UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

BIANCA DE SOUZA HOFFMANN

DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO DE PASSAGEIROS: UMA ANÁLISE WELL-TO-WHEEL DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

VITÓRIA
2024

BIANCA DE SOUZA HOFFMANN

DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO DE PASSAGEIROS: UMA ANÁLISE WELL-TO-WHEEL DE DIFERENTES COMBUSTÍVEIS

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental, na área de concentração Poluição do Ar.

Orientador: Prof. Dr. Neyval Costa Reis Junior

VITÓRIA

2024

Ficha catalográfica disponibilizada pelo Sistema Integrado de Bibliotecas - SIBI/UFES e elaborada pelo autor

---

de Souza Hoffmann, Bianca, 1995-
D278d Descarbonização do Transporte Público de Passageiros : Uma Análise Well-to-Wheel de Diferentes Combustíveis / Bianca de Souza Hoffmann. - 2024.
169 f. : il.

Orientador: Neyval Costa Reis Junior.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal do Espírito Santo, Centro Tecnológico.

1. Ar - Poluição - Medição. 2. Redução de gases do efeito estufa. 3. Poluentes. 4. Transporte. 5. Transporte sustentável. 6. Transporte urbano. I. Costa Reis Junior, Neyval. II. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro Tecnológico. III. Título.

CDU: 628

UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO
CENTRO TECNOLÓGICO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL

Descarbonização do Transporte Público de Passageiros: Uma Análise Well-to-Wheel de Diferentes Combustíveis

Bianca de Souza Hoffmann

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br NEYVAL COSTA REIS JUNIOR
Data: 17/09/2024 19:31:18-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Neyval Costa Reis Jr.
Orientador - PPGEA/CT/UFES

Documento assinado digitalmente
gov.br JOAO LUIZ CALMON NOGUEIRA DA GAMA
Data: 26/09/2024 11:43:39-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. João Luiz Calmon Nogueira da Gama
Examinador Interno – PPGEA/CT/UFES

Documento assinado digitalmente
gov.br ADEMIR ABDALA PRATA JUNIOR
Data: 27/09/2024 15:06:09-0300
Verifique em https://validar.iti.gov.br

Prof. Dr. Ademir Abdala Prata Junior
Examinador Interno – PPGCL/CCAE/UFES

ELISA VALENTIM GOULART
Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental
UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO

Vitória/ES, 03 de setembro de 2024

AGRADECIMENTOS

Gostaria de começar expressando minha profunda gratidão por cada gesto de apoio e encorajamento que recebi ao longo desta jornada desafiadora. Reconheço plenamente as dificuldades que enfrentei e sou grata por ter encontrado determinação e resiliência para superá-las e concluir este trabalho.

À minha família, meu mais sincero agradecimento por estarem sempre ao meu lado, sendo meu porto seguro e fonte de apoio. Sem vocês, sem dúvida, esta conquista não seria possível.

Ao Professor Dr. Neyval Costa Reis Junior, minha gratidão pela confiança depositada em mim e por me acolher como sua aluna de mestrado.

Um agradecimento especial ao Professor Dr. Rodrigo de Alvarenga Rosa, cuja paciência, orientação, confiança e sabedoria foram pilares essenciais para o meu desenvolvimento acadêmico.

Quero expressar também minha gratidão aos membros da banca examinadora, João Luiz Calmon Nogueira da Gama e Ademir Abdala Prata Junior o e expertise para avaliar este trabalho e fornecer valiosas sugestões e críticas construtivas.

Aos meus amigos, gostaria de expressar minha gratidão por estarem ao meu lado durante esta jornada. O apoio e a força que vocês me ofereceram foram verdadeiramente indispensáveis em momentos que exigiram mais de mim.

Agradeço também à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Espírito Santo (FAPES), pela concessão da bolsa de pesquisa que tornou possível a realização deste estudo.

Por último, mas não menos importante, quero expressar minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para o desenvolvimento e conclusão desta importante etapa em minha vida acadêmica. A todos, meu mais sincero e profundo obrigada!

“A guerra do futuro será entre os que defendem a natureza e os que a destroem.”
(Jacques-Yves Cousteau)

RESUMO

O estado do Espírito Santo (ES) desenvolveu o Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE, visando a descarbonização e a neutralização das emissões até 2050. Nesse contexto, esta dissertação tem como objetivo propor um método para avaliar ambientalmente os combustíveis utilizados no transporte público de passageiros para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e de GEE. O método proposto foi aplicado ao sistema Transcol, que atende a Região Metropolitana da Grande Vitória. Foram avaliadas as emissões dos poluentes atmosféricos (CO, NO_x, SO_2, MP e $NMHC$) e de GEE (CO_2, CH_4 e N_2O), em seis diferentes cenários, considerando o tipo de combustível e a fase do Proconve dos ônibus da frota. Utilizou-se a análise *Well-to-Wheel* (WTW), que é específica para o setor de transportes, para avaliar os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos combustíveis, compreendendo as duas fases: *Well-to-Pump* (WTP) e *Pump-to-Wheel* (PTW). Foram utilizados dados reais de operação de 2022 da frota, cedidos pela Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória. Os fatores de emissão da fase WTP foram obtidos da base de dados Ecoinvent. As categorias de impacto foram analisadas utilizando o método IMPACT 2002+. Os combustíveis analisados foram: BS-500, BS-10, eletricidade e GNV. A análise dos resultados revelou que a substituição da frota por 100% de ônibus elétricos pode proporcionar reduções significativas nas emissões de todos os poluentes atmosféricos e GEE em comparação com todos os outros cenários. A substituição parcial da frota por ônibus elétricos também apresentou reduções quando comparada com todos os outros cenários, mostrando que a adoção parcial de ônibus elétricos pode ser a melhor rota para a descarbonização do sistema Transcol. O uso do GNV apresentou aumentos nas emissões de CO, NO_x e CH_4, além de requererem investimentos para adaptação da frota com instalação do kit *dual-fuel*, não se mostrando como uma rota adequada de transição. Em relação as categorias de impacto, a substituição da frota por 100% de ônibus elétricos mostrou-se como a alternativa que causa os menores impactos em todas as categorias analisadas. A utilização do GNV apresentou um aumento dos impactos na categoria de acidificação/nutrição terrestre, mostrando-se também como não adequada a uma rota de transição.

Palavras-chave: *Well-to-wheel*; Ônibus; Qualidade do Ar; Emissão; Diesel.

ABSTRACT

The state of Espírito Santo (ES) has developed its Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE, aiming for decarbonization and emission neutralization by 2050. In this context, this dissertation aims to propose a method to environmentally evaluate the fuels used in public passenger transportation to reduce atmospheric pollutant and GHG emissions. The proposed method was applied to the Transcol system, which serves the Região Metropolitana da Grande Vitória. Emissions of atmospheric pollutants (CO, NO_x, SO_2, MP e $NMHC$) and GHGs (CO_2, CH_4 and N_2O), were evaluated across six different scenarios, considering the type of fuel and the Proconve phase of the bus fleet. The *Well-to-Wheel* (WTW) analysis, which is specific to the transport sector, was used to assess the environmental impacts throughout the entire lifecycle of the fuels, covering the two phases: *Well-to-Pump* (WTP) and Pump-to-Wheel (PTW). Real operational data from 2022 of the fleet, provided by the Vitória Urban Transport Company, were used. The emission factors for the WTP phase were obtained from the Ecoinvent database. The impact categories were analyzed using the IMPACT 2002+ method. The fuels analyzed were: BS-500, BS-10, electricity, and CNG. The analysis of the results revealed that replacing the fleet with 100% electric buses can provide significant reductions in emissions of all atmospheric pollutants and GHGs compared to all other scenarios. Partial fleet replacement with electric buses also showed reductions compared to all other scenarios, indicating that partial adoption of electric buses may be the best route for the decarbonization of the Transcol system. The use of CNG showed increases in CO, NO_x, and CH_4 emissions, as well as requiring investments for fleet adaptation with the installation of dual-fuel kits, proving to be an unsuitable transition route. Regarding the impact categories, replacing the fleet with 100% electric buses was the alternative causing the lowest impacts in all analyzed categories. The use of CNG presented an increase in impacts in the acidification/terrestrial nutrition category, also proving unsuitable as a transition route.

Keywords: Well-to-wheel; Bus; Air quality; Emissions; Diesel.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Análise WTW e ACV 21
Figura 2 - Fases WTP e PTW da análise WTW 22
Figura 3 - Fases para aplicar a avaliação do ciclo de vida 23
Figura 4 - Categorias de impacto do método IMPACT 2002+ 25
Figura 5 - Destilação fracionada e produção de derivados do petróleo. 37
Figura 6 - Capacidade de produção do biodiesel, de acordo com as regiões do Brasil 41
Figura 7 - Número de artigos por ano 56
Figura 8 - Publicação por periódico 57
Figura 9 - Palavras-chave 58
Figura 10 - Etapas da metodologia da pesquisa 69
Figura 11 - Método proposto 71
Figura 12 - Região atendida pelo sistema Transcol. 79
Figura 13 – Ônibus convencional Transcol 82
Figura 14 - Ônibus híbrido Transcol 82
Figura 15 - Ônibus elétrico Transcol 83
Figura 16 - Quantidade de ônibus em operação na frota e quilometragem total percorrida 84
Figura 17 - Quantidade de passageiros do Transcol por ano 84
Figura 18 - Fronteiras do sistema analisado 85
Figura 19 - Cadeia de produção do Diesel 93
Figura 20 - Cadeia de produção do biodiesel 95
Figura 21 - Cadeia de produção do GNL 96
Figura 22 - Cadeia de produção da eletricidade 97
Figura 23 - Fase PTW dos combustíveis 99
Figura 24 – Emissões de CO (kg x10³) 111
Figura 25 - Emissões WTW de CO 112
Figura 26 - Emissões de MP (kg x10³) 114
Figura 27 - Emissões WTW de MP 116
Figura 28 – Emissões de $SO2$ (kg x10³) 118
Figura 29 - Emissões WTW de $SO2$ 120
Figura 30 – Emissões de NOx (kg x10³) 122
Figura 31 - Emissões WTW do NOx 124
Figura 32 – Emissões de $NMHC$ (kg x10³) 126
Figura 33 - Emissões WTW de $NMHC$ 128
Figura 34 - Emissões de $CO2$ (kg x10³) 129
Figura 35 - Emissões WTW do $CO2$ 130
Figura 36 - Emissões de $CH4$ (kg x10³) 132
Figura 37 - Emissões WTW do $CH4$ 133
Figura 38 - Emissões de $N2O$ (kg x10³) 134
Figura 39 - Emissões WTW do $N2O$ 135
Figura 40 – Emissões de $CO2e$ (kg x10³) 137
Figura 41 - Emissões WTW do $CO2e$ 139
Figura 42 - Categorias de impacto 144

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Potencial de Aquecimento Global (GWP) 34
Tabela 2 – Informações sobre as fases do Proconve 49
Tabela 3 - Limites de emissão de poluentes atmosféricos ao longo das fases do Proconve 50
Tabela 4 – Informações dos artigos analisados 54
Tabela 5 - Principais características da frota do Transcol 81
Tabela 6 – Modelo, combustível e quantidade de ônibus na frota 87
Tabela 7 – Informações referentes a quilometragem total percorrida e o combustível consumido 91
Tabela 8 - Fatores de emissão de diesel S-500 e S-10 para a fase WTP 94
Tabela 9 – Fatores de emissão do biodiesel na fase WTP 95
Tabela 10 - Fatores de emissão para o GNV para a fase WTP. 97
Tabela 11 - Fatores de emissão da eletricidade da fase WTP 98
Tabela 12 - Fatores de emissão (WTP) 98
Tabela 13 – Valores referência para calcular os fatores de emissão do diesel em kg/l 100
Tabela 14 - Fatores de emissão dos poluentes atmosféricos e GEE do diesel na fase PTW 100
Tabela 15 - Fatores de emissão dos poluentes atmosféricos e GEE do GNV na fase PTW 101
Tabela 16 - Fatores de emissão (PTW) 101
Tabela 17 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 1 102
Tabela 18 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 2 103
Tabela 19 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 3 103
Tabela 20 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 4 104
Tabela 21 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 5 104
Tabela 22 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 6 105
Tabela 23 - Categorias de impacto e fatores do IMPAC 2002+ 106
Tabela 24 - Emissões da fase WTP em todos os cenários 108
Tabela 25 - Emissões da fase PTW em todos os cenários 108
Tabela 26 - Emissões WTW em todos os cenários 109
Tabela 27 - Análises das categorias de impacto 143
Tabela 28 – Valores agregados das categorias de impacto 149

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais métodos de impacto..... 26
Quadro 2 - Principais softwares disponíveis, país de origem e principais características..... 27
Quadro 3 - Cenários propostos..... 90

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira De Normas Técnicas
ACV	Avaliação De Ciclo De Vida
AICV	Avaliação Dos Impactos Do Ciclo De Vida
ANP	Agência Nacional Do Petróleo, Gás Natural E Biocombustíveis
ANTP	Associação Nacional De Transportes Públicos
CNPE	Conselho Nacional De Política Energética
CONAMA	Conselho Nacional Do Meio Ambiente
COP	Conferência das Partes
CFCs	Clorofluorocarbonos
CH_4	Metano
CO	Monóxido De Carbono
CO_2	Dióxido De Carbono
CO_2e	Dióxido De Carbono Equivalente
EPE	Empresa De Pesquisa Energética
GEE	Gases De Efeito Estufa
GN	Gás Natural
GNV	Gás Natural Veicular
GNL	Gás Natural Liquefeito
GNC	Gás Natural Comprimido
GWP	*Global Warming Potential*
HFCs	Hidrofluorocarbonetos
HVO	Hidrotratamento De Óleos Vegetais
ICCT	*International Council On Clean Transportation*
AICV	Análise De Inventário Do Ciclo De Vida
INPE	Instituto Nacional De Pesquisas Espaciais
IPCC	*Intergovernmental Panel On Climate Change*
ISO	*International Organization For Standardization*
LCA	*Life Cycle Assessment*
MP	Material Particulado
NDC	*Nationally Determined Contribution*
N_2O	Óxido Nitroso
NF_3	Trifluoreto De Nitrogênio
NO_x	Óxido De Nitrogênio
NTU	Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos
OPAS	Organização Pan-Americana Da Saúde
PDE	Plano Decenal de Expansão de Energia
PFCs	Perfluorocarbonos
PNPB	Programa Nacional De Produção E Uso Do Biodiesel
PTW	*Pump-To-Wheel*
Proconve	Programa De Controle De Emissões Veiculares
RMGV	Região Metropolitana Da Grande Vitória
SF_6	Hexafluoreto De Enxofre
SO_2	Dióxido De Enxofre
SO_X	Óxidos de Enxofre
UNFCCC	*United Nations Framework Convention On Climate Change*
WTP	*Well-To-Pump*
WTW	*Well-To-Wheel*

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO 15

1.1. OBJETIVO GERAL 19

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO 19

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO 19

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 21

2.1. REVISÃO TEÓRICA 21

2.1.1. *Well-To-Wheel* (WTW) 21

2.1.2. Emissões de poluentes atmosféricos e GEE 27

2.1.3. Combustíveis utilizados no transporte coletivo de passageiros 36

2.1.4. Fatores que influenciam nas emissões 44

2.1.5. Panorama das regulamentações ambientais para o setor de transporte 48

2.2. REVISÃO DA LITERATURA 52

2.2.1. Revisão bibliométrica 53

2.2.2. Revisão descritiva 60

3. METODOLOGIA DA PESQUISA 68

3.1. CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA 68

3.2. ESTÁGIOS DA METODOLOGIA DE PESQUISA 69

4. MÉTODO PROPOSTO BASEADO NA ANÁLISE WTW 71

5. TRANSPORTE PÚBLICO DE PASSAGEIROS – SISTEMA TRANSCOL 79

6. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO AO SISTEMA TRANSCOL 85

6.1. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO 85

6.2. LEVANTAMENTO DOS MODELOS DE ÔNIBUS 87

6.3. LEVANTAMENTO DOS COMBUSTÍVEIS 88

6.4. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS 88

6.5. SELEÇÃO DOS POLUENTES ATMOFÉRICOS E GEE 90

6.6. LEVANTAMENTO DA QUILOMETRAGEM PERCORRIDA E COMBUSTÍVEL CONSUMIDO 90

6.7. LEVANTAMENTO DOS FATORES DE EMISSÃO 92

6.7.1. Levantamento de dados da fase WTP 92

6.7.2. Levantamento de dados da fase PTW 99

6.8. CÁLCULO DAS EMISSÕES 102

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES 108

7.1. EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS 109

7.1.1. Emissões de CO 109

7.1.2. Emissões de MP 113
7.1.3. Emissões de $SO2$ 116
7.1.4. Emissões de NOx 120
7.1.5. Emissões de $NMHC$ 124
7.2. EMISSÕE DE GEE 128
7.3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS EMISSÕES 139
7.4. ANÁLISE DAS CATEGORIAS DE IMPACTO 143
7.5. ANÁLISE GERAL 149
8. CONCLUSÕES 154
8.1. TRABALHOS FUTUROS 155
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 157

1. INTRODUÇÃO

O sistema de transporte coletivo de passageiros desempenha um papel essencial na infraestrutura urbana, garantindo a mobilidade das populações e impulsionando o desenvolvimento das cidades, pois proporciona o acesso às necessidades básicas como empregos, educação, saúde, serviços públicos e lazer, além de contribuir para a redução do congestionamento nas vias e a otimização do espaço urbano (NTU, 2021). No Brasil, o transporte coletivo de passageiros representa uma parcela significativa dos deslocamentos, respondendo por 28% de todas as viagens no país, com 85,7% dessas viagens sendo realizadas por meio de ônibus urbano, segundo dados da Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU) (NTU, 2023). Esse meio de transporte é essencial para muitos brasileiros, com estimavas apontando que 50% dos passageiros dependem exclusivamente dos ônibus para acessar essas necessidades fundamentais (Romeiro *et al.*, 2021), evidenciando a importância desse meio de transporte que atende a uma demanda massiva de aproximadamente 24,3 milhões de passageiros diariamente (NTU, 2023).

As crescentes preocupações com as mudanças climáticas e degradação ambiental, além das implicações na saúde humana, têm impulsionado a implementação de medidas governamentais para reduzir as emissões de poluentes e de Gases de Efeito Estufa (GEE) (Simoni *et al.*, 2021). Globalmente, o setor de transporte foi responsável por 39% das emissões totais de CO_2 em 2022 (IEA, 2022), e foi responsável pela emissão de 7.84Gt de CO_2e, dentro desses, o Brasil foi responsável por emitir 207.79MtCO_2e (Climate Watch, 2024). No Brasil, onde a matriz de transporte é predominantemente rodoviária, o consumo de diesel é significativo. Em 2023, as vendas de diesel atingiram 65,5 milhões de metros cúbicos, destacando sua importância no cenário nacional (EPE, 2022). O país consumiu cerca de 2,5 milhões de barris por dia em 2022, representando 2,6% do total mundial (EPE, 2023). O setor de transporte corresponde a 49% desse consumo, conforme o Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE) 2031, sendo destes, 8% do consumo destinado ao transporte público de passageiros (EPE, 2022). Nos grandes centros urbanos, esse transporte responde por 27% das emissões de gases poluentes e de CO_2 (Simoni *et al.*, 2021).

A poluição do ar refere-se a presença de substâncias nocivas na atmosfera em concentrações que podem causar danos à saúde humana e ao meio ambiente (Simoni *et al.*, 2021; IEMA,

2021). Essas substâncias podem incluir gases, partículas sólidas ou líquidas e compostos orgânicos que são emitidos por fontes naturais ou antropogênicas. Essas substâncias podem ter efeitos adversos na qualidade do ar, na saúde humana e nos ecossistemas (IEMA, 2021; CETESB, 2024). A principal fonte de emissão antropogênica está associada a queima de combustíveis fósseis, como o diesel, utilizado principalmente para atender a demanda do setor de transportes (Simoni *et al*., 2021). Dentre as principais substâncias emitidas associadas ao diesel e regulamentadas pelo Proconve, citam-se monóxido de carbono (CO), óxidos de nitrogênio (NO_x), material particulado (MP), dióxido de enxofre (SO_2), hidrocarbonetos não metano ($NMHC$) (Carvalho, 2011; BRASIL, 2014. D'Agosto, 2015). As concentrações na atmosfera podem variar de acordo com o fluxo de veículos, condições topográficas condições meteorológicas. Essas concentrações também podem variar dependendo da distância em relação à fonte de poluição. Alguns poluentes atmosféricos também atuam como fonte secundária de emissão de carbono, contribuindo para o aumento da concentração de GEE na atmosfera (Carvalho, 2011).

Por outro lado, as emissões de GEE são aquelas que contribuem para o efeito estufa, retendo parte da radiação solar na atmosfera (EPA, 2024). No entanto, a emissão excessiva de GEE, provenientes principalmente de atividades antrópicas, contribui para problemas como o aquecimento global, mudanças climáticas e acidificação ou nutrição excessiva de rios e solos, representando uma ameaça para os ecossistemas e a vida na Terra. Os principais GEE emitidos por atividades antrópicas, principalmente pelo setor de transporte, são o dióxido de carbono (CO_2), metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (Carvalho, 2011; BRASIL, 2014; EPA, 2024).

Diante desse cenário e da relevância do setor de transportes para o desenvolvimento urbano e considerando a tendência de crescimento da população urbana, é importante a avaliação da adoção de alternativas energéticas mais limpas no transporte público para reduzir os impactos negativos citados anteriormente (WRI, 2019). Embora os ônibus tenham se adaptado a padrões mais rigorosos de emissão, eles continuam a ser fontes significativas de poluição em áreas urbanas (IAP, 2020).

Em busca da redução das emissões no setor de transporte rodoviário, o Governo Brasileiro tem implementado programas estratégicos, destacando-se: o Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve) (CONAMA, 1986), o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB) (BRASIL, 2004) e o RenovaBio (BRASIL, 2017). O Proconve busca

controlar e reduzir as emissões veiculares no Brasil através de padrões de emissão para os diferentes tipos de veículos comercializados no mercado brasileiro (CONAMA, 1986). O PNPB incentiva a produção e consumo de biodiesel (BRASIL, 2004), enquanto o RenovaBio visa ampliar a produção e o uso de biocombustíveis, certificando a produção e emitindo créditos de carbono (BRASIL, 2017). A Lei Nº 11.097/2005 torna obrigatória a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira, estabelecendo a mistura obrigatória de biodiesel ao diesel, com aumentos graduais dessa mistura ao longo dos anos (BRASIL, 2005; BRASIL, 2018). Além disso, o Brasil desfruta de uma vantagem estratégica em comparação com outros países, especialmente devido à produção de diesel com baixo teor de enxofre (S-10) (ICCT, 2016; Miller e Façanha, 2016).

Os relatórios do *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) enfatizam a influência das atividades humanas nas mudanças climáticas, destacando a urgência de reduzir as emissões de GEE para cumprir as metas do Acordo de Paris, que busca limitar o aumento da temperatura média global a 1,5ºC (IPCC, 2021; IPCC, 2022). O Pacto Climático de Glasgow destaca a importância da transição para fontes de energia sustentáveis, reconhecendo os combustíveis fósseis como impulsionadores da crise climática global (Brasil, 2023; UN, 2023). Os países signatários da ONU comprometem-se a apresentar Contribuições Nacionalmente Determinadas (NDCs, sigla em inglês para *Nationally Determined Contributions*) a cada Conferência das Partes (COP), evidenciando os compromissos voluntários para reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) (IPCC, 2018; Romeiro *et al.*, 2021; IPCC, 2022). O Brasil firmou o compromisso de redução das emissões em 37% até 2025 visando atingir a neutralidade climática até o ano de 2050 (UNFCCC, 2022; Brasil, 2023). O ano de 2023 foi registrado como o mais quente da história, reforçando a urgência de ações para reduzir as emissões de GEE na atmosfera, em comprometimento com as metas "*Net Zero*" (Brasil, 2023).

O estado do Espírito Santo (ES) aderiu aos programas da ONU, denominados *Race to Zero* e *Race to Resilience*, e elaborou o Plano de Descarbonização e Neutralização das Emissões de GEE como parte do compromisso com a sustentabilidade e o bem-estar das gerações atuais e futuras (UFES, 2024; UNFCCC, 2022). O objetivo dessas iniciativas é promover a descarbonização e a neutralização das emissões de GEE até 2050. O governo do ES propôs alternativas no plano para mitigar as emissões de GEE em diversos setores, especialmente no transporte público, incentivando a eletrificação de veículos, o uso de biocombustíveis.

Nesse contexto, esta dissertação tem como objetivo avaliar ambientalmente os combustíveis utilizados no transporte público de passageiros para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e de GEE, melhorando a qualidade do ar. Para isso, foi realizado um estudo de caso avaliando o sistema de transporte público de passageiros Transcol, que atende a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV) no ES. A pesquisa visa avaliar as emissões dos poluentes atmosféricos (CO, NO_x, SO_2, MP e $NMHC$) e de GEE (CO_2, CH_4 e N_2O) geradas pela frota de ônibus do sistema Transcol, em seis diferentes cenários, considerando o tipo de combustível e a fase do Proconve dos ônibus da frota.

Utilizou-se a análise *Well-to-Wheel* (WTW), que é baseada na metodologia Análise do Ciclo de Vida (ACV), também conhecida como *Life Cycle Assessment* (LCA). A ACV é uma metodologia empregada para avaliar dados de desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida de um produto, serviço ou atividade, conforme normas ISO 14040 e ISO 14044. No setor de transportes, é adotada a análise WTW, que avalia os impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida dos combustíveis utilizados no transporte. Esta análise compreende duas fases: a fase *Well-to-Pump* (WTP), que compreende a aquisição de matéria-prima, transporte, produção do combustível e distribuição nos postos de abastecimento; e a fase *Pump-to-Wheel* (PTW), que compreende o abastecimento e a utilização desses combustíveis pelos motores dos veículos (Orsi, 2016).

Na ACV, as categorias de impacto são indicadores que servem para avaliar e quantificar os efeitos potenciais das atividades humanas sobre o meio ambiente. As categorias de impacto agrupam diferentes tipos de danos ou impactos ambientais que ocorrem ao longo do ciclo de vida de um produto, permitindo uma avaliação do impacto causado. Esta dissertação analisa as categorias de impacto *midpoint*: respiração orgânica, respiração inorgânica, aquecimento global, acidificação aquática e acidificação/nutrição terrestre.

Os dados reais de operação da frota foram cedidos pela Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória (CETURB-GV), responsável pelo controle e operação do sistema. Foram utilizados os dados de 2022 como ano base para a análise. Os dados de produção dos combustíveis foram obtidos através da base de dados Ecoinvent v.3.6. As categorias de impacto foram analisadas utilizando o método IMPACT 2002+. Os combustíveis analisados foram BS-500, BS-10, eletricidade e o GNV. O GNV está associado ao diesel em um ônibus híbrido, com a mistura variando em torno de 80% de GNV e 20% de BS-10.

Esta pesquisa preenche uma lacuna identificada na revisão da literatura, já que a análise de categorias de impacto não é comumente realizada pela análise WTW. Além disso, os estudos que aplicaram a análise WTW destacaram a importância de considerar as características específicas de cada região, assim, esta pesquisa foca em analisar as características regionais da RMGV, no estado do Espírito Santo, o que é um diferencial em relação às demais pesquisas.

1.1. OBJETIVO GERAL

O objetivo da pesquisa é realizar uma análise WTW para quantificar e avaliar as emissões de poluentes atmosféricos (CO, NOx, SO_2, $NMHC$, MP) e de GEE (CO_2, CH_4, N_2O) nas fases WTP e PTW, e as emissões totais da frota do Transcol, com o intuito de identificar o cenário ideal de composição da frota que resulte na redução mais significativa das emissões.

1.2. OBJETIVO ESPECÍFICO

Os objetivos específicos incluem:

- Realizar um levantamento da frota do ano de 2022 do Transcol, considerando o combustível utilizado, a fase do Proconve, dentre outros dados;
- Realizar um levantamento do total de quilômetros percorridos e o total de combustível utilizado por cada ônibus da frota;
- Elaborar cenários de alteração dos combustíveis utilizados pela frota;
- Levantar as emissões de poluentes atmosféricos ($CO, NO_x, SO_2, NMHC, MP$) e de GEE (CO_2, CH_4, N_2O) dos ônibus por tipo de motorização, fase do Proconve e por tipo de combustível nas fases WTP e PTW;
- Calcular as emissões nas fases WTP, PTW e as emissões totais WTW em todos os cenários;
- Realizar a comparação e análise dos resultados de cada cenário, indicando a melhor composição da frota em termos de redução das emissões;
- Avaliar como as emissões influenciam nos resultados das categorias de impacto.

1.3. ESTRUTURA DO TRABALHO

A presente dissertação está estruturada em oito capítulos. Após a Introdução, o Capítulo 2 inicia com uma revisão bibliográfica, contendo uma revisão teórica sobre os temas abordados nesta pesquisa e uma revisão da literatura com estudos aplicados para contextualizar e corroborar a importância do trabalho. O Capítulo 3 apresenta a metodologia da pesquisa. O Capítulo 4 apresenta o método proposto para se alcançar os objetivos desta dissertação. No Capítulo 5 é apresentada as informações do sistema de transporte público de passageiros utilizado no estudo de caso. O Capítulo 6 descreve a aplicação do método no estudo de caso. O Capítulo 7 apresenta os resultados obtidos e as discussões acerca dos objetivos específicos listados no Capítulo 1. Por fim, o Capítulo 8 encerra a dissertação apresentando as conclusões e as recomendações para trabalhos futuros.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo está dividido em dois subcapítulos. O primeiro subcapítulo (2.1) têm como objetivo apresentar a revisão teórica dos principais conceitos utilizados ao longo desta dissertação. O segundo subcapítulo (2.2) apresenta uma revisão da literatura, incluindo a revisão bibliométrica e a revisão descritiva dos artigos analisados.

2.1. REVISÃO TEÓRICA

A seguir, serão abordados os conceitos e definições utilizados ao longo desta dissertação, que incluem a análise WTW, as emissões de poluentes atmosféricos e de GEE, os combustíveis utilizados para transporte público rodoviário de passageiros, os fatores que influenciam as emissões e um breve panorama das regulamentações ambientais para o setor de transporte no Brasil.

2.1.1. *Well-To-Wheel* (WTW)

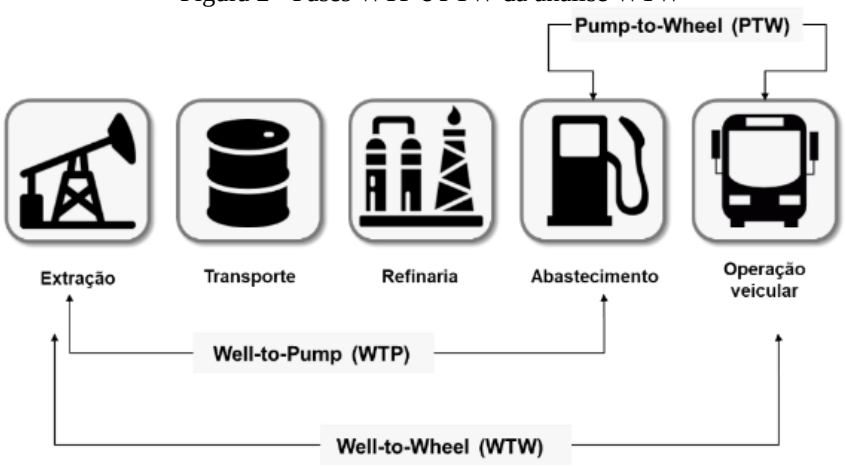
A análise WTW é uma aplicação da ACV adotada especificamente para avaliar os impactos associados ao setor de transporte (Figura 1). A análise inclui etapas desde a produção do combustível até o consumo pelos motores dos veículos, embora não leve em consideração o ciclo de vida do próprio veículo, como a produção e o descarte (Orsi *et al*., 2016). Os resultados obtidos na análise WTW têm diversas aplicações práticas, dependendo dos objetivos e do escopo, como para avaliação do desempenho dos veículos, quantificação e monitoramento de emissões, análise de políticas públicas, gestão ambiental e planejamento estratégico, entre outros.

Figura 1 – Análise WTW e ACV

Fonte: Adaptado de Orsi *et al.* (2016).

Uma análise WTW pode ser dividida em duas fases (Figura 2): a fase WTP, traduzida livremente como do poço-a-roda, que engloba desde a extração da matéria-prima até a distribuição nos postos de abastecimento; e a fase PTW, traduzida livremente como tanque-a-roda, que se estende desde o abastecimento dos veículos até o uso dos combustíveis pelos motores dos veículos (Orsi *et al.*, 2016). Vale ressaltar que a fase WTP é influenciada por fatores como o tipo de matéria-prima empregada na produção do combustível, o transporte, a localização das centrais de produção e a composição do mix de geração de energia elétrica. Por outro lado, a fase PTW baseia-se nas especificações técnicas dos veículos, na composição da frota, na quilometragem percorrida e na quantidade de combustível consumido (Hafdaoui *et al.*, 2023).

Figura 2 - Fases WTP e PTW da análise WTW



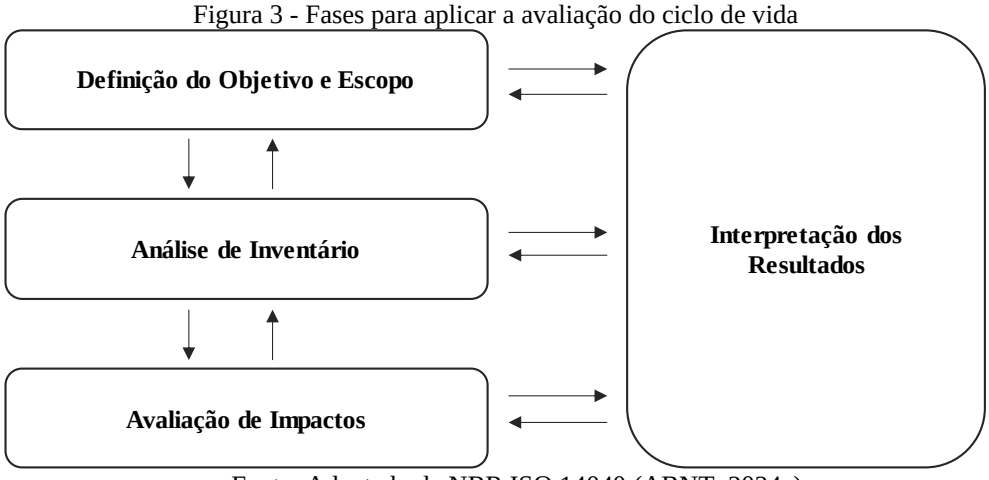
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os estudos de ACV surgiram em resposta às preocupações ambientais, especialmente associadas a crise do petróleo nos anos 1960 (CONMETRO, 2010). Inicialmente, concentrou-se na redução de custos operacionais, explorando alternativas energéticas e de matéria-prima, inclusive na substituição de combustíveis fósseis. A empresa Coca-Cola *Company* foi pioneira ao aplicar a ACV para aprimorar as embalagens dos produtos (Hunt e Franklin, 1996). Nos anos 80, houve um ressurgimento dos estudos, impulsionados pelo aumento das preocupações ambientais. A ACV evoluiu para uma avaliação abrangente, incorporando aspectos econômicos e sociais, tornando-se essencial para a sustentabilidade (Hunt e Franklin, 1996). A padronização iniciou-se com a SETAC e evoluiu com a publicação de normas internacionais publicadas pela *da International Organization for Standardization* (ISO), que estabelece diretrizes para o desenvolvimento da ACV e para a gestão ambiental (Hunt e Franklin, 1996).

A ISO estabeleceu uma série de normas internacionais, conhecida como normas ISO serie 14000, para orientar a realização de uma ACV, composta por quatro normas (ISO 14040 – 14043), que estabelecem requisitos essenciais e estruturais. No Brasil, o Comitê Brasileiro de Gestão Ambiental da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) iniciou a tradução das normas da série NBR ISO 14040 no início dos anos 2000. A partir de 2006, as diversas normas técnicas que faziam parte da série, como as normas ISO 14041, 14042, 14043, dentre outras, foram compactadas em duas normas: a NBR ISO 14040, que descreve os princípios e estrutura para a aplicação do ACV e a NBR ISO 14044, que descreve os requisitos e as orientações (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b).

Por ser uma aplicação dos estudos de ACV, a análise WTW segue as mesmas metodologias, fases e normas técnicas, resultando em um inventário que registra os impactos potenciais associados às diversas fases do ciclo de vida dos combustíveis (ABNT, 2014b). De acordo com as normas NBR ISO 14040:2014 e 14040:2014, a avaliação é estruturada em quatro fases (Figura 3): definição do objetivo e escopo, análise de inventário, avaliação de impactos e interpretação dos resultados (ABNT, 2014a).

Figura 3 - Fases para aplicar a avaliação do ciclo de vida



Fonte: Adaptado da NBR ISO 14040 (ABNT, 2024a).

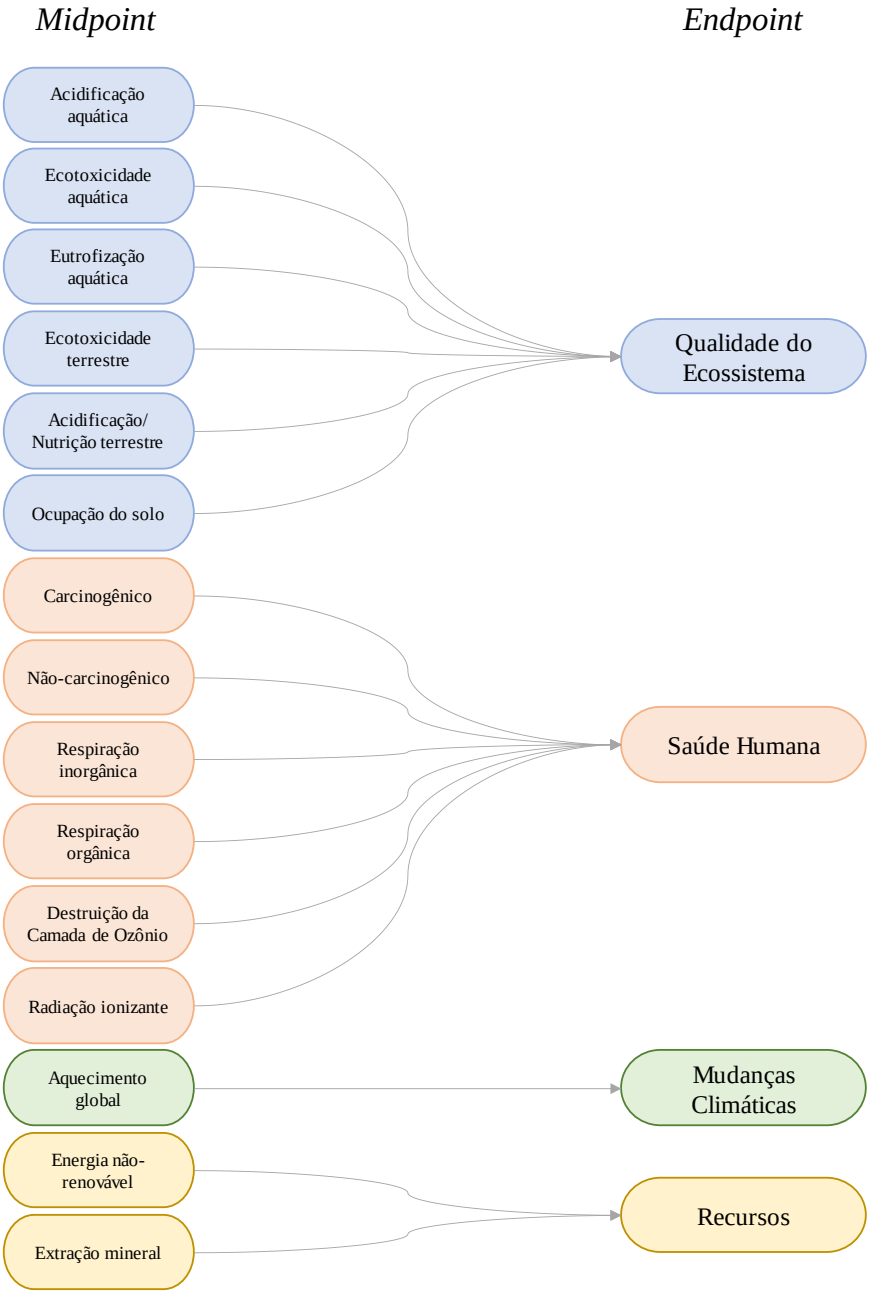
A primeira fase do estudo (Figura 3) envolve a Definição de objetivo e escopo, considerando a finalidade da pesquisa, as aplicações pretendidas e a identificação do público-alvo ao qual se destinam os resultados. A definição do escopo abrange todo o sistema relacionado ao produto ou serviço, como as fronteiras do sistema, unidades funcionais, qualidade dos dados, pressupostos e limitações, categorias de impacto e metodologia de avaliação (ABNT, 2014b). A unidade funcional serve como referência, normalizando os dados de entrada e saída, a fim de

quantificar os impactos (ABNT, 2014b). As fronteiras dos sistemas englobam todos os fluxos e os processos a serem considerados. A qualidade dos dados deve considerar a representatividade temporal, geográfica e tecnológica, juntamente com a confiabilidade e integridade dos dados coletadas (ABNT, 2014b). Para realizar um estudo comparativo, deve-se utilizar a mesma unidade funcional, equivalência nas fronteiras do sistema e qualidade dos dados.

A segunda fase (Figura 3) é denominada de Análise de Inventário do Ciclo de Vida (ICV), envolve a coleta de dados e informações, os tratamentos desses dados e os cálculos para quantificar as entradas e saídas do sistema (ABNT, 2014a). Os dados podem ser classificados como dados primários, que são coletados diretamente nos locais; e dados secundários, que são obtidos a partir de bancos de dados especializados ou de literatura técnica. Para facilitar a obtenção de dados relacionados aos processos que integram as etapas do ciclo de vida de um produto ou serviço, utiliza-se bases de dados consolidadas. Vale ressaltar que, devido à dificuldade de obtenção de dados nacionais sobre informações relacionadas a transporte, energia e resíduos gerados no final de um processo, faz-se necessário a utilização de bases de dados estrangeiras. Dentre as bases de dados utilizadas para as análises WTW, incluindo todas as etapas relacionadas ao sistema de transporte, citam-se: Ecoinvent (Suíça), GREET (EUA), JEC (União Europeia), Gabi (Alemanha), Gemis (Alemanha), Synergia (Finlândia), entre outras.

A terceira fase (Figura 3) é conhecida como Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV). Seu propósito é avaliar os resultados encontrados anteriormente sobre os impactos da saúde humana, fauna e flora e a disponibilidade de recursos. Esses resultados devem ser convertidos em categorias de impacto por meio de métodos específicos e devem estar relacionados a diferentes indicadores de impacto, dependendo do escopo e da aplicação do estudo. Os indicadores de impacto podem ser classificados em dois tipos: "*Midpoint*", diretamente relacionados a categorias específicas de impacto, como emissões atmosféricas e poluição da água, fornecendo uma visão detalhada dos impactos em estágios específicos do ciclo de vida; e "*Endpoint*", relacionados a categorias mais abrangentes de danos ambientais, como impactos na saúde humana e mudanças climáticas. Esses últimos são geralmente considerados mais relevantes para os tomadores de decisão, pois apresentam os resultados de forma mais acessível e compreensível (Jolliet *et al*., 2003; Mendes *et al*., 2016). A Figura 4 apresenta a relação entre *Midpoint* e *Endpoint* do método IMPACT 2002+.

Figura 4 - Categorias de impacto do método IMPACT 2002+



Fonte: Adaptado de Jolliet *et al.* (2003).

Os métodos de impacto comumente utilizados para avaliar e quantificar as emissões de GEE nos transportes são o IMPACT 2002+ e o ReCiPe. O *Impact Assessment of Chemical Toxic*s (IMPACT 2002+) é um método suíço que utiliza a combinação de outros métodos AICV existentes, como o Eco-indicador 99, CML 2001, IPCC e a Demanda Cumulativa de Energia (Jakub *et al*., 2022). O método ReCiPe representa uma evolução dos métodos Eco-indicador 99 e CML 2000, integrando as abordagens *Midpoint* e *Endpoint* em uma estrutura comum (JRC, 2010; Mendes *et al.*, 2016).

Conforme observado na Figura 4, para o método IMPACT 2002+, as categorias de *Midpoint* abrangem: acidificação aquática, ecotoxicidade aquática, eutrofização aquática, ecotoxicidade terrestre, acidificação/nutrição terrestre, ocupação do solo, carcinogênicos, não-carcinogênicos, respiração orgânica, respiração inorgânica, destruição da camada de ozônio, radiação ionizante, aquecimento global, energia não renovável e extração mineral. As categorias de *Endpoint* são subdivididas em impactos a saúde humana, qualidade dos ecossistemas, mudanças climáticas e recursos (Jolliet *et al.*, 2003; Mendes *et al.*, 2016; OpenLCA, 2014).

Há uma variedade de métodos utilizados para conduzir as análises dos impactos, com abordagens específicas para diferentes finalidades de pesquisa, abrangendo desde a avaliação de impactos ambientais até análises de caráter socioeconômico e de saúde pública. O Quadro 1 apresenta os principais métodos utilizados, suas origens, abordagens e a finalidade.

Quadro 1 – Principais métodos de impacto

Método	Origem	Abordagem	Finalidade
CML 2002	Holanda	*Midpoint*	Amplamente aplicável, exceto para categorias associadas à acidificação e à formação de foto-oxidantes, que são específicas para a Europa.
Eco-indicator 99	Holanda	*Endpoint*	Simplifica a interpretação resultados da ACV
EDIP97/EDIP 2003	Dinamarca	*Midpoint*	Desenvolvimento de produtos industriais
IMPACT 2000+	Suíça	*Midpoint*/*Endpoint*	Abordagem combinada, considerando dados do IPCC
IMPACT WORLD+	Canadá, EUA, Suíça, Dinamarca e França	*Midpoint*/*Endpoint*	Aplicação global para a maiorias das categorias de impacto
IPCC	Reino Unido	*Midpoint*	Caracteriza as emissões de GEE com base no potencial de aquecimento global
LUCAS	Canadá	*Midpoint*	Desenvolve métodos para avaliar impacto nas condições do Canadá
ReCiPe	Holanda	*Midpoint*/*Endpoint*	Combina metodologias *Midpoint* e *Endpoint para aplicação global*
TRACI	Estados Unidos	*Midpoint*	Desenvolve métodos para avaliar impacto nas condições dos EUA

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Devido à complexidade e diversidade dos dados envolvidos na avaliação, torna-se fundamental a utilização de softwares especializados para conduzir as análises e as interpretações. Os softwares possibilitam a manipulação de grandes conjuntos de dados com características e

escopos diversos, facilitando a análise e interpretação dos resultados. Além disso, auxiliam na obtenção de dados, sejam eles relacionados à extração de matéria-prima ou às etapas do processo. O Quadro 2 apresenta os softwares mais relevantes para análises WTW e disponíveis para utilização no Brasil.

Quadro 2 - Principais softwares disponíveis, país de origem e principais características.

Software	País de Origem	Área de Aplicação	Licença
SimaPro	Holanda	Avaliação abrangente do ciclo de vida (ACV)	Paga
GaBi	Alemanha	Avaliação de ciclo de vida e pegada ambiental	Paga
OpenLCA	Alemanha	Modelagem e avaliação de ACV	Gratuito
Umberto	Alemanha	Modelagem de processos industriais e avaliação de ACV	Paga
Brightway2	Austrália	Modelagem de ACV utilizando a linguagem de programação Python	Gratuito

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A quarta fase (Figura 3) consiste na Interpretação e Análise de Impacto, na qual os resultados são analisados e interpretados, levando em consideração os objetivos e o escopo definidos no estudo. É importante ressaltar que a incerteza é uma constante em todas as fases da ACV, podendo surgir de várias fontes, tais como erros de medição, lacunas de inventário, escolhas metodológicas e incerteza do modelo (ABNT, 2014a).

2.1.2. Emissões de poluentes atmosféricos

Os poluentes atmosféricos são definidos, conforme a Resolução CONAMA nº 003/90, como substâncias presentes no ar cuja concentração, tempo de exposição e características estão em desacordo com os níveis estabelecidos, tornando ou podendo tornar o ar: I - impróprio, nocivo ou ofensivo à saúde; II - inconveniente ao bem-estar público; III - danoso aos materiais, à fauna e flora. IV - Prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade e às atividades normais da população (CONAMA, 1990; Brasil, 2018). A qualidade do ar resulta da interação entre a composição dos poluentes atmosféricos, as fontes de poluição e as condições meteorológicas locais, as quais podem facilitar ou dificultar a dispersão das substâncias (BRASIL, 2024)

Os poluentes atmosféricos são classificados em poluentes primários, que são emitidos diretamente pelas fontes, e poluentes secundários, que são formados pela interação de poluentes primários com componentes naturais da atmosfera. Eles podem permanecer suspensos na atmosfera por períodos que variam de minutos a anos, impactando principalmente de forma local e regional, contribuindo para a deterioração da qualidade do ar (IEA, 2021).

Os impactos da poluição do ar na saúde humana estão relacionados com uma série de problemas, incluindo a incidência de mortes prematuras, doenças respiratórias, cardiovasculares, acidentes vasculares cerebrais, câncer, diabetes e prejuízos no desenvolvimento cognitivo em crianças, além de demência em idosos (OPAS, 2018). Grupos vulneráveis, como crianças, idosos e pessoas com condições médicas pré-existentes, são mais suscetíveis aos efeitos nocivos da poluição do ar. Essa vulnerabilidade pode ser influenciada por fatores como idade, gênero, raça, condições socioeconômicas, localização geográfica, condições de moradia e acesso a cuidados de saúde (WHO, 2006). Como resultado, esses impactos sobrecarregam o sistema de saúde, resultando em uma maior demanda por atendimentos, internações e uso de medicamentos, o que implica em custos financeiros significativos para o Estado (IEMA, 2021; Simoni *et al*., 2021).

Além dos impactos na saúde humana, a poluição do ar afeta a qualidade de vida da população em geral, gerando incômodos devido a presença de poeira em superfícies de uso diário, corrosão de materiais metálicos e a diminuição da visibilidade (IEMA, 2021). No contexto ambiental, ocorrem danos à fauna, flora e aos recursos naturais, como mortalidades por contaminação e exposição, alterações no comportamento e migração de espécies, redução de taxa de fotossíntese e crescimento das plantas, deterioração da qualidade do solo, além de impactos sobre os recursos hídricos (IEMA, 2021).

Diversas atividades e setores contribuem para a emissão de substâncias nocivas, incluindo o setor de transporte, indústria, agricultura, construção civil e de serviços (IEMA, 2021; IEA, 2024, CETESB, 2024). As fontes de poluição atmosférica associadas ao setor de transporte têm origem, principalmente, nos processos de combustão, que resultam na emissão direta de gases e partículas pelo escapamento dos veículos (IEMA, 2021). O CO, NO_x, MP, SO_2 *e* $NMHC$ são os principais poluentes atmosféricos associados à queima de combustíveis fósseis, e serão descritos a seguir.

2.1.2.1. Monóxido de Carbono (CO)

O CO é um dos principais poluentes atmosféricos primários encontrados em áreas urbana, resultante principalmente da combustão incompleta de combustíveis fósseis e de outros materiais carbonáceos, como carvão, gás natural e madeira (WHO, 2021; IEMA, 2024), além de fontes naturais como erupções vulcânicas e descargas elétricas (CETESB, 2022). Diversos produtos domésticos, como aquecedores a gás, chaminés e fogões, também contribuem para a sua presença em ambientes fechados (EPA, 2024). O CO é um gás inodoro e incolor e se dispersa rapidamente da fonte de origem devido à capacidade de se misturar facilmente com o ar, e possui uma meia-vida atmosférica de 1 a 2 meses (WHO, 2021; CETESB, 2022).

As concentrações desse poluente atmosférico são preocupações devido à sua alta toxicidade e capacidade de causar efeitos adversos na saúde humana. Quando inalado rapidamente, o CO se difunde nos pulmões, corrente sanguínea e membranas da placenta (WHO, 2021; EPA, 2024). Sua afinidade pela hemoglobina é significativamente maior que a do oxigênio, levando à formação de carboxihemoglobina, reduzindo a capacidade de transporte de oxigênio no sangue para as células e tecidos, resultando em hipóxia celular generalizada, que é caracterizada pela deficiência de oxigênio nos tecidos do corpo humano (CETESB, 2022). Os sintomas de intoxicação variam de dores de cabeça e tonturas a confusão, perda de consciência e, em casos graves, danos neurológicos irreversíveis (CETESB, 2022). Diante dos riscos, especialmente em áreas urbanas, é essencial implementar monitoramento contínuo por parte das autoridades ambientais para identificar concentrações elevadas, avaliar a eficácia das medidas de controle da poluição atmosférica e proteger a saúde pública (WHO, 2006; EPA, 2024).

2.1.2.2. Óxidos de Nitrogênio (NO_x)

Os NO_x são compostos gasosos formados pela combinação de oxigênio e nitrogênio, incluindo o monóxido de nitrogênio (NO) e o dióxido de nitrogênio (NO_2), sendo emitidos principalmente por processos de combustão em altas temperaturas, como nos motores de veículos, usinas termelétricas e processos industriais (EPA, 2024). Nas áreas urbanas, os veículos são a principal fonte desses poluentes (IEMA, 2021). Além de impactar a qualidade do ar, esses compostos contribuem para a formação de chuva ácida e smog fotoquímico.

A presença de NO_x no ar está associada a problemas respiratórios, aumentando o risco de edema pulmonar e podendo ser transformados em nitrosaminas nos pulmões, substâncias com potencial carcinogênico (IEMA, 2021). Mesmo as exposições breves a esses gases podem agravar doenças respiratórias, resultando em sintomas como tosse, chiado e dificuldade respiratória, além de internações hospitalares e atendimentos de emergência. Indivíduos com asma, crianças e idosos geralmente apresentam maior suscetibilidade a esses efeitos adversos (EPA, 2024).

Além dos impactos na saúde humana, os NO_x têm consequências ambientais significativas. O NO_2, em particular, desempenha papel central na formação fotoquímica de ozônio, afetando a visibilidade atmosférica, contribuindo para mudanças climáticas globais e prejudicando a vegetação e a agricultura (WHO, 2006; WHO, 2021). Além disso, as partículas de nitrato contribuem para a poluição em ecossistemas aquáticos costeiros. Portanto, a redução das emissões de NO_x, por meio de regulamentações, controle de veículos, investimento em novas tecnologias associadas ao tratamento das emissões veiculares e a conscientização pública, é crucial para mitigar esses impactos na saúde e no meio ambiente (WHO, 2021; IEMA, 2021; EPA, 2024).

2.1.2.3. Material Particulado (MP, $MP_{2,5}$ e MP_{10})

As partículas em suspensão no ar, conhecidas como MP ou *Particulate matter* (PM), são uma mistura de partículas sólidas ou líquidas com diferentes tamanhos e características físicas e químicas, originadas de diversas fontes de emissão (IEMA, 2021). Podem variar de poeira, fumaça e fuligem, afetando a visibilidade atmosférica (CETESB, 2020). Originam-se de reações complexas envolvendo gases como SO_2, NO_x e $COVs$, podendo ser formado tanto primariamente, diretamente de fontes de emissão, quanto secundariamente, por transformações químicas e físicas na atmosfera (CETESB, 2020; WHO, 2021; EPA, 2024). As fontes de emissão são diversas, incluindo escapamentos de veículos, processos industriais, queima de biomassa, ressuspensão de partículas e até mesmo por fontes e processos naturais, como partículas de sais provenientes de oceanos e queimadas florestais (IEMA, 2021).

As partículas são classificadas de acordo com o diâmetro aerodinâmico, sendo separadas em $MP_{2,5}$ e MP_{10} e Partículas Totais em Suspensão (PTS) (WHO 2021; EPA, 2024). O MP_{10}

engloba partículas com um diâmetro de até 10 micrômetros, enquanto o $MP_{2,5}$ é composto por partículas com diâmetro de até 2,5 micrômetros, que podem penetrar mais profundamente no sistema respiratório, atingindo os alvéolos pulmonares. A exposição ao MP pode resultar em diversos impactos na saúde humana, como problemas respiratórios, asma, bronquite, câncer de pulmão e distúrbios do sistema imunológico. Os indivíduos mais susceptíveis aos problemas causados por esses poluentes incluem os portadores de doenças cardíacas ou pulmonares, crianças e idosos (IEMA, 2021; EPA, 2024). As partículas finas, especialmente $MP_{2,5}$, representam maior risco à saúde, afetando sistemas respiratório e cardiovascular (IEMA, 2021; WHO, 2021; EPA, 2024).

A OMS destaca que a saúde não é apenas ausência de doença, ressaltando a relevância do desconforto causado pelo depósito de poeira em superfícies como um problema de saúde pública e poluição do ar (WHO, 2021). Além dos impactos na saúde humana, o MP pode causar danos ao meio ambiente, afetando a visibilidade e contribuindo para a acidificação e nutrição do solo e corpos d'água, contribuindo para efeitos da chuva ácida e danos materiais (IEMA, 2021; EPA, 2024).

2.1.2.4. Dióxido de Enxofre (SO_2)

O SO_2, também conhecido por anidrido sulfuroso, é um gás incolor e não inflamável, formado pela combinação de um átomo de enxofre e dois átomos de oxigênio. É solúvel em água e apresenta um odor característico, semelhante à queima de palitos de fósforo. O SO_2 é considerado tóxico para a saúde humana e é frequentemente utilizado como indicador de qualidade do ar (IEMA, 2021). As fontes de emissão de SO_2 podem ser de origem natural, como as emissões vulcânicas, ou antrópicas, como a queima de combustíveis contendo enxofre, como o diesel (IEMA, 2021). As atividades industriais, produção de fertilizantes e usinas termelétricas também contribuem para suas emissões, especialmente, em países de baixa renda e com leis ambientais menos severas (CETESB, 2020).

A exposição e inalação do SO_2, mesmo em baixas concentrações, pode causar diversos impactos à saúde humana, incluindo o agravamento de doenças respiratórias e cardiovasculares, aumento de secreção de muco nas vias respiratórias superiores e sintomas como tosse, falta de ar e asma (IEMA, 2021; CETESB, 2020). Os grupos sensíveis incluem portadores de asma,

doenças pulmonares e cardíacas crônicas, crianças e idosos, com efeitos agravados durante atividades físicas intensas (CETESB, 2020).

Além dos impactos na saúde humana, o SO_2 desempenha um papel significativo no meio ambiente, contribuindo para a formação de chuva ácida e redução da visibilidade atmosférica devido à formação de partículas de sulfato (CETESB, 2020). A presença de sulfatos nos aerossóis está associada à acidificação de corpos d'água e corrosão de estruturas (CETESB, 2020). Além disso, o SO_2 atua como precursor dos sulfatos, principais componentes das partículas inaláveis conhecidas como MP_{10}. As emissões do SO_2 tem diminuído com medidas de controle mais rigorosas e redução no teor de enxofre nos combustíveis (CETESB, 2020).

2.1.2.5. Hidrocarbonetos Não Metanos ($NMHC$)

Os $NMHC$ constituem uma classe diversificada de compostos orgânicos, excluindo o CH_4. Englobam uma variedade de estruturas e propriedades, dependendo do número de átomos de carbono na molécula e da maneira como esses átomos estão dispostos e ligados entre si, como o etano (C_2H_6), propano (C_3H_8) e butano (C_4H_{10},). Esses hidrocarbonetos são comumente presentes em combustíveis fósseis, como petróleo, gás natural e carvão, sendo caracterizados pela sua natureza orgânica e baixa solubilidade em água (EPA, 2024). A exposição aos $NMHC$ pode ocorrer por inalação, ingestão ou contato cutâneo, sendo alguns desses compostos considerados tóxicos em altas concentrações. A exposição elevada, especialmente a compostos como C_3H_8 e C_4H_{10}, pode resultar em efeitos narcóticos, incluindo tontura, confusão e perda de consciência (EPA, 2024).

Em termos ambientais, as emissões resultantes da queima de combustíveis fósseis contribuem para a poluição do ar e do solo, tendo impactos diretos na saúde humana e animal. Os vazamentos e derramamentos de petróleo, que são fontes significativas desses hidrocarbonetos, podem causar danos a ecossistemas aquáticos e terrestres, afetando a vida marinha, a fauna, a flora e os recursos naturais (EPA, 2024). A redução das emissões envolve a implementação de tecnologias de queima limpa, controle de emissões industriais e medidas preventivas e de resposta a vazamentos.

2.1.3. Emissões de Gases De Efeito Estufa (GEE)

Os GEE são substâncias gasosas naturalmente presentes na atmosfera, que desempenham um papel crucial no equilíbrio térmico do planeta, absorvendo e reemitindo radiação infravermelha (EPA, 2024). Contudo, o aumento da concentração desses gases na atmosfera, resultante das atividades antrópicas, particularmente desde a Revolução Industrial, resulta em um desequilíbrio na troca de calor entre a Terra e atmosfera. Esse desequilíbrio contribui significativamente para o fenômeno do aquecimento global e as consequentes mudanças climáticas. As principais atividades humanas associadas a essas emissões são a queima de combustíveis fósseis, atividades industriais, agropecuária, mudanças no uso da terra e desmatamento (EPA, 2024). Os principais GEE regulados pelo Protocolo de Quioto e emitidos pelo setor de transporte incluem o CO_2, CH_4 e N_2O. Além desses, o Protocolo também menciona outros os gases como os hidrofluorcarbonos ($HFCs$), perfluorcarbonos ($PFCs$), hexafluoreto de enxofre (SF_6) e trifluoreto de nitrogênio (NF_3), os quais também contribuem para o efeito estufa e suas consequências no clima global, porém não são emitidos pelo setor de transporte (EPA, 2024).

Os gases fluorados, incluindo os $HFCs$, $PFCs$, SF_6 e NF_3 são GEE sintéticos, sendo emitidos exclusivamente por atividades antrópicas. Embora suas emissões sejam menores em comparação com os outros GEE, possuem Potencial de Aquecimento Global (GWP, sigla em inglês para *Global Warming Potential*) muito elevados, que variam entre milhares e dezenas de milhares, contribuindo desproporcionalmente para as temperaturas globais (EPA, 2024). A destruição desses gases ocorre por meio da exposição à luz solar na alta atmosfera (EPA, 2024). Existem quatro categorias principais de gases fluorados mencionados pelo Protocolo de Quioto:

- Os $HFCs$: Utilizados em sistemas de ar-condicionado, propelentes de aerossol, agentes de expansão de espuma, solventes e retardadores de fogo. Foram desenvolvidos como substitutos dos clorofluorcarbonos (CFCs). Apresentam valores de GWP de até 14.800 e podem persistir na atmosfera por até 270 anos (IPCC, 2022);
- Os *PFCs:* São subprodutos da produção de alumínio e são utilizados na fabricação de semicondutores. Apresentam valores de GWP que variam de 7.390 a 12.200 e se caracterizam por sua extrema persistência atmosférica, com duração até 50.000 anos (IPCC, 2022);
- Os SF_6: Utilizado no processamento de magnésio e na detecção de vazamentos como gás traço e usado como gás isolante em equipamentos de transmissão elétrica, como

disjuntores. Apresentam valores de GWP de aproximadamente 23.500 e podem persistir na atmosfera por cerca de 3.200 anos (IPCC, 2022);

- Os NF_3: Utilizados na produção de painéis solares, telas de cristal líquido, semicondutores e LEDs. Apresentam valores de GWP de aproximadamente 16.100 e podem persistir na atmosfera por cerca de 740 anos (IPCC, 2022).

Os efeitos das mudanças climáticas relacionadas aos GEE são determinados por uma série de fatores complexos, incluindo a concentração desses gases na atmosfera, o tempo de permanência e, principalmente, o GWP (EPA, 2024). O GWP é uma medida que compara o impacto no aquecimento global causado por uma tonelada de um determinado GEE com o impacto causado por uma tonelada de CO_2 (Tabela 1) (D'Agosto, 2015; EPA, 2024). Apesar de todos demais gases apresentarem um GWP superior ao do CO_2, a escolha deste como referência é justificada pela sua predominância nas emissões de atividades antrópicas (EPA, 2024).

O cálculo do GWP é realizado para um período específico, sendo os valores normalmente utilizados para um horizonte temporal de 100 anos (GWP-100), conforme estabelecido nos relatórios do IPCC, com revisões periódicas a cada novo relatório (EPA, 2024). A utilização do GWP possibilita a avaliação comparativa dos diferentes GEE em termos de sua contribuição para o aquecimento global. Sendo assim, 1 tonelada de CH_4 de origem fóssil equivale a 29,8 toneladas de CO_2, e 1 tonelada de N_2O equivale a 273 toneladas de CO_2 (IPCC, 2023).

Tabela 1 - Potencial de Aquecimento Global (GWP)

GEE	GWP (100 anos)
$\boldsymbol{CO_2}$	1
$\boldsymbol{CH_4}$ fóssil	29,8
$\boldsymbol{N_2O}$	273

Fonte: Adaptado do AR6 (IPCC, 2023).

Para quantificar os impactos dos GEE nas mudanças climáticas, é comum expressar as emissões em equivalência de dióxido de carbono (CO_2e). Essa medida é obtida multiplicando as emissões de cada GEE pelo seu respectivo GWP (EPA, 2024). Essa abordagem permite uma análise mais abrangente e precisa dos efeitos das emissões dos diferentes GEE sobre o clima global.

2.1.3.1. Dióxido de Carbono (CO_2)

O CO_2 é o principal GEE resultante de atividades antrópicas. Sua emissão está principalmente associada à queima de combustíveis fósseis, como carvão, gás natural e petróleo, bem como a incêndios florestais e desmatamentos. Essas atividades têm provocado um aumento significativo nas concentrações de CO_2 na atmosfera, representando cerca de 60% das emissões globais de GEE (CETESB, 2020). Embora seja naturalmente presente na atmosfera como parte do ciclo do carbono terrestre, as atividades antrópicas têm contribuído para o seu acúmulo na atmosfera (EPA, 2024). Esse acúmulo na atmosfera tem perturbado o equilíbrio natural do ciclo do carbono, impedindo a absorção natural desse composto químico pelas plantas e por outros sumidouros, como a troca entre o oceano e a atmosfera e de micro-organismos e animais, resultando em aumento nas concentrações atmosféricas desse gás (EPA, 2024). Isso também é influenciado pela redução das áreas de sumidouros causada pelo aumento do desmatamento, impedindo a remoção desse gás da atmosfera (EPA, 2024).

2.1.3.2. Metano (CH_4)

O CH_4, também conhecido como hidreto de metila, é um hidrocarboneto gasoso incolor e inodoro. É responsável por 15 a 20% das emissões globais, sendo o segundo GEE mais abundante na atmosfera, devido a atividades antrópicas e naturais (CETESB, 2020). O CH_4 possui uma vida útil de 12 a 13 anos na atmosfera, sendo que o de origem fóssil apresenta um GWP de cerca de 29,8 vezes mais eficiente na retenção de calor quando comparado ao CO_2, ao longo de 100 anos (CETESB, 2020; IPCC, 2023). Suas fontes naturais incluem decomposição microbiana em zonas úmidas naturais e digestão de ruminantes. As fontes antrópicas incluem atividades associadas à indústria do petróleo, agricultura, pecuária, mineração de carvão, aterros de resíduos e sistemas de tratamento de esgotos (CETESB, 2020; EPA, 2024). O CH_4 é um componente principal do gás natural, com uma proporção de cerca de 70%, acompanhado por outros hidrocarbonetos de cadeia curta e vários outros gases e impurezas (CETESB, 2020).

Embora não apresente riscos diretos à biota e nem toxicidade à saúde humana, devido as suas características químicas e a ausência de bioacumulação, o CH_4 tem um impacto global significativo como sendo um dos principais gases responsáveis pelo efeito estufa, ocasionando danos ao meio ambiente devido ao aumento da temperatura do planeta (CETESB, 2020). Em casos de vazamentos, sua baixa densidade em relação ao ar atmosférico e alta volatilidade

podem permitir sua permeação pelo solo, porém, sem apresentar riscos de contaminação (CETESB, 2020).

2.1.3.3. Óxido Nitroso (N_2O)

O N_2O é o terceiro GEE mais abundante na atmosfera e que contribui diretamente para o efeito estufa, representando cerca de 6% das emissões globais e apresentando um GWP cerca de 273 vezes mais eficiente na retenção de calor do que a mesma quantidade de CO_2 ao longo de 100 anos (IPCC, 2023; EPA, 2024). Com uma permanência na atmosfera de 121 anos, o N_2O tem um impacto significativo no clima global e pode afetar a camada de ozônio estratosférica, embora em menor escala do que os $CFCs$ e os hidroclorofluorocarbonos ($HCFCs$) (EPA, 2024). As emissões provêm de fontes naturais, ligadas ao ciclo do nitrogênio, e atividades antrópicas, como agricultura, mudanças no uso da terra, processos industriais, queima de combustíveis fósseis e resíduos sólidos, bem como tratamento de águas residuais (EPA, 2024). O aumento das concentrações de N_2O na atmosfera podem causar danos nos ecossistemas, alterando a qualidade do solo e da água, modificando os ciclos biogeoquímicos e impactando a biodiversidade.

2.1.4. Combustíveis utilizados no transporte coletivo de passageiros

O setor de transporte rodoviário no Brasil, especificamente o transporte coletivo de passageiros, é movido predominantemente por motores a combustão interna, destacando o diesel como principal combustível utilizado, combinado com a adição obrigatória de biodiesel (Lei nº 13033/2014). No entanto, devido à crescente preocupação com os impactos ambientais associados à queima deste combustível, o país tem explorado alternativas. O Gás Natural Veicular (GNV) e a eletricidade já estão sendo utilizadas no Brasil. Embora o Biometano e o hidrotratamento de óleos vegetais (HVO) tenham ganhado popularidade em outros países, sua produção no Brasil é incipiente e não está amplamente disponível no mercado, sendo assim não serão abordados nesta dissertação. Corrobora ainda o fato que o sistema Transcol, utilizado no estudo de caso desta dissertação, não utiliza esses combustíveis, nem mesmo em fase de teste. Neste contexto, este capítulo fornece uma análise dos principais combustíveis utilizados no transporte público coletivo no Brasil.

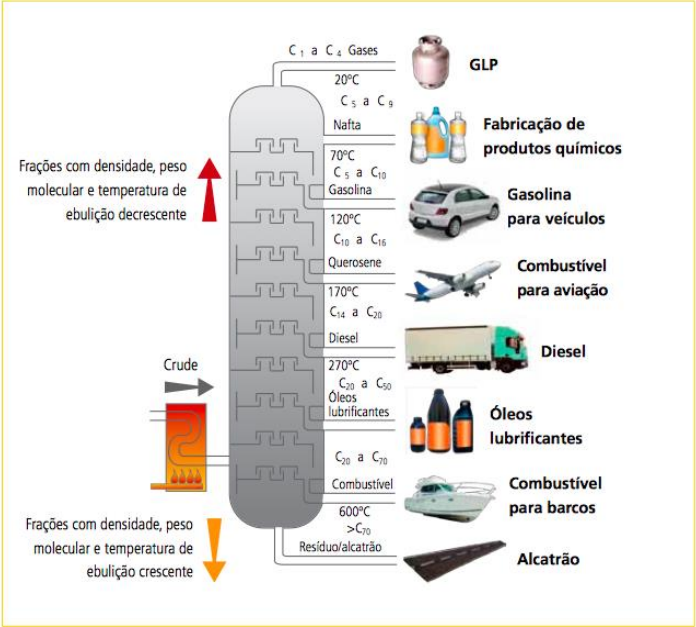
2.1.4.1. Diesel

O diesel é um combustível fóssil derivado do petróleo utilizado em motores de combustão interna, também chamados de motores do ciclo Diesel, que desempenham um papel fundamental no setor de transporte, especialmente em veículos de transporte de cargas e passageiros devido à sua alta densidade energética e disponibilidade comercial. A composição química é predominantemente constituída por hidrocarbonetos, que podem variar em estrutura e tamanho, divididos em alifáticos (cadeias de carbono lineares ou ramificadas) e aromáticos (anéis de carbono ligados). O tipo de hidrocarboneto e a variedade dos compostos dependem da fonte de origem do petróleo bruto e pelo processo de refino aplicado (CNT, 2012). O diesel também pode conter pequenas quantidades de outros elementos, como oxigênio, nitrogênio e enxofre.

A cadeia de produção do diesel se inicia com a extração do petróleo (*onshore* e *offshore*), seguida pela separação da água presente no petróleo e o transporte para centrais de armazenamento e refinarias. Nas refinarias, ocorre a transformação do petróleo bruto em seus diversos derivados, incluindo o diesel (D'Agosto, 2015). A produção de derivados do petróleo envolve um processo complexo que se divide em três etapas principais: destilação, conversão e tratamentos. Na destilação fracionada (Figura 5), o petróleo bruto é aquecido a altas temperaturas, para que seus componentes se evaporem e, em seguida, sejam resfriados em diferentes níveis dentro de uma torre de destilação, permitindo a coleta de subprodutos específicos com base no ponto de ebulição e volatilidade, como gasolina, querosene, nafta, diesel e óleos lubrificantes (CNT, 2012). A conversão transforma as frações mais pesadas em moléculas menores e mais valiosas, por meio de reações químicas como o craqueamento catalítico e o hidrocracking, aumentando o valor agregado dos derivados.

Os tratamentos são realizados para atender às especificações e padrões de qualidade exigidos pelo mercado, incluindo a remoção de contaminante como o enxofre, por meio de processos de dessulfurização, com o auxílio de catalisadores (PETROBRAS, 2024). Essas etapas garantem que o diesel atenda aos requisitos regulatórios, especialmente relacionados à segurança e ao meio ambiente (ANP, 2020). O diesel resultante pode ser comercializado para diferentes aplicações, como diesel rodoviário ou marítimo, de acordo com as demandas específicas do setor de transporte (ANP, 2020).

Figura 5 - Destilação fracionada e produção de derivados do petróleo.



Fonte: CNT (2012, p. 8).

A Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) é responsável pela regulação e fiscalização da indústria de petróleo, gás natural e biocombustíveis no Brasil. Especificamente em relação ao diesel, a ANP estabelece as especificações técnicas e os requisitos para sua comercialização. A Resolução ANP nº 798/2020 define o padrão de qualidade do diesel no país, incluindo aspectos como o teor máximo de enxofre, a viscosidade, o ponto de fulgor, o ponto de névoa, entre outros parâmetros (ANP, 2020). As regulações da ANP visam garantir o bom funcionamento dos motores e a redução das emissões de poluentes.

De acordo com a Resolução ANP Nº 50/2013, existem duas classificações para o diesel de uso rodoviário: o diesel A e o diesel B. O diesel A destina-se a veículos com motores do ciclo Diesel, de uso rodoviário, sem adição de biodiesel. Já o diesel B é o diesel com adição de biodiesel em conformidade com a legislação em vigor. O PNPB estabelece metas progressivas de adição de biodiesel ao diesel convencional, definindo percentuais mínimos a serem obrigatoriamente misturados ao diesel (BRASIL, 2005). Tomando como referência a Resolução Nº 25/2021, o percentual de mistura obrigatória de biodiesel no diesel foi de 10% em volume, portanto o diesel comercializado no mercado recebe a denominação de diesel B10 (CNPE, 2021).

Além da mistura com o biodiesel, a nomenclatura dos tipos de diesel comercializados varia de acordo com o teor máximo de enxofre presente em sua composição (mg/kg), identificado pela letra “S” seguida pelo valor específico de teor de enxofre (ANP, 2020). Atualmente, existem

duas categorias vigentes no país: S-10, que apresenta teor máximo de enxofre de 10 mg/kg e S-500, que apresenta teor máximo de enxofre de 500 mg/kg. A escolha do tipo de diesel a ser utilizado depende das especificações e exigências dos veículos e motores (ANP, 2013). Os veículos produzidos a partir de 2012, que atende as tecnologias das fases P-7 e P-8 do Proconve, devem utilizar exclusivamente o diesel BS-10 (PETROBRAS, 2023).

O diesel S-10 apresenta características químicas e físicas distintas em comparação com o diesel S-500. Além de possui um teor de enxofre consideravelmente mais baixo, o S-10 é um combustível mais refinado. Esse refinamento é alcançado por meio de processos em refinarias, nos quais o diesel bruto passa por um reator com catalisador, juntamente com hidrogênio sob alta pressão. Nesse processo, os átomos de enxofre e nitrogênio presentes nas substâncias carregadas são substituídos pelo hidrogênio. Como resultado, o diesel S-10 torna-se mais rico em hidrogênio, exibindo um comportamento solvente ligeiramente superior ao do diesel S-500, aproximando-se das características de limpeza do querosene (Petrobrás, 2023).

O teor de enxofre no diesel é uma preocupação ambiental, uma vez que a combustão envolvendo esse composto pode resultar na emissão de poluentes atmosféricos. O enxofre é um elemento químico indesejável devido à formação do ácido sulfúrico, que pode causar corrosão em partes metálicas dos motores. Quando as concentrações desse elemento são elevadas, há aumento nas emissões de SO_2, assim como de MP, resultando em efeitos prejudiciais à saúde humana, como problemas respiratórios, agravamento de doenças preexistentes, irritação nos olhos e nas vias respiratórias, entre outros efeitos adversos à saúde (CNT, 2012). Portanto, a redução do teor de enxofre no diesel é uma medida importante para mitigar os impactos negativos na saúde humana e no meio ambiente.

O diesel recebe aditivos para melhorar suas propriedades e o desempenho dos motores, como detergentes, dispersantes e inibidores de corrosão. Tais aditivos desempenham funções específicas, como manter os injetores de combustível limpos, prevenir a formação de depósitos e sedimentos no sistema de combustível e proteger as partes metálicas contra a corrosão decorrente dos componentes presentes no diesel (CNT, 2012). Conforme destacado por D'Agosto (2015), além dos desafios relacionados ao enxofre, o diesel enfrenta questões relacionadas à adulteração. Essa prática envolve a mistura de substâncias de baixa qualidade ou de origem duvidosa, o que compromete a qualidade do combustível e o desempenho dos motores. A adulteração também aumenta as emissões de poluentes atmosféricos e GEE,

podendo causar danos aos sistemas de injeção e combustão dos veículos. Portanto, a fiscalização e a implementação de medidas para combater a adulteração são fundamentais para garantir a qualidade do diesel e proteger a saúde humana e o meio ambiente (D'Agosto, 2015). A composição e a qualidade são aspectos importantes a serem considerados para reduzir as emissões e melhorar o desempenho dos motores a diesel. Utilizar combustíveis de alta qualidade e seguir as especificações dos fabricantes dos motores são fundamentais para assegurar uma combustão eficiente e minimizar os impactos ambientais.

2.1.4.2. Biodiesel

O biodiesel é um combustível líquido renovável, produzido através de lipídios, óleos ou gorduras de diversas fontes, como óleos vegetais (soja, girassol, mamona, babaçu, palma e de demais oleaginosas), gorduras animais (gado, porco, frango), óleos residuais, entre outros (CNP, 2012). O biodiesel é considerado uma alternativa aos combustíveis fósseis, por ser sustentável e não apresentar toxicidade, além da ausência de altos níveis de enxofre e compostos aromáticos que são encontrados no diesel de origem fóssil, resultando em redução das emissões de poluentes atmosféricos e GEE associadas a combustão.

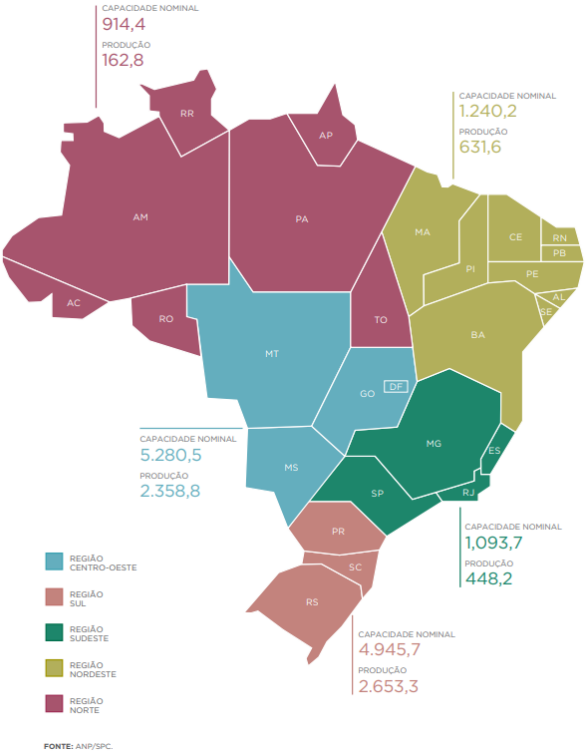
A produção de biodiesel é realizada por meio do processo químico denominado transesterificação, no qual os triglicerídeos presentes nos óleos e gorduras reagem com metanol ou etanol, gerando ésteres e glicerina (ANP, 2023). Os ésteres podem ser comercializados como biodiesel após passar por processos de purificação para adequação à especificação da qualidade, sendo destinado principalmente à aplicação em motores do ciclo Diesel (ANP, 2023). O biodiesel possui a vantagem de se adaptar facilmente aos motores de ciclo Diesel, eliminando a necessidade de grandes conversões e modificações em comparação com outros combustíveis alternativos (D'Agosto, 2015). As misturas de biodiesel e diesel são conhecidas mundialmente como "fator B", o qual indica a quantidade de biodiesel em qualquer mistura de combustível. A especificação do biodiesel tem sido aprimorada constantemente ao longo dos anos, para garantir a qualidade e alinhamento com as normas internacionais, proporcionando maior segurança e previsibilidade aos agentes econômicos no mercado brasileiro.

No Brasil, a principal matéria-prima para a produção do biodiesel é a soja, devido ao vasto potencial agrícola e o clima favorável para o cultivo de diversas oleaginosas (EMBRAPA, 2021). Em 2022, a soja representou 65,8% do total de matéria-prima utilizada para a produção

do biodiesel. Sendo as demais matérias-primas utilizadas incluindo óleo de fritura usado e outros materiais graxo e, em menor porcentagem, as gorduras bovinas, de frango e de porco (ANP, 2023).

Em 2022, foram produzidos 6.254.736 m³ de biodiesel (ANP, 2023). A capacidade nominal de produção de biodiesel (Figura 6) no Brasil foi de cerca de 13,7 milhões de m³, o que corresponde a 37,4 mil m³ ao dia. O Brasil destaca-se como o maior produtor e exportador de soja produzida no mundo, possuindo uma área cultivada de 36,9 milhões de hectares e uma produção de 128,5 milhões de toneladas (Brito *et al.*, 2021). De acordo com as informações do Anuário Estatístico Brasileiro do Petróleo, Gás e Biocombustíveis 2023, a unidade produtora com a maior capacidade instalada de biodiesel está localizada em Rondonópolis, Mato Grosso (ANP, 2023).

Figura 6 - Capacidade de produção do biodiesel, de acordo com as regiões do Brasil



Fonte: ANP, 2023.

2.1.4.3. Gás Natural Veicular (GNV)

O Gás Natural (GN) tem se destacado como uma importante fonte na matriz energética mundial, representando 23% da demanda global de energia em 2019 (BNDES, 2021). Esse destaque deve-se à sua reputação como o combustível fóssil de queima mais limpa, contribuindo para a redução das emissões de poluentes atmosféricos e de GEE, o que melhora a qualidade do ar (BNDES, 2021). Com a crescente preocupação ambiental, o Gás Natural Veicular (GNV) ganha destaque como uma alternativa para a utilização do diesel no transporte coletivo de passageiros.

O GN, principal matéria-prima do GNV, é extraído associado ou não ao petróleo. É uma substância composta por hidrocarbonetos, com destaque para o CH_4, etano (C_2H_6) e o propano (C_3H_8), formados a partir da degradação de matéria orgânica de origem animal e vegetal em ambiente com pouco oxigênio e condições de elevada temperatura e pressão (ANP, 2020). Após a extração, o GN é transportado através de dutos até uma unidade de processamento, onde passa por tratamento e processo de liquefação para se transformar em Gás Natural Liquefeito (GNL) (ANP, 2020). Durante esse processo, o GN é resfriado a temperaturas extremamente baixas, normalmente em torno de -160°C, transformando-o do estado gasoso para o estado líquido, reduzindo significativamente o seu volume, facilitando o transporte e armazenamento.

Posteriormente, o GNL é transportado até instalações de regaseificação, conhecidas como "*city gate*", onde é revertido para o estado gasoso para distribuição como Gás Natural Comprimido (GNC) (ANP, 2020). A regaseificação não só envolve a conversão do GNL para gás, mas também ajustes de pressão para garantir a distribuição adequada. Após essa etapa, o gás é transportado através de dutos até os postos de abastecimento, onde é disponibilizado como GNV para uso veicular.

No contexto brasileiro, a produção predominantemente associada ao petróleo atende a uma variedade de setores, desde o atendimento térmico residencial, gás de cozinha, indústrias, usinas até a propulsão de veículos. A ANP atua como a entidade reguladora responsável pelas várias etapas do produto, garantindo o controle das fases produtivas e a qualidade do produto (D'Agosto, 2015).

2.1.4.4. Eletricidade

A matriz energética brasileira, de acordo com os dados divulgados do BEN relativos ao ano base 2021, é composta por uma diversidade de fontes, sendo 48,4% de fontes renováveis e

51,6% de fontes não renováveis. As fontes renováveis incluem hidráulica, biomassa de cana, lenha e carvão vegetal e outras. Já as fontes não renováveis incluem petróleo e derivados, GN, carvão mineral, entre outras (BEN, 2022). Por outro lado, a matriz energética mundial é predominantemente composta por fontes não renováveis, como o carvão, petróleo e GN (IEA, 2022).

A fonte hidráulica, que é composta por usinas hidrelétricas, pequenas centrais hidrelétricas e centrais geradoras hidrelétricas, representou a maior parcela na geração de energia, contribuindo com 63,1% do total (EPE, 2023a). As demais fontes responderam pelo restante, com destaque para a energia eólica (12,1%), biomassa (7,6%) e geração termelétrica a gás natural (6,2%) (EPE, 2023a). O Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023, destaca um aumento significativo de 79,8% na geração solar de energia entre os anos de 2021 e 2022. Em contrapartida, observou-se uma redução de 52,9% na geração proveniente de combustíveis fósseis (EPE, 2023a). No total, a geração de energia elétrica no Brasil, proveniente de centrais de serviço público e autoprodutores, alcançou 677,1 TWh em 2022 (EPE, 2023b).

Na cadeia de produção de energia, a eletricidade gerada em usinas hidrelétricas, turbinas eólicas e usinas termelétricas é transformada por turbinas e transportada por linhas de transmissão de alta tensão. Essas linhas são compostas por torres altas e cabos, permitindo elevar os níveis de tensão da energia para reduzir perdas ao longo das distâncias percorridas. Posteriormente, a energia é transportada para estações de distribuição, onde a tensão é reduzida antes de ser distribuída para ser consumida em pontos comerciais e residenciais, bem como para pontos de abastecimento de veículos (EPE, 2022).

No Brasil, o Ministério de Minas e Energia (MME) é a instituição responsável por formular os princípios básicos e diretrizes da política energética nacional, promovendo estudos e análises para o planejamento do setor energético. A Empresa de Pesquisa Energética (EPE), vinculada ao MME, instituída nos termos da Lei n° 10.847, de 15 de março de 2004, e do Decreto n° 5.184, de 16 de agosto de 2004, é a instituição responsável por prestar serviços de pesquisas destinados a subsidiar o planejamento do setor energético brasileiro (BEN, 2022).

No Brasil, a alternativa da tecnologia elétrica para o transporte coletivo de passageiros está alinhada com o compromisso de reduzir a emissão de GEE, assumido no Acordo de Paris (2015), além disso, contribui para os objetivos constantes na Política Nacional de Mobilidade

Urbana Nacional (EPE, 2020). Os benefícios da eletrificação de veículos só são encontrados quando a matriz de produção de energia elétrica que os alimenta é proveniente de fontes de energia limpas e renováveis (BEN, 2022).

2.1.5. Fatores que influenciam nas emissões

A crescente preocupação com a poluição atmosférica e as mudanças climáticas têm impulsionado a busca por soluções sustentáveis e eficientes para o transporte coletivo de passageiros. Essa preocupação tem incentivado o desenvolvimento de motores mais limpos e eficientes, bem como promover a adoção de tecnologias, como os sistemas de controle de emissões e desenvolver combustíveis alternativos para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e de GEE, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar.

Os sistemas de controle de emissões desempenham um papel fundamental no cumprimento das normas ambientais e na redução das emissões associadas ao processo de combustão nos motores. No contexto brasileiro, destacam-se diversos sistemas de controle, como: o Filtro de Partículas Diesel (DPF, sigla em inglês para *Diesel Particulate Filter*); o Sistema de Recirculação de Gases de Escape (EGR, sigla em inglês para *Exhaust Gas Recirculation*); e o Sistema de Redução Catalítica (SCR, sigla em inglês para *Selective Catalytic Reduction*) (Varella e Santos, 2010). Os fabricantes de veículos têm direcionado seus esforços para aprimorar a eficiência operacional e reduzir as emissões, em conformidade com as regulamentações em vigor. No cumprimento das especificações estabelecidas na fase P-7 do Proconve, foram implementados a combinação do sistema EGR junto com o DPF ou a utilização do sistema SCR associado ao ARLA-32.

O EGR é uma tecnologia desenvolvida para reduzir a formação de NO_x por meio de recirculação controlada de parte dos gases de escape no sistema de exaustão do motor (DESPOLUIR, 2012). Essa recirculação reduz a disponibilidade de oxigênio durante a combustão e diminui a temperatura máxima do ciclo, limitando a formação de NO_x. Entretanto, essa estratégia pode resultar no aumento das concentrações de MP acima dos limites aceitáveis, afetando os componentes do motor. Com o intuito de mitigar esse efeito, a tecnologia EGR é frequentemente combinada com o uso do DPF para conter tais partículas (Muraro, 2016).

O DPF é um componente do sistema de exaustão utilizado em veículos com ciclo Diesel destinado a reduzir as emissões de MP nos gases de escape, garantindo a conformidade com as regulamentações e reduzindo a poluição do ar (DESPOLUIR, 2012). O DPF retém as partículas sólidas enquanto permite a passagem dos gases de escape através de um substrato poroso, frequentemente construído de cerâmica ou metal, com canais microscópicos. O DPF requer manutenção regular, incluindo limpeza ou substituição, para garantir desempenho ideal e a conformidade com as regulamentações de emissões (DESPOLUIR, 2012; Muraro, 2016).

A tecnologia SCR visa reduzir as emissões de NO_x através da utilização de um catalisador associado a um Agente Redutor Líquido (ARLA) composto de ureia ou amônia (DESPOLUIR, 2012). Quando os gases de escape passam pelo catalisador, o ARLA se decompõe, liberando amônia que reage com os NO_x convertendo-os em nitrogênio e água. Essa reação química ocorre em altas temperaturas, normalmente acima de 200°C. No Brasil, é adotado o ARLA-32, que é uma solução transparente de ureia em água desmineralizada, com uma concentração de 32,5% de ureia, regulamentadas pela Instrução Normativa nº23/2009 do IBAMA (IBAMA, 2009). De acordo com a legislação brasileira, o seu uso é obrigatório para veículos comerciais, como ônibus e caminhões e a fiscalização e distribuição são reguladas pelo Inmetro, em conjunto com o IBAMA. O consumo é de aproximadamente 5% em relação ao diesel (DESPOLUIR, 2012). Essa solução segue as diretrizes da norma ISO 22241 e é internacionalmente padronizado como o agente redutor, sendo denominadas como AdBlue na Europa e DEF nos EUA. O sistema SCR é monitorado por meio do sistema OBD (sigla em inglês para *On Board Diagnosis*), que detecta a ausência do reagente e outras possíveis falhas, reduzindo gradualmente a potência do veículo até o mínimo suficiente para conduzi-lo até um posto autorizado para repor a solução (Brasil, 2008).

A fase P-8 do Proconve trouxe regulamentações mais rígidas de emissões veiculares, com a obrigatoriedade de implementar simultaneamente as tecnologias EGR e SCR, sendo uma estratégia para maximizar a eficiência na redução de poluentes, especialmente de NO_x e MP. Em resumo, o funcionamento dessas tecnologias combinadas envolve a recirculação dos gases de escape utilizando o EGR para reduzir a formação de NO_x durante a combustão. Em seguida, o sistema DPF atua na retenção de partículas sólidas presentes nos gases de escape. Por fim, o sistema SCR utiliza um catalisador e um agente redutor, que é injetado no sistema, como o ARLA-32, para converter os NO_x em substâncias inofensivas. Esse sistema abrangente visa

atingir níveis significativamente reduzidos de emissões, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e o cumprimento das normas ambientais rigorosas.

Outro fator importante a ser considerado é a funcionalidade do motor, visto que esse é um equipamento capaz de converter diferentes formas de energia, como elétrica, hidráulica ou térmica, em energia mecânica, resultando no funcionamento dos veículos (Fogaça, 2015). Os motores à combustão interna convertem a energia proveniente da queima do combustível em energia mecânica e a classificação é baseada no ciclo de funcionamento, distinguindo-se entre motores de dois tempos, que completam o ciclo em dois cursos, e motores de quatro tempos, que o fazem em quatro cursos (Varella e Santos, 2010). Além disso, os motores a combustão interna podem ser subdivididos em dois tipos principais: os motores a combustão por faísca (ciclo Otto) e os motores a combustão por ignição espontânea (ciclo Diesel) (Brunetti, 2012).

Os motores a ciclo Diesel são amplamente adotados em veículos pesados devido à eficiência energética, durabilidade e potência de torque, sendo projetados para suportar condições extremas (Brunetti, 2012). Durante o processo de combustão em um motor de ciclo Diesel, o ar é comprimido a altas pressões e temperaturas (500 - 700ºC) dentro do cilindro, provocando a autoignição do combustível, eliminando a necessidade de uma centelha externa. A eficiência do motor depende da relação de compressão e a alta temperatura do ar comprimido promove a rápida vaporização e a mistura do diesel com o oxigênio, culminando na combustão e expansão dos gases que movem o pistão.

A combustão é um processo químico exotérmico que ocorre quando um combustível reage com um comburente, geralmente oxigênio. Dependendo da disponibilidade de oxigênio, a combustão pode ser completa ou incompleta. Na completa, há oxigênio suficiente para reagir totalmente com o combustível, levando à produção de CO_2 e água. Já na incompleta, devido à escassez de oxigênio, formam-se produtos parciais de combustão, como CO em vez de CO_2, além da formação de $NMHC$, NO_x e MP. Diversos fatores podem contribuir para a ocorrência da combustão incompleta, como relação desequilibrada entre ar-combustível, déficit de oxigênio, temperaturas inadequadas, problemas de ignição, impurezas e a qualidade do combustível (Brunetti, 2012).

Os motores a gás são projetados para utilizar o GNV como principal combustível, empregando uma faísca de ignição para inflamar a mistura de gás e ar dentro do cilindro, semelhante aos

motores do ciclo Otto. Em termos de potência e desempenho, tendem a oferecer maior torque em baixas rotações, adequados para aplicações que exigem força de tração (Brunetti, 2012). Contudo, a disponibilidade de uma infraestrutura de abastecimento específica é um desafio pois exige estações dedicadas que forneçam o GNV. No Brasil, a frota em circulação é composta basicamente por veículos híbridos, convertidos para o uso de GNV a partir da instalação de kits de conversão (BRASIL, 2014). Esses kits, conhecidos como kit *dual-fuel*, converte os motores originalmente projetados para o diesel para operar com mistura de diesel e GNV, oferecendo flexibilidade no uso dos combustíveis. Neste sistema, faz-se necessário apenas uma pequena injeção do diesel para que ocorra ignição da mistura ar-GNV. Durante a operação, o sistema controla a injeção simultânea de GNV e diesel em proporções variáveis, ajustadas de acordo com as condições de operação do motor. A porcentagem de mistura pode variar dependendo do projeto do motor, das configurações do sistema e das condições de operação, permitindo ajustes para atender uma ampla faixa de proporções de mistura, permitindo ajustar a quantidade de cada combustível conforme necessário para atender às demandas de potência, eficiência e emissões (Ribeiro, 2000). A proporção de mistura pode ser controlada por meio de sistemas de injeção de combustível, sistemas de controle eletrônico e ajustes nas taxas de injeção de cada combustível, podendo variar em cerca de 50% a 90% de GNV (Ribeiro, 2000; Franco, 2007).

Os motores elétricos operam convertendo energia elétrica em movimento para impulsionar o veículo. Para os ônibus, podem ser realizadas através de duas principais tecnologias: trólebus ou bateria elétrica. Os trólebus se conectam diretamente a uma rede aérea por meio de catenárias para abastecimento de energia. Por outro lado, os ônibus elétricos movidos a bateria elétrica (*Battery Electric Bus*), também conhecidos como ônibus elétricos puros, operam exclusivamente com a energia armazenada em um conjunto interno de baterias, eliminando a dependência de motores de combustão convencionais (Mahmoud *et al.*, 2016). Esses veículos exigem um sistema de infraestrutura de recarga, que pode ser de recarga rápida ou lenta, dependendo das necessidades do operador.

A recarga rápida, ou recarga de oportunidade (*fast charging*), é um método utilizado para ônibus com baixa autonomia e capacidade de bateria, envolvendo a instalação de infraestrutura de recarga em terminais, pontos de parada ou ao longo das rotas dos ônibus. Esse tipo de recarga pode ser realizado através de pantógrafos ou sistemas indutivos, cada um com suas vantagens e desvantagens em termos de espaço e custo (IEA, 2022). Por outro lado, a recarga lenta ou semirrápida (*overnight depot charging*) é realizada nas garagens dos ônibus, sendo mais

adequada para veículos com maior autonomia e capacidade de bateria (IEA, 2022). Os ônibus de recarga rápida possuem baterias menores, o que limita seu alcance a cerca de 30 a 50 quilômetros, mas podem ser recarregados rapidamente, em 5 a 10 minutos, atingindo de 80% a 100% de carga. Por outro lado, os ônibus de recarga lenta possuem um conjunto de baterias relativamente maior, permitindo um alcance mais amplo de até 320 quilômetros, porém exigindo um tempo de recarga mais longo, de 2 a 4 horas (Mahmoud *et al.*, 2016).

Os veículos híbridos elétrico-diesel combinam um motor de combustão interna com um motor elétrico para propulsão, oferecendo maior eficiência e redução de emissões em comparação com veículos movidos exclusivamente a combustíveis fósseis. A tecnologia híbrida plug-in permite que os veículos híbridos recarreguem suas baterias internas a partir de fontes elétricas externas, proporcionando a capacidade de condução exclusivamente elétrica por um determinado alcance, podendo converter para a utilização do motor a combustão quando necessário (Mahmoud *et al.*, 2016).

2.1.6. Panorama das regulamentações ambientais para o setor de transporte

O setor de transporte rodoviário no Brasil está sujeito a um conjunto regulamentações ambientais, refletindo a necessidade de mitigar os impactos ambientais. Nesse contexto, destacam-se o Proconve e outras iniciativas governamentais, que não apenas estabelecem padrões para a redução de emissões, mas também alinham o setor aos objetivos mais amplos de descarbonização.

O Proconve, instituído pela Resolução CONAMA nº 18/1986, visa regular as emissões de poluentes provenientes dos escapamentos em veículos automotores, com o objetivo de mitigar os impactos negativos dessas emissões na qualidade do ar, especialmente em áreas urbanas (BRASIL, 1986). Os objetivos incluem controlar as emissões, promover o desenvolvimento tecnológico, desenvolver métodos e equipamentos de medição de emissões, conscientizar o público sobre a poluição do ar causados por veículos, implementar programas de manutenção e inspeção veicular, e incentivar melhorias nos combustíveis disponíveis para a frota nacional (BRASIL, 1986). A Lei 8.723/1993 reforçou as determinações do programa, impondo a redução dos níveis de emissões veiculares e igualdade de exigências para veículos importados (BRASIL, 1993; IBAMA, 2009).

Com o intuito de alcançar o objetivo de redução das emissões, o Proconve estabeleceu limites máximos de emissão, separados por fases de implementação, para diversos tipos de veículos comercializados no mercado brasileiro, dividindo-os em duas categorias: veículos leves (L), que inclui carros de passeio, SUVs, vans e picapes; e veículos pesados (P), que inclui caminhões, ônibus, entre outros, utilizados para transporte de cargas e passageiros em grande escala (IBAMA, 2011). O programa foi baseado nas regulamentações europeias, conhecidas como normas "EURO", contudo, existe uma defasagem da implementação do programa brasileiro em relação aos padrões adotados pela União Europeia. A Tabela 2 destaca o ano de implementação de cada fase do Proconve, a resolução CONAMA, o teor máximo de enxofre permitido em cada fase em parte por milhão (ppm) e a equivalência entre as normas brasileiras e europeias,

Tabela 2 – Informações sobre as fases do Proconve

Fase do Proconve	Ano de implementação	Resolução CONAMA	Teor de enxofre (ppm)	Norma EURO
P-1	1986 - 1993	Res. 18/1986	-	-
P-2	1994 – 1995	Res. 08/1993	3.000 a 10.000	EURO 0
P-3	1996 - 1999	Res. 08/1993	3.000 a 10.000	EURO I
P-4	2000 – 2005	Res. 08/1993	3.000 a 10.000	EURO II
P-5	2006 – 2008	Res. 315/2002	500 a 2.000	EURO III
P-6	Nunca implementada	Res. 318/2002	500	EURO IV
P-7	2012 - 2022	Res. 403/2008	10	EURO V
P-8	2022 –	Res. 490/2018	10	EURO VI

Fonte: Adaptado de Miller e Posada (2019) e CNT (2012).

Os limites de emissão (Tabela 3) foram alcançados, até a fase P-5, através de avanços nas tecnologias dos motores, como a ingestão de combustível controlada eletronicamente e o uso de dispositivos de refrigeração (CNT, 2012). A fase P-6 não foi implementada pois o Brasil não conseguiu cumprir os limites estabelecidos, devido à escassez de diesel adequado. Na fase P-7, foram adicionados os sistemas de pós-tratamento dos gases de escape, como o EGR e SCR, exigindo o tratamento e a conversão desses gases. A implementação desses sistemas só ocorreu devido à redução nos níveis de enxofre contidos no diesel (CNT, 2012). Isso significa que, sem

o uso de combustíveis com teores de enxofre inferiores a 500 partes por milhão (ppm), os sistemas poderiam se deteriorar. Portanto, para cumprir a fase P-7, tanto a indústria automotiva quanto os produtores de combustível tiveram que realizar investimentos e adaptações, alinhando os motores ao combustível utilizado (CNT, 2012).

Para a fase P-8, a Resolução CONAMA nº490/2018 estabeleceu novos limites máximos de emissão para os gases de escapamento (Tabela 3), e de ruído, assim como o cronograma para a implementação da fase a partir de janeiro de 2023 (CONAMA, 2018). No entanto, a implementação foi adiada devido a desafios externos, incluindo a pandemia, que afetou a produção e aquisição de veículos com novas tecnologias. Outros obstáculos adicionais incluíram o envelhecimento da frota em circulação no país e a necessidade de adaptações para atender aos critérios da fase P-8, como a incorporação de sistemas de injeção de combustível e pós-tratamento de gases, sistemas OBD, e requisitos de durabilidade. Essas mudanças resultaram em um aumento na demanda pelo composto ARLA-32, gerando custos significativos para a implementação e manutenção, com a responsabilidade de atender aos limites de emissão recaindo, principalmente, sobre os fabricantes de veículos (Brasil, 2018).

Tabela 3 - Limites de emissão de poluentes atmosféricos ao longo das fases do Proconve

Fase do Proconve	CO (g/KWh)	NO_x (g/KWh)	MP (g/KWh)	Número de Partículas (número/KWh)
P-1	14,00	18,00	Não há	Não há
P-2	11,20	14,40	0,60	Não há
P-3	4,90	9,00	0,40 ou 0,70	Não há
P-4	4,00	7,00	0,15	Não há
P-5	2,10	15,00	0,10 ou 0,13	Não há
P-6	1,5	3,50	0,02	Não há
P-7	1,5	2,0	0,02	Não há
P-8	1,5	0,4	0,01	$6{,}0 \times 10^{11}$

Fonte: Adaptado de Miller e Posada (2019) e CNT (2012).

O Programa de Controle de Emissões de Gases Poluentes para ciclomotores, motociclos veículos similares (Promot), instituído pela Resolução CONAMA nº 297/2002, visou estabelecer limites para as emissões de poluentes de veículos leves, incluindo o controle de ruídos (BRASIL, 2002; IBAMA, 2022). O sucesso desses programas pode ser atribuído a um cronograma bem elaborado, com etapas progressivamente mais rigorosas e adaptadas à realidade brasileira (IBAMA, 2011). De acordo com dados do IBAMA, a implementação do Proconve e do Promot resultou em uma redução de 98% nas emissões dos poluentes emitidos

por fonte veicular, incluindo veículos leves e pesados, mesmo diante do aumento da frota brasileira (IBAMA, 2022).

Além desses programas, o Brasil formalizou outras políticas, programas, projetos e estratégias na tentativa de buscar melhorarias para o setor de transporte rodoviário, incluindo o de coletivo de passageiros, principalmente para minimizar os impactos ambientais e de saúde humana. A Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), regulamentada pela Lei Federal nº 12.587/2012, é um marco regulatório, estabelecendo diretrizes para o planejamento e a gestão da mobilidade nas áreas urbanas do país (Brasil, 2012). A PNMU visa promover a integração eficiente de diferentes modos de transporte, priorizando o transporte público coletivo e incentivando práticas sustentáveis, além de promover o desenvolvimento técnico-científico e o uso de energias renováveis. Sua implementação ocorre predominantemente em nível municipal, sendo os municípios responsáveis pela elaboração e execução dos planos (Brasil, 2012). Contudo, a PNMU não define instrumentos específicos para implementar sistemas com baixas emissões nas cidades que são obrigadas a elaborar um Plano de Mobilidade Urbana.

O Programa Combustível do Futuro é uma iniciativa que busca promover o desenvolvimento e a implementação de tecnologias sustentáveis no setor de combustíveis, visando reduzir impactos ambientais e impulsionar a transição para fontes mais limpas e renováveis, criada em 2021 por meio da Resolução CNPE nº 07/2021 (BRASIL, 2021). A abordagem do "Combustível do Futuro" alinha-se à crescente demanda global por soluções energéticas de baixo carbono e o desenvolvimento de uma tecnologia veicular nacional para descarbonizar a matriz energética em busca da redução de GEE.

As políticas de estímulo aos biocombustíveis desempenham um papel crucial na busca por fontes de energia mais limpas e sustentáveis. O RenovaBio, instituída pela Lei nº 13.576/2017, estimula a produção e o consumo de biocombustíveis, estabelecendo metas de descarbonização (Brasil, 2017). O Programa Rota 2030, regulado pela Lei nº 13.755/2018, é uma iniciativa governamental que promove a competitividade e inovação na indústria automotiva, estabelecendo diretrizes para o desenvolvimento de veículos mais eficientes, seguros e sustentáveis. O programa é considerado o sucessor do extinto programa de incentivo Inovar Auto.

As políticas brasileiras para estimular a transição para tecnologias de baixas emissões refletem o compromisso do país com a sustentabilidade e a redução dos impactos ambientais. Um outro exemplo é a Lei nº 9.991/2000 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabelece diretrizes para o Programa de Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico do Setor de Energia Elétrica (P&D) (Brasil, 2000). Essa legislação visa inovações e a adoção de tecnologias mais limpas. Diversas iniciativas, como a Chamada de Projeto de P&D Estratégico nº 022/2018, intitulada "Desenvolvimento de Soluções em Mobilidade Elétrica Eficiente", buscam impulsionar a transição energética, incentivando fontes renováveis, eficiência energética e a redução de emissões de GEE (Brasil, 2024).

A introdução de ônibus elétricos no brasil ocorre principalmente por meio de projetos piloto e demonstrativos, envolvendo diversos participantes, como governos locais, empresas de energia, universidades, centros de pesquisa e desenvolvimento, fabricantes de ônibus e componentes, operadores de frota e outros interessados. Os projetos costumam ser financiados por órgãos governamentais e a maioria ocorre no âmbito local, buscando colher benefícios das tecnologias, incluindo ganhos ambientais pela redução de emissões, eficiência energética e redução de custos de operação e manutenção. Durante a implementação e operação, surgem novos participantes, como as empresas do setor de energia elétrica, que atuam como fornecedores de energia e sistemas de infraestrutura de recarga para ônibus. Essas empresas também desempenham um papel significativo no financiamento de frotas elétricas nas cidades, uma vez que têm interesse em participar de novos modelos de negócios relacionados à eletrificação.

A implementação de políticas que priorizem essa mobilidade de baixa emissão de carbono pode contribuir para a redução das emissões de GEE e fomentar a inovação e a modernização do setor de transportes. Incentivos financeiros, regulamentações claras e parcerias público-privadas são estratégias que poderiam ser exploradas para preencher essa lacuna e impulsionar a transição para um sistema de transporte mais eficiente e ambientalmente amigável.

2.2. REVISÃO DA LITERATURA

A seguir, serão abordados a análise dos artigos utilizados para revisão da literatura, que inclui a revisão bibliométrica e a revisão descritiva dos artigos.

2.2.1. Revisão bibliométrica

A revisão bibliométrica foi conduzida adotando-se a metodologia do Processo de Desenvolvimento do Conhecimento - Construtivista (ProKnow-C, sigla em inglês para *Process Knowledge Model for Systematic Review*) para seleção e avaliação de artigos científicos (Vilela, 2012). A metodologia ProKnow-C, desenvolvida pelo Laboratório de Metodologias Multicritério em Apoio à Decisão (LabMCDA - UFSC), surgiu devido à grande quantidade de trabalhos disponíveis e à necessidade dos pesquisadores de sistematizar a seleção de publicações relevantes para o tema de pesquisa (Bernardi, 2014). A eficácia do ProKnow-C está associada à capacidade de identificar, selecionar e avaliar artigos científicos, fornecendo uma boa estrutura para revisões bibliográficas. A pesquisa se concentra na revisão quantitativa da produção acadêmica e na análise qualitativa de conteúdo, considerando a relevância e contribuição dos trabalhos para o campo de estudo.

Essa metodologia consiste em quatro etapas: Seleção do banco de dados; Filtro e alinhamento do título; Filtro de reconhecimento científico; Filtro para alinhamento do artigo e formação do portifólio final (Vilela, 2012). O tema da pesquisa foi definido como "Análise *Well-to-Whell* dos ônibus do transporte público", e inicialmente foram realizadas buscas com as palavras-chave iniciais "*Well to wheel*" e "diesel" no portal periódico CAPES a fim de selecionar as bases de dados mais relevantes que se relacionavam com o tema definido. Assim, foram utilizadas as bases de dados científicas: *Scopus, Web of Science* e *Science Direct*.

Após a definição das bases de dados, foram estabelecidas as palavras-chave para a busca de artigos. Foram empregadas as expressões e termos *"Weel-to-wheel*" OR "WTW" AND "*public transport*" OR "*bus*" AND "*emission*" OR "*air quality*". O termo "*diesel*" foi incluído nas pesquisas para restringir ao tema escolhido. Foram utilizados os operadores OR e AND, sendo OR indicando a conjunção "ou" em português, para expressões com o mesmo sentido, e o operador AND que indica a conjunção "e" em português, utilizado entre expressões com sentidos variados. Foram selecionados apenas artigos que abordavam assuntos relacionados ao escopo da pesquisa, removendo artigos que tratavam sobre carros, bicicleta, veículos de carga, navios, assim como as análises relacionadas à produção de hidrogênio ou de biogás e a instalação dos carregadores de bateria. Porém, ao realizar a busca dos artigos que tratavam apenas da análise WTW no para o transporte, obtivemos um resultado de apenas 16 artigos, o que foi considerado como um banco de dados não representativo. Portanto, foram adicionadas

nas pesquisas as palavras-chave "*Life Cycle Assessment*" OR "LCA", e foram considerados os artigos que utilizaram a análise Avaliação do Ciclo de Vida para avaliar as emissões de poluentes atmosféricos ou GEE associadas aos ônibus do transporte público.

O período de pesquisa abrangeu um intervalo de nove anos, de 2016 a 2024. Os filtros foram aplicados para limitar a presença dos termos e expressões pesquisadas no título, no resumo ou nas palavras-chaves dos artigos. Como resultado, foi gerado um banco de dados composto por 42 artigos, os quais foram submetidos a um processo de triagem, onde foram removidas as duplicatas. A eliminação das duplicatas e as análises bibliométricas foram realizadas utilizando o software Rstudio R4.2.1. Por fim, foi realizada a leitura completa dos artigos selecionados, resultando em um banco de dados com 36 artigos (Tabela 4).

Tabela 4 – Informações dos artigos analisados

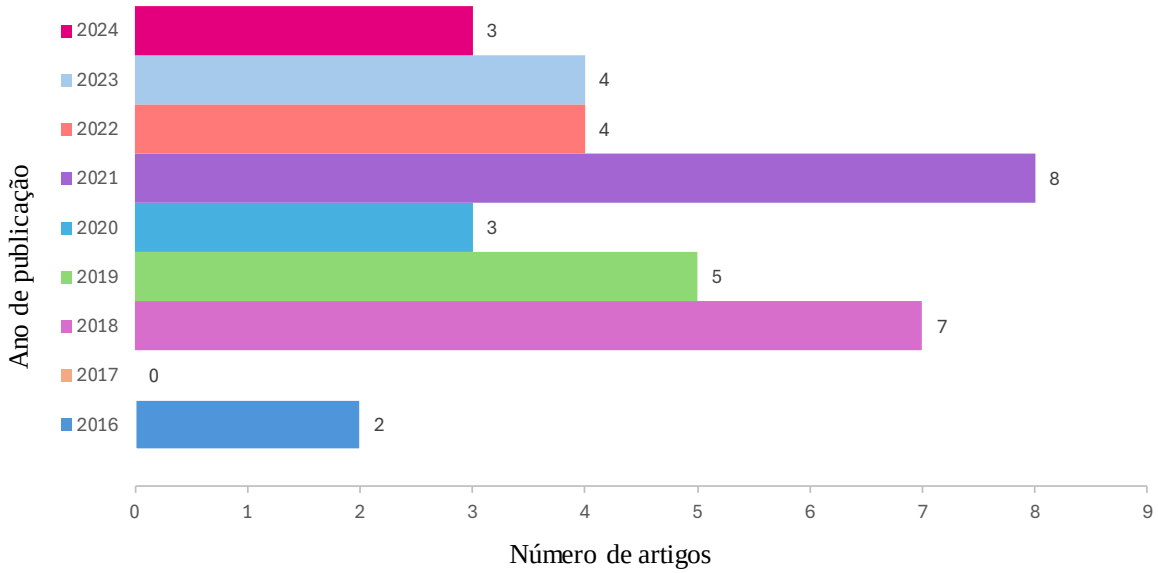
Autor	Ano	Combustível analisado	Tipo de Análise	Ferramenta utilizada	Região	Periódico
Orsi *et al.*	2016	Gasolina, Diesel, GN, Biocombustíveis, Elétrico	WTW	GREET; ADVISOR	EUA	Applied Energy
Schwertner &Weidmann	2016	Elétrico	WTW	-	Alemanha	Transportation Research Board
Bermond *et al.*	2018	Diesel, Biodiesel, GNV	WTW	-	Brasil	International Journal of Sustainable Transportation
Dreier *et al.*	2018	Diesel (B7), Elétrico, híbrido	WTW	GREET; ADVISOR	Brasil	Transportation Research Part D-Transport and Environment
He *et al.*	2018	Diesel, Elétrico, híbrido	WTW	GREET; MOVES	China	Journal Of Cleaner Production
Korol *et al.*	2018	Diesel, Elétrico	ACV	Ecoinvent; ReCiPe; SimaPRO	Polônia	Journal Of Cleaner Production
Song *et al.*	2018	Diesel, Elétrico	ACV	-	Macau (China)	Journal Of Cleaner Production
Tomic *et al.*	2018	Diesel, Elétrico, GNC	WTW	-	Sérvia	Systemsthermal Science
Topal & Nakir	2018	Diesel, Elétrico, GNC	WTW	MATLAB	Istambul (Turquia)	Energies
Chang *et al.*	2019	Diesel, Elétrico, híbrido	ACV	-	Taiwan	International Journal of Hydrogen Energy,
Correa *et al.*	2019	Diesel, Elétrico, Híbrido, HVO	WTW	GREET; ADVISOR	Argentina	Energy
Lee *et al.*	2019	Diesel, Elétrico, Célula de Hidrogênio	WTW	GREET; MOVES	EUA	Energy Policy
Shinde *et al*	2019	Diesel, GNC	ACV	GABI	Mumbai (Índia)	Clean Technologies and Environmental Policy
Nordelof *et al.*	2019	Diesel, Elétrico, Híbrido, HVO	ACV	Ecoinvent	Suécia	Transportation Research Part D: Transport and Environment
Molina *et al.*	2020	Diesel, Elétrico, híbrido	WTW	-	Espanha	Transportation Research Part D: Transport and Environment
Pathak *et al*	2020	Diesel, Elétrico	ACV	-	Singapura	Forschung Im Ingenieurwesen
Kang & Quesada	2020	Elétrico	WTW	-	Ammam (Jordânia)	Journal Of Public Transportation

Bazzara & Estrada	2021	Diesel, Elétrico	ACV	-	México	Sustainability
Chang & Huang	2021	Diesel, Elétrico	ACV	-	Taiwan	Environment, Development And Sustainability
Gabriel *et al.*	2021	Diesel, Elétrico, GNV	ACV	GREET; ReCiPe	Tailândia	Journal Of Cleaner Production
Gustafsson *et al.*	2021	Diesel, GNC, Elétrico, Biometano, HVO, GN	WTW	-	Suécia	Transportation Research Part D-Transport and Environment
Jelti *et al.*	2021	Híbrido, Elétrico, HVO	WTW	OpenLCA; GREET	Marrocos	International Journal of Hydrogen Energy
Leone *et al.*	2021	Diesel, Elétrico	WTW	MATLAB	Livigno (Itália)	Energies
Liu *et al.*	2021	Diesel, Elétrico	WTW	Regressão Linear	China	Atmospheric Pollution Research
Pourahmadiyan *et al.*	2021	Diesel, GNV, GNL	WTW	GHGenius; SimCenter	Canadá	Transportation Research Part D: Transport and Environment
Jakub *et al*	2022	Diesel, Elétrico, híbrido	ACV	Impact 2002+; Ecoinvent; COPERT	Polônia	Science Of the Total Environment
Luu *et al.*	2022	Diesel, Elétrico	ACV	ReCiPe; Datasmart	Vietnã	Energies
Kucukvar *et al*	2022	Elétrico	WTW	-	Europa	Journal Of Cleaner Production
Spoof-Tuom *et al.*	2022	Diesel, Biometano	WTW	-	Vaasa (Finlândia)	Clean Technologies
Coppola *et al.*	2023	Diesel, GNC, Elétrico	ACV	-	Itália	Case Studies on Transport Policy
García-Afonso	2023	Diesel, Elétrico, híbrido	WTW	MATLAB	Tenerife (Espanha)	Journal Of Cleaner Production
Hafdaoui *et al.*	2023	Diesel, Híbrido, Elétrico, HVO	WTW	Ecoinvent; GREET; OpenLCA; Indicator 99	Marrocos	World Electric Vehicle Journal
Regulski	2023	Diesel, Elétrico	ACV	-	Itália	Combustion Engines
Manuguerra *et al.*	2024	Diesel, Elétrico	ACV	Ecoinvent; Machine learning	Itália	Journal Of Cleaner Production
Miraftabzadeh *et al.*	2024	Diesel, Elétrico	WTW	-	Itália	Heliyon
Nikzad *et al.*	2024	Diesel, GNV, Elétrico, híbrido	WTW	ADVISOR; GREET; MATLAB	Irã	International Journal Of Engineering

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Com base na avaliação dos 36 artigos, verificou-se que o ano em que teve mais artigos publicados foi em 2021 (8 artigos), seguido de 2018 (7 artigos) e 2019 (5 artigos). Os anos com os menores números de publicações foram 2016 (2 artigos), 2020 (3 artigos) e 2024 (3 artigos). Não foi encontrada nenhuma publicação relacionada ao tema no ano de 2017, dentro das três bases de dados pesquisadas. A Figura 7 apresenta o número de publicações de artigos por ano. Apesar de não fazer parte do escopo, um artigo do ano de 2012 foi considerado na pesquisa devido as informações de referência contidas no estudo.

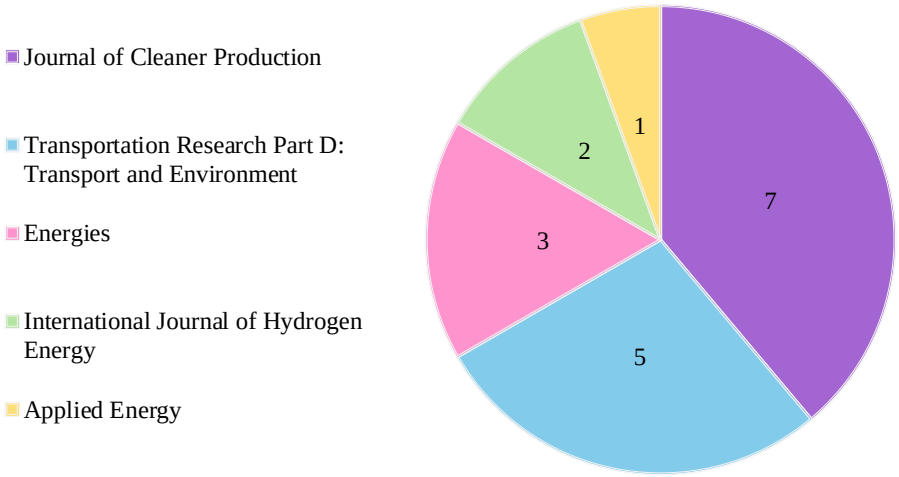
Figura 7 - Número de artigos por ano



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em relação aos periódicos, constatou-se que as publicações provêm de 23 periódicos distintos. A Figura 8 apresenta o número de publicação por periódico. O destaque principal foi o *Journal of Cleaner Production*, que apresentou 7 artigos publicados. Em seguida está o *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, com 5 artigos, seguido pelo *Energies*, que publicou 3 artigos e *International Journal of Hydrogen Energy*, com 2 artigos. O periódico *Applied Energy* publicou 1 artigo. Os demais periódicos contribuíram com apenas um artigo cada. O fator de impacto SJR (*Scientific Journal Rankings*) dos principais periódicos são classificados com Q1, exceto para o *Applied Energy* que se classifica como Q2. O Brasil teve dois artigos publicados, um no periódico *Transportation Research Part D-Transport And Environment* (Dreier *et al.*, 2018) e o outro no periódico *International Journal Of Sustainable Transportation* (Bermond *et al.*, 2018).

Figura 8 - Publicação por periódico

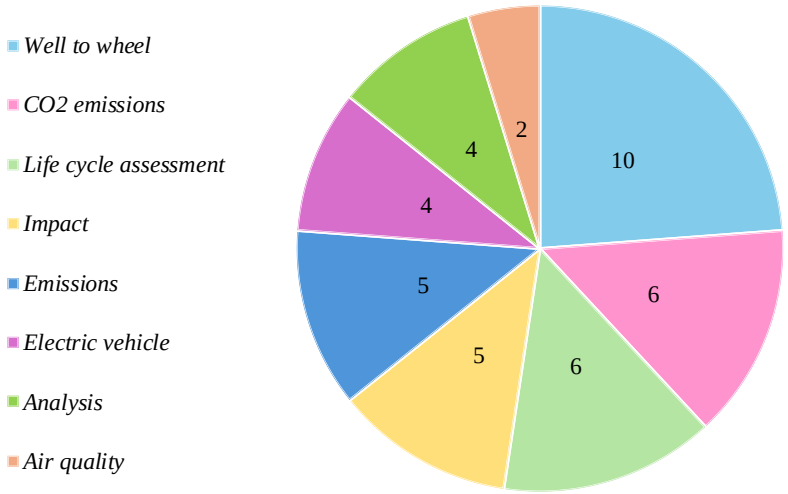


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A análise da distribuição geográfica das publicações revela que a Itália lidera com 5 artigos publicados, seguida pela China, que registrou 3 publicações. Em seguida, encontramos Suécia, Brasil, Estados Unidos, Espanha, Taiwan e Polônia, cada um contribuindo com 2 publicações. Além disso, países como Alemanha, Marrocos, Irã, México, Tailândia, Vietnã, Canadá, Finlândia, Jordânia, Singapura, Índia, Turquia e Argentina também estão representados, cada um com uma publicação. Essa diversidade geográfica reflete a amplitude internacional e o interesse global nas questões abordadas nas pesquisas.

Ao examinar as frequências das palavras-chave nas publicações (Figura 9), algumas se destacam. O termo "*Well to wheels*" aparece em 10 artigos, seguida por "*CO2 emissions*" e "*Life cycle assessment*", ambas aparecem em 6 artigos. As palavras "*Impact*" e "*Emissions*" aparecem em 5 artigos cada, enquanto "*Electric vehicle*" e "*Analysis*" aparecem em 4 artigos. O termo "*Air quality*" aparece em 2 artigos. Os demais termos aparecem apenas uma única vez. Essas palavras-chave refletem áreas de interesse comum e foco dentro das pesquisas, como os métodos de análise, as emissões de carbono, os impactos e emissões.

Figura 9 - Palavras-chave



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Dos 36 artigos analisados, constatou-se que 22 deles utilizaram a análise WTW como metodologia, enquanto 15 optaram por utilizar a ACV. Dentre os trabalhos que utilizaram a análise ACV, alguns trabalhos optaram por utilizar outros tipos de abordagens combinadas, como a ecoeficiência (Bernard *et al.*, 2018), treinamento e aprendizado de máquina (Manuguerra *et al.*, 2024), desenvolvimento de modelos (Schwertner e Weidmann, 2016), modelagem de otimização (Bazzara e Estrada, 2021), simulação utilizando o Matlab (Topal e Nakir, 2018; Leone *et al.*, 2021; Nikzard *et al.*, 2024) e análises através de regressão linear (Liu *et al.*, 2021; Regulski, 2023).

Ao avaliar as bases de dados utilizadas nos artigos analisados, observa-se uma variedade de fontes empregadas pelos pesquisadores. Seis artigos optaram pelo uso do *Ecoinvent*, em diferentes versões (Korol *et al.*, 2018; Nordelof *et al.*, 2019; Jelti *et al.*, 2021; Jakub *et al.*, 2022; Hafdaoui *et al.*, 2023; Manuguerra *et al.*, 2024). Dois artigos mencionaram o uso do *Moves*, que é uma base de dados específica para informações relacionadas ao transporte (He *et al.*, 2018; Lee *et al.*, 2019). Além disso, cinco artigos fizeram uso de dados locais, como dados da prefeitura e do governo, dados da agência de energia e dados de informações da empresa de transporte. Uma única pesquisa envolveu medições diretas nos veículos, evidenciando uma abordagem mais direta na coleta de dados. Por fim, quatro artigos basearam suas análises em informações provenientes de outros artigos, destacando a importância da referência bibliográfica entre estudos prévios para a condução de pesquisas. Seis artigos analisados não forneceram informações sobre base de dados ou referência das informações utilizadas.

Ao examinar as ferramentas e os modelos utilizados nos artigos analisados, destaca-se que nove artigos optaram pela utilização do modelo GREET (*Greenhouse Gases, Regulated Emissions, and Energy Use in Transportation*), que é uma ferramenta de modelagem desenvolvida pelo *Argonne National Laboratory* (Nylund *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2019; Gabriel *et al.*, 2021; Hafdaoui *et al.*, 2023). Dentre esses nove, cinco utilizaram uma combinação com o ADVISOR, que é uma ferramenta de modelagem de sistemas de propulsão de veículos desenvolvida pela mesma instituição (Orsi *et al.*, 2016; Dreier *et al.*, 2018; He *et al.*, 2018; Correa *et al.*, 2019; Nikzad *et al.*, 2024). Além desses, um artigo fez uso do programa COPERT para calcular as emissões (Jakub *et al.*, 2022).

No que diz respeito aos softwares utilizados nos artigos analisados, destaca-se que dois artigos mencionaram o uso do OpenLCA (Jelti *et al.*, 2021; Hafdaoui *et al.*, 2023), que é uma ferramenta de ACV amplamente utilizada. Além disso, houve menções a diversos outros softwares: um artigo utilizou o SimaPro (Chang *et al.*2019), outro o Crystalball (Song *et al.*, 2018), enquanto um terceiro fez uso do Datasmaty (Luu *et al.*, 2022) e outro do Gabi (Shinde *et al.*, 2019). Dois artigos empregaram o GHGenius em suas análises (Nylund *et al.*, 2012; Pourahmadiyan *et al.*,2021).

Quanto aos métodos de análise de categorias de impacto, foi constatado que apenas os estudos que utilizaram a análise ACV realizaram as análises de impacto ambiental. Dentre os 15 artigos que utilizaram essa avaliação, apenas 6 forneceram detalhes sobre os métodos específicos empregados. Dois artigos adotaram o método Eco Indicator 99 (Jelti *et al.*, 2021; Hafdaoui *et al.*, 2023), três artigos optaram pelo método ReCiPe (Korol *et al.*, 2018; Gabriel *et al.*, 2021; Luu *et al.*, 2022) e um estudo utilizou o método Impact 2002+ (Jakub *et al.*, 2022).

Quanto aos combustíveis analisados, observa-se que a maioria dos estudos considera o diesel e a eletrificação como focos de análise principais. Apenas seis artigos não levam em conta a eletrificação da frota em suas análises (Nylund *et al.*, 2012; Orsi *et al.*, 2016; Bermond *et al.*, 2018; Shinde *et al.*, 2019; Pourahmadiyan *et al.*, 2021; Spoof-Tuom *et al.*, 2022). Onze artigos abordam a questão dos veículos híbridos (Dreier *et al.*, 2018; He *et al.*, 2018; Chang *et al.*, 2019; Corre *et al.*, 2019; Nordelof *et al.*, 2019; Molina *et al.*, 2020; Jelti *et al.*, 2021; Jakub *et al.*, 2022; García-Afonso *et al.*, 2023; Hafdaoui *et al.*, 2023; Nikzad *et al.*, 2024), enquanto seis consideram a utilização de células de hidrogênio como uma alternativa viável (Correa *et al.*, 2019; Lee at al., 2019; Nordelof *et al.*, 2019; Jelti *et al.*, 2021; Gustafsson *et al.*, 2021; Hafdoui

et al., 2023). Dois artigos avaliam o biometano (Gustafsson *et al.*, 2021; Spoof-Tuom *et al.*2022), enquanto dois outros se concentram no biodiesel (Orsi *et al.*, 2016; Bermond *et al.*, 2018). Além disso, o GNV ou GNC também é uma área de interesse, abordada em nove dos artigos revisados (Orsi *et al.*, 2016; Bermond *et al.*, 2018; Tomic *et al.*, 2018; Topal e Nakir, 2018; Gabriel *et al.*, 2021; Gustafsson *et al.*, 2021; Pourahmadiuan *et al.*, 2021; Coppola *et al.*, 2023; Nikzad *et al.*, 2024).

2.2.2. Revisão descritiva

As preocupações ambientais têm gerado uma crescente demanda por avaliações detalhadas do impacto das emissões no setor de transporte, especialmente para o contexto dos ônibus. As análises WTW surgem como ferramentas essenciais na avaliação dos impactos das emissões do setor de transporte, permitindo monitorar as emissões e desenvolver soluções para mitigar os impactos negativos. Conforme evidenciado na revisão bibliométrica, estudos recentes como os de García-Afonso (2023), Spoof-Tuom *et al.* (2022), Leone *et al.* (2021), Gustaffson *et al.* (2021), He *et al.* (2018) têm utilizado a análise WTW para investigar diferentes aspectos relacionados ao ciclo de vida dos ônibus, contribuindo com a compreensão da complexidade real das emissões associadas aos diferentes combustíveis, visando identificar potenciais benefícios ambientais. Essas pesquisas abordam desde a influência dos combustíveis nas emissões de poluentes e de GEE até a adoção de novas tecnologias e mudanças na motorização.

No contexto do transporte público de passageiros, a escolha do combustível exerce uma influência direta nas emissões veiculares, sendo o diesel a opção é predominante devido à capacidade de fornecer alto torque e potência, aliada à infraestrutura disponível. A transição para diesel com baixo teor de enxofre (S-10) pode resultar em reduções nas emissões de substâncias nocivas associadas à queima de combustíveis fósseis. Além disso, a implementação de sistemas de pós-tratamento dos gases de escapamento surge como uma estratégia eficaz na mitigação das emissões, conforme avaliado por Nylund e Koponen (2012). A análise WTW conduzida por Spoof-Tuom *et al.* (2022) enfatiza a eficácia dos sistemas de pós-tratamento de gases de escape ao longo do ciclo de vida dos ônibus, especialmente durante a fase de operação, destacando ainda a importância da manutenção regular para evitar falhas no controle das emissões.

Um dos principais enfoques dos estudos é a eletrificação da frota, que emerge como uma solução promissora para efetivamente reduzir as emissões. A transição de veículos movidos a diesel para veículos elétricos tem sido explorada em diversas regiões, incluindo China (Liu *et al.*, 2021), Singapura (Pathak *et al.*, 2020), Itália (Leone *et al.*, 2021; Miraftabzadeh *et al.*, 2024), Espanha (García-Afonso, 2023), Irã (Nikzad *et al.*, 2024), Marrocos (Hafdaoui *et al.*, 2023), Polônia (Jakub *et al.*, 2022), Suécia (Nordelöf *et al.*, 2019; Gustafsson *et al.*2021; Spoof-Tuom *et al.*, 2022), Tailândia (Gabriel *et al.*, 2021), Vietnã (Luu *et al.*, 2022), entre outros. Além de reduzir as emissões, a eletrificação da frota de veículos pode diminuir a dependência de combustíveis fósseis, reduzindo a necessidade importações externas e às flutuações do mercado, enquanto contribui significativamente para a mitigação das mudanças climáticas (Liu *et al.*, 2021).

A redução das emissões associadas à eletrificação dos veículos ocorre devido ao fato de que esses veículos, durante a operação, não dependem da combustão de combustíveis fósseis para gerar a energia necessária para se locomoverem, resultando em uma redução de 100% das emissões de poluentes atmosféricos e GEE associados a esse processo (Liu *et al.*, 2021; Chang e Huang, 2021 Jakub *et al.*, 2022; Miraftabzadeh *et al.*, 2024). Entretanto, para os veículos elétricos, a fase de extração e fabricação da matéria-prima (WTP) representa a maior contribuição para as emissões ao longo do ciclo de vida, devido ao mix de geração de energia adotado no país ou à utilização de carvão na produção de baterias (Jelti *et al.*, 2021). Isso contrasta com os veículos movidos a diesel e GNV, nos quais a fase de operação (PTW) é responsável pela maior parte das emissões (Chang e Huang, 2021; Miraftabzadeh *et al.*, 2024).

Para avaliar o potencial de redução das emissões na eletrificação da frota, é crucial considerar as fontes de geração de energia utilizadas no país, especialmente para o carregamento das baterias (Korol *et al.*, 2018; Jelti *et al.*, 2021). A transição para fontes de energia mais limpas e renováveis, como a redução do uso de carvão ou de combustíveis fósseis na matriz elétrica, pode resultar em menores emissões de GEE e poluentes atmosféricos durante a produção, proporcionando melhorias para a qualidade do ar (Orsi *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2021; Jakub *et al.*, 2022; Miraftabzadeh *et al.*, 2024). Um estudo realizado por García-Afonso (2023) em Tenerife, na Itália, demonstrou uma redução de 28% nas emissões de CO_2e do ciclo total WTW ao comparar ônibus elétricos com ônibus a diesel, levando em conta todas as condições de tráfego da via e as fontes de geração de energia atuais. Contudo, a adoção de fontes de energia renováveis e combustíveis mais limpos pode resultar em uma redução ainda maior nas emissões

totais dos veículos elétricos, como também demonstrado por Molina *et al. (*2020) na Espanha, onde a inserção de ônibus elétrico na frota já proporciona redução de emissões, mas a neutralidade só é alcançada com uma transição para um sistema de fontes 100% renováveis.

Por exemplo, no Irã, Nikzard *et al.* (2024) compararam os ônibus elétricos com ônibus a diesel e observaram que as emissões dos ônibus elétricos não diferem muito ao analisar o ciclo completo (WTW), devido às fontes de produção de energia predominantes no país. No entanto, ao considerar usinas de energia renovável para a produção de eletricidade, é possível reduzir em até 93%, evidenciando a importância de países que dependem de fontes fósseis considerarem a necessidade de modificar sua matriz de geração de energia ao planejar a eletrificação de suas frotas, estimulando a criação de políticas de mitigação de poluição e mudanças regulatórias para a mistura de energia, principalmente no setor de transporte (Hafdaoui *et al.*, 2023; Miraftabzadeh *et al.*, 2024). A convergência de veículos elétricos com a transição para fontes de energia renovável pode desempenhar um papel crucial na descarbonização simultânea dos setores de transporte e eletricidade, enfatizando a importância de fomentar a adoção de veículos elétricos em conjunto com esforços direcionados para uma transição para fontes de energia mais limpas (Kucukvar *et al.*, 2022).

No entanto, é crucial considerar as diversas barreiras enfrentadas na eletrificação da frota, que incluem questões tecnológicas, financeiras e institucionais (Hafdaoui *et al.*, 2023). Entre os principais desafios financeiros associados à eletrificação da frota está à aquisição de novos veículos equipados com tecnologias mais avançadas (Gabriel *et al.*, 2021). Miraftabzadeh *et al. (*2024) destacam que, embora os custos iniciais de aquisição e investimentos adicionais para ônibus elétricos possam ser mais altos do que para ônibus a diesel, uma análise do custo total ao longo de 15 anos sugere que os ônibus elétricos podem se tornar economicamente vantajosos ao longo do tempo. Os veículos elétricos a bateria tende a apresentar custos operacionais e de manutenção mais baixos, além de uma vida útil prolongada (Kang e Quezada, 2020). Essa relação custo-benefício, aliada aos benefícios ambientais, reforça o argumento para a adoção de ônibus elétricos como parte de sistemas de transporte sustentáveis, representando uma alternativa eficaz para o sistema de transporte público no futuro, especialmente se houver uma aceleração na produção em massa e condições competitivas de mercado (Topal e Nakir, 2018).

Além dos custos associados à aquisição de veículos, a instalação da infraestrutura de rede e carregamento das baterias também representa um investimento significativo (Hafdaoui *et al.*,

2023). Miraftabzadeh *et al.* (2024) destacam que um dos principais desafios enfrentados é a autonomia limitada dos veículos elétricos e o tempo necessário para recarga. Para enfrentar esse desafio, García-Afonso (2023) sugere estratégias como promover ônibus que utilizam o modo de carga oportunista ou realizam carregamento no final da linha, evitando assim a necessidade de carregamento durante a noite nas garagens. Isso ampliaria o potencial de redução das emissões de GEE, devido à menor intensidade de carbono da rede. Outra estratégia evidenciada por Molina *et al.* (2020) é a remodelação da curva de demanda