sistema de injeção, conseguiu compensar tais diferenças de concentração de biodiesel.

#### 4.4 Emissões de CO<sub>2</sub> Ciclo ESC e ETC

No que se refere ao ciclo de condução ETC (20), os níveis de CO<sub>2</sub> se mostraram constantes. Tal estabilidade é atribuída às características do ciclo, que envolve o monitoramento em 1800 pontos distintos, alinhados ao período do ciclo, operando sob carga reduzida e em regime de marcha lenta. A variação entre os picos de emissão do Cargo e do Accelo foi de 20%.

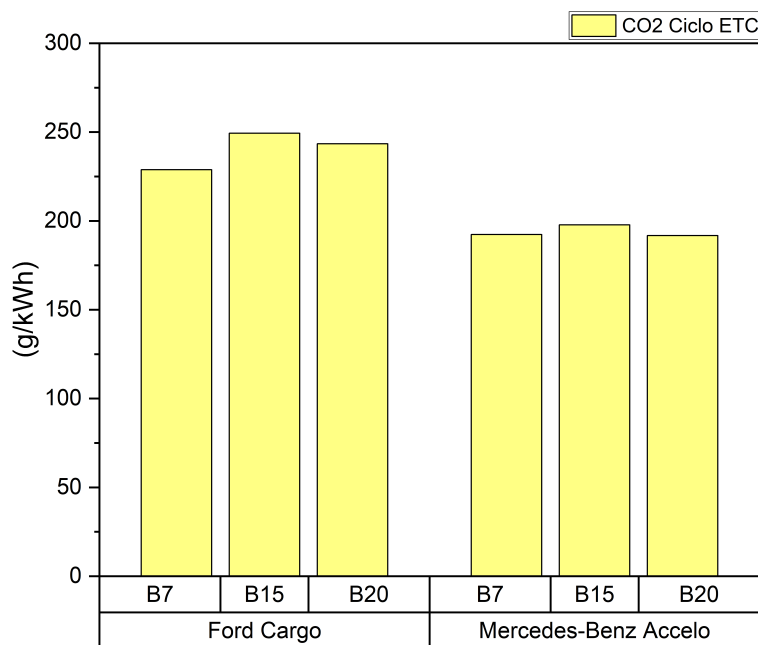


Figura 20 – Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub> - Ciclo ETC | Fonte: autoral

Os dados coletados indicam que os níveis médios de Dióxido de Carbono (CO<sub>2</sub>), obtidos durante o ensaio, revelam uma correlação direta entre o incremento médio desse poluente e a concentração de biodiesel. Já com o ciclo de condução ESC, este conforme elucidado em seções anteriores, é composto caracterizado por operações em carga máxima do motor e devido a isto, a diferença de um veículo que possui um sistema de pós

tratamento a mais que o outro, no caso o Accelo possui além de EGR e DPF, este está equipado também com SCR, além das diferenças de homologação entre o veículo mais novo (P7) e o mais antigo (P5). A Figura 21 apresenta os níveis médios de CO<sub>2</sub> durante o ensaio.

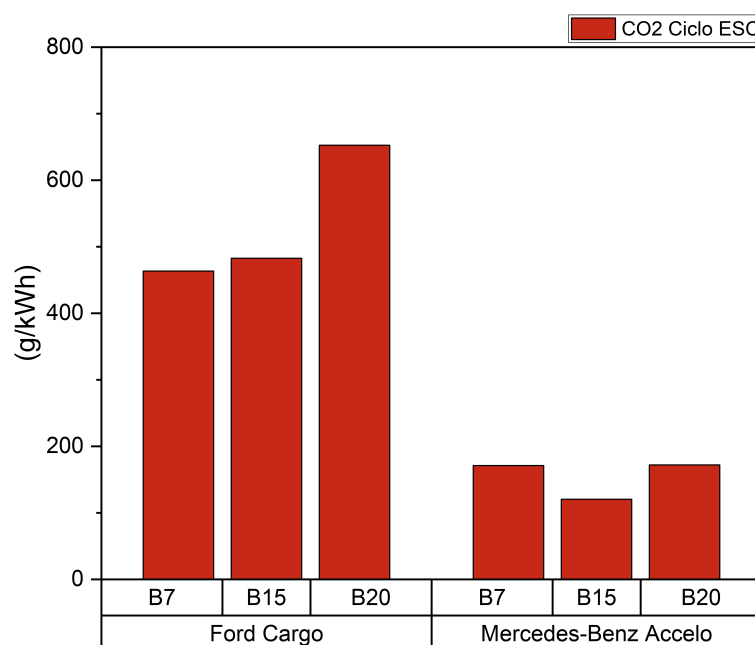


Figura 21 – Dióxido de Carbono - CO<sub>2</sub> - Ciclo ESC | Fonte: autoral

Ao analisar o gráfico 18a e comparar com o gráfico 21, observa-se que há um aumento gradual nos níveis de emissão específica de CO<sub>2</sub> à medida que a potência diminui. Especificamente, quando o Ford Cargo foi abastecido com B20, atingiu uma potência máxima de 96,8 hp e níveis médios de emissões de 652,5g/kWh. No entanto, quando abastecido com B7, a potência máxima alcançada foi de 107,5 hp, com uma emissão específica de 463,3g/kWh. Essa variação representa uma diferença aproximada de 29%.

## 5 Conclusão

Portanto, após a realização dos ensaios, foi possível verificar os níveis médios de emissões e o desempenho com diferentes concentrações de biodiesel. O experimento foi fundamentado na NBR 15634, englobando dois tipos de ciclos, sendo o ETC e o ESC.

### 5.1 Ciclo ETC

Em relação ao primeiro ciclo, este buscou caracterizar de forma fidedigna a operação de um veículo pesado sob condições reais, contando com velocidades reduzidas, período em marcha lenta e velocidades médias, com distância percorrida próxima de 23 quilômetros. Tal característica do ciclo apontou que em ambos veículos ensaiados, quanto maior a concentração de biodiesel, os níveis de emissões se elevam de forma gradual.

Quanto aos níveis de Monóxido de Carbono do Ford Cargo, foi possível verificar estabilidade dos níveis de emissões com a variação da concentração, algo que não foi presenciado com o veículo Mercedes-Benz Accelo, este por sua vez, teve comportamento mais sensível, variando os níveis de emissões de acordo com a alteração da concentração de biodiesel, a diferença de emissão média de CO do B7 com o B20 se aproxima de 39%.

Em relação aos Hidrocarbonetos Totais (HC), durante os ensaios foram observados traços em cada tipo de concentração ensaiada, todavia com valores bem abaixo dos exigidos pela norma, de tal forma que o veículo Accelo quando ensaiado com B20, apresentou 0,057  $g/kWh$ , o que representa 10,3% do máximo estipulado pela norma para veículos homologados com legislação P7.

Em relação ao NOx (Óxidos de Nitrogênio), notou-se diferença entre os veículos ensaiados, diferença esta que esta diretamente relacionada ao sistema de pós-tratamento empregado nos veículos, o veículo mais novo Mercedes-Benz Accelo, dispõe de sistema de injeção de Arla 32,5% no sistema de escapamento, esta técnica faz com que a ureia contida na arla, quando em contato com o escapamento em alta temperatura, se transforme em amônia e por sua vez a amônia se liga com o NOx, transformando em nitrogênio e vapor de água, tal diferença foi evidenciada pelos resultados obtidos durante os ensaios, comparando cada cenário, se obtém diferença de 10,9% para o B7, 17,4% para o B15 e 19,6% para o B20, diferenças estas que ilustram a diferença de veículo equipado com um sistema de pós tratamento a mais.

## 5.2 Ciclo ESC

O cenário do ciclo ESC é caracterizado pela aplicação de carga total do motor, análogo a situação de utilização do veículo com o peso máximo de operação e sobre um terreno inclinado, extraindo o máximo desempenho de cada veículo. Neste ensaio, foi capaz verificar alteração nos níveis de emissões e desempenho.

Durante os ensaios, observou-se que os veículos abastecidos com B7 e B15 apresentaram certa estabilidade nos níveis de monóxido de carbono (CO), estando em conformidade com as normas de homologação específicas para cada um. Esses níveis não ultrapassaram o limite de 2,1  $g/kWh$  para o veículo P5 (Cargo) e 1,5  $g/kWh$  para o veículo P7 (Accelo). No entanto, em relação ao B20, constatou-se que o Ford Cargo excedeu em 65% o limite de emissão estabelecido pela legislação, enquanto o Mercedes-Benz Accelo apresentou um excedente de 88%. A causa dessa discrepância significativa não foi determinada, indicando a necessidade de investigações adicionais para compreender as razões subjacentes a esses resultados.

Em relação aos hidrocarbonetos (HC), no caso do veículo mais antigo (Cargo), foram detectados traços do poluente. No entanto, esses valores apresentaram uma relação inversamente proporcional ao aumento das concentrações de biodiesel. O menor valor de emissão específica desse poluente foi observado com a concentração mais alta de biodiesel, ou seja, B20. Já para o veículo Accelo, o menor índice de emissão específica do mesmo poluente ocorreu com a concentração de B15, o que pode evidenciar a utilização de um sistema de pós tratamento de poluente a mais, no caso, o SCR, mesmo sabendo que sua maior eficiência se dá contra os óxidos de nitrogênio (NOx).

No que diz respeito aos óxidos de nitrogênio (NOx) no veículo antigo, as emissões médias foram superiores às do veículo mais novo, como era esperado. Essa diferença pode ser justificada pelo sistema de pós-tratamento adicional presente no veículo mais novo, conforme mencionado anteriormente. No ensaio com B15 no Accelo, as emissões permaneceram abaixo das do B7 devido à adição de Arla no sistema de escapamento. Já o B20 manteve-se estável, apresentando o mesmo nível de emissão específica do B7, também graças à adição de Arla no sistema. Caso esse componente não fosse adicionado, as emissões para o B20 seriam maiores do que as observadas experimentalmente.

Ao analisar o desempenho e o consumo específico do Ford Cargo em relação à concentração de biodiesel, observou-se o seguinte: com a menor concentração (B7), os indicadores de torque e potência são maiores, enquanto o consumo específico é menor. Por outro lado, com o B20, o cenário é desfavorável, com valores baixos de torque e potência e um aumento de 27% no consumo específico. No caso do Accelo, as alterações de torque e potência não foram significativas, mas houve um aumento de 11,6% no consumo específico entre o B7 e o B15.

Pode-se inferir que, quando há aumento nas concentrações de biodiesel em veículos antigos, como o Ford Cargo, ocorre um aumento no consumo específico, o que significa menor potência e torque disponíveis. No entanto, para o Mercedes-Benz Accelo, não foi observada uma alteração significativa no torque e na potência, embora o consumo específico tenha aumentado. Essa diferença entre os veículos pode ser explicada pela tecnologia aplicada nos motores de cada um. O sistema de injeção do Accelo parece ser mais adaptável a variações, como a concentração de biodiesel, enquanto o Cargo, devido à sua idade, pode ter um sistema de injeção mais limitado, tornando-o mais sensível às mudanças no combustível utilizado.

### 5.3 Impacto na Frota Brasileira

O Relatório da Frota Circulante de 2023, referenciado pelo Sindicato Nacional dos Fabricantes de Componentes para Veículos Automotores ([SINDIPEÇAS, 2023](#)), indica que a idade média dos caminhões e ônibus em operação no Brasil é, respectivamente, de 11 anos e 11 meses e de 11 anos e 3 meses. A análise deste estudo sugere que veículos mais antigos podem ser mais afetados por variações na composição do biodiesel. Isso é evidenciado pelo fato de que o Ford Cargo, o veículo mais velho testado no estudo, tem 14 anos de uso.

A Figura 25 ilustra a distribuição percentual de veículos movidos a diesel em cada estado brasileiro de acordo com o Ministério dos Transportes. Essa representação pode sugerir qual estado pode ser mais impactado pelo aumento na mistura de biodiesel no combustível diesel, considerando que estados com uma frota maior de veículos tendem a ter uma proporção mais elevada de veículos de modelos mais antigos.

### 5.4 Trabalhos Futuros

A aprovação do Projeto de Lei 528/2020 pela Câmara dos Deputados brasileira, que propõe elevar o percentual de biodiesel adicionado ao diesel para até 25%, e a meta de alcançar uma concentração de 20% até 2030, suscita a necessidade de avaliar os impactos dessa medida. Se faz necessário analisar as consequências nos veículos, especialmente no quesito de manutenção, considerando que fabricantes como a Mercedes-Benz orientam, em seus manuais de manutenção, que o aumento do biodiesel requer a redução pela metade dos intervalos de manutenção. Essa exigência pode implicar mudanças significativas na operação do sistema de transporte de cargas do país, um setor vital para a economia nacional.

## Referências

- ANDRE, M. et al. Driving cycles for emission measurements under european conditions. *SAE Transactions*, SAE International, v. 104, p. 562–574, 1995. ISSN 0096736X, 25771531. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/44615107>>. Citado na página 26.
- BAI, S. et al. Experimental investigation of exhaust thermal management on nox emissions of heavy-duty diesel engine under the world harmonized transient cycle (whtc). *Applied Thermal Engineering*, Elsevier Ltd, v. 142, p. 421–432, 9 2018. ISSN 13594311. Citado na página 22.
- CALVIN, K. et al. *IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland.* [s.n.], 2023. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/>>. Citado na página 16.
- CARVALHO, C. H. R. de. *2198 DESAFIOS DA MOBILIDADE URBANA NO BRASIL*. [S.l.]: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada, 2016. Citado na página 15.
- DYNAMITE. *DYNOMite Automotive Engine Dynamometer Systems*. <http://www.land-and-sea.com/>, 2014. Citado 3 vezes nas páginas 8, 33 e 34.
- EMITECO. *O QUE É ARLA 32?* 2023. Disponível em: <<https://www.emiteco.com.br/sistema-arla>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 24.
- FERRARI, R. A. et al. *BIODIESEL DE SOJA-TAXA DE CONVERSÃO EM ÉSTERES ETÍLICOS, CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA E CONSUMO EM GERADOR DE ENERGIA*. 2005. 19-23 p. Disponível em: <[www.springerlink.com/content/1738-494x](http://www.springerlink.com/content/1738-494x)>. Citado na página 18.
- FORD. *Manual do Implementador Ford Cargo & Fseries*. 5/2010. ed. [S.l.], 2010. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 36.
- HEYWOOD, J. B. *Internal Combustion Engine Fundamentals*. 2nd edition. ed. New York: McGraw-Hill Education, 2018. ISBN 9781260116106. Disponível em: <<https://www.accessengineeringlibrary.com/content/book/9781260116106>>. Citado 3 vezes nas páginas 28, 29 e 31.
- LÁZARO, M. J. et al. Catalysis : principles, types and applications. 2011. Disponível em: <[https://www.researchgate.net/publication/269632291\\_Catalytic\\_Technologies\\_for\\_Diesel\\_Engines\\_Exhausts\\_Gas\\_Cleaning](https://www.researchgate.net/publication/269632291_Catalytic_Technologies_for_Diesel_Engines_Exhausts_Gas_Cleaning)>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 25.
- MACEDO, P. C. de et al. *Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores*. [S.l.], 2011. Disponível em: <<http://www.ibama.gov.br>>. Citado 4 vezes nas páginas 9, 18, 44 e 45.
- MERCEDES-BENZ. *Accelo 815*. 2020. Disponível em: <<https://www.mercedes-benz.com.br/resources/files/documentos/caminhoes/accelo/dados-tecnicos/accelo-815-4x2-plataforma.pdf>>. Citado 2 vezes nas páginas 9 e 36.

- MOURA, C. *Válvula EGR. Sabe para que serve e porque avaria?* 2023. Disponível em: <<https://www.turbo.pt/valvula-egr-para-que-serve/>>. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 23.
- MYUNG, C.-L. et al. Specific engine performance and gaseous emissions characteristics of european test cycle and worldwide harmonized driving cycle for a heavy-duty diesel engine. *Journal of Mechanical Science and Technology*, v. 27, p. 3893–3902, 12 2013. ISSN 1738-494X. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s12206-013-0934-9>>. Citado na página 26.
- NAPRO. *Manual de Operação NAPRO MODAL 2010-AO*. 1.01c. ed. [S.l.], 2003. Citado 2 vezes nas páginas 8 e 39.
- NAPRO. *Manual de Operação NAPRO PC-MULTIGÁS*. 11. ed. [S.l.], 2013. Citado 4 vezes nas páginas 8, 9, 35 e 36.
- NESAMANI, K. S.; SUBRAMANIAN, K. P. Development of a driving cycle for intra-city buses in chennai, india. *Atmospheric Environment*, v. 45, p. 5469–5476, 10 2011. ISSN 13522310. Citado na página 19.
- PEREIRA, R. H. M. et al. Tendências e desigualdades da mobilidade urbana no Brasil I : o uso do transporte coletivo e individual. *Texto para Discussão IPEA*, Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea), v. 2673, 2021. ISSN 1415-4765. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/10713>>. Citado na página 16.
- PRIX, T. *Manual do Usuário 9094*. 2023. Disponível em: <[https://www.toledobrasil.com/blob/manuals/235\\_pt\\_manual\\_1698859699.pdf](https://www.toledobrasil.com/blob/manuals/235_pt_manual_1698859699.pdf)>. Citado na página 33.
- QUIRAMA, L. F. et al. Driving cycles that reproduce driving patterns, energy consumptions and tailpipe emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 82, p. 102294, 2020. ISSN 1361-9209. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920919312507>>. Citado na página 26.
- SINDIPEÇAS, S. N. da Indústria de Componentes para V. A. Relatório da frota circulante. mar 2023. Disponível em: <[https://static.poder360.com.br/2023/05/RelatorioFrotaCirculante\\_2023.pdf](https://static.poder360.com.br/2023/05/RelatorioFrotaCirculante_2023.pdf)>. Citado na página 53.
- TILLMANN, C. A. da C. *Motores de Combustão Interna e seus Sistemas*. eTec Brasil, 2013. ISBN 978-85-63573-28-5. Disponível em: <[https://conaenge.com.br/wp-content/uploads/2018/05/motores\\_combustao\\_interna\\_e\\_seus\\_sistemas-2013.pdf](https://conaenge.com.br/wp-content/uploads/2018/05/motores_combustao_interna_e_seus_sistemas-2013.pdf)>. Citado na página 21.
- VAGO, C. L. Análise dos parâmetros de desempenho de um motor diesel convertido para operação com gás natural através de simulação termodinâmica. 6 2022. Disponível em: <[https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufjf-pem\\_upl/THESIS/10003407/pemufjf2022msccarolinalocatellivago\\_2022083010423982.pdf](https://w1files.solucaoatrio.net.br/atrio/ufjf-pem_upl/THESIS/10003407/pemufjf2022msccarolinalocatellivago_2022083010423982.pdf)>. Citado na página 29.



## Apêndices

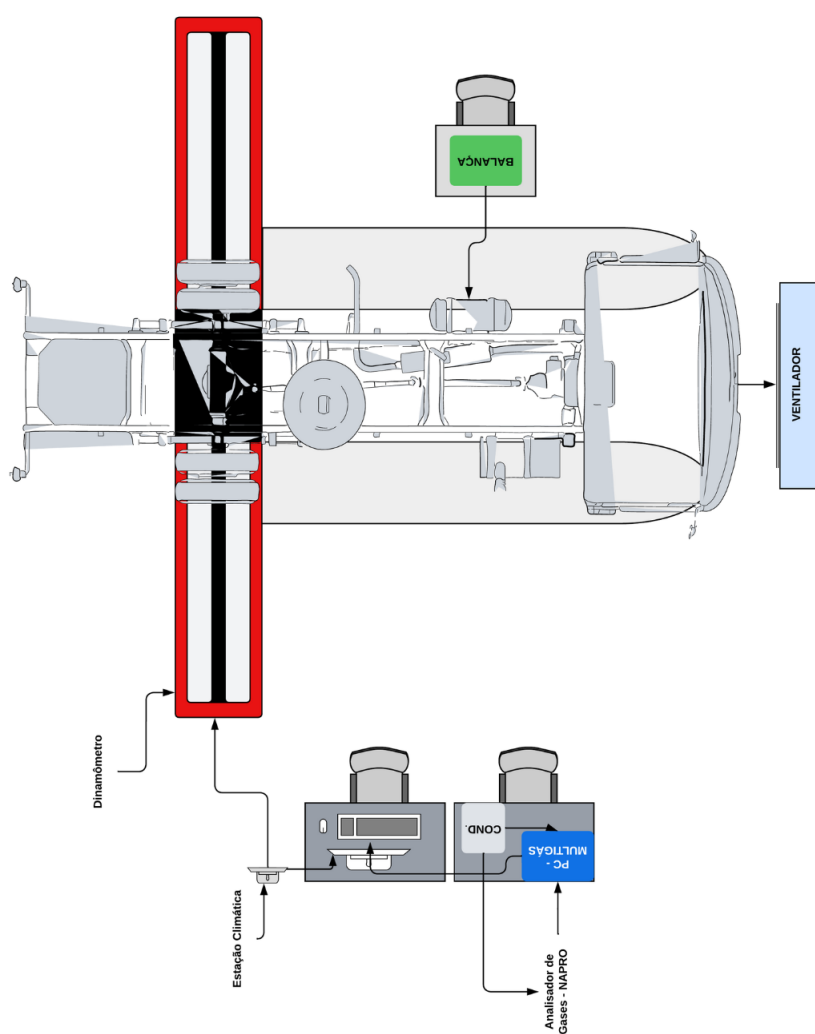


Figura 22 – Configuração do Experimento



Figura 23 – Disposição dos Equipamentos

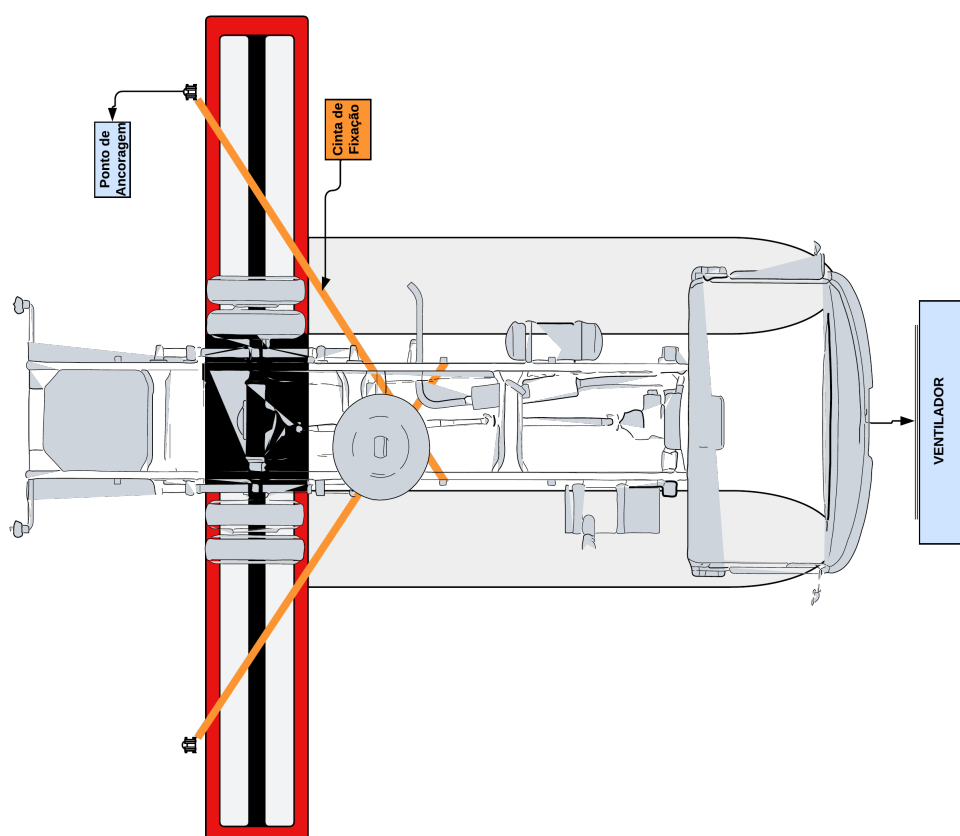


Figura 24 – Disposição das Cintas de Fixação

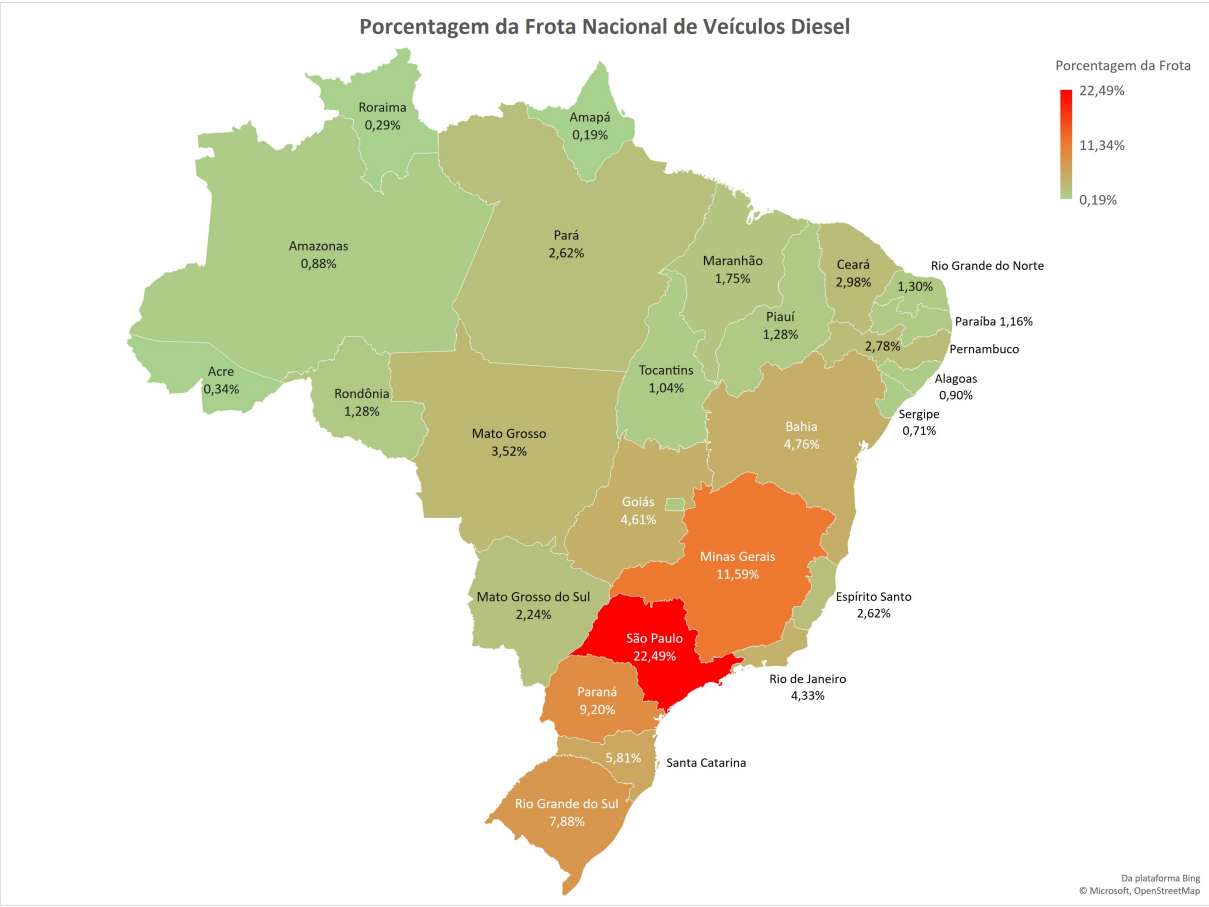


Figura 25 – Frota de veículos diesel no Brasil por UF | Fonte: Ministério dos Transportes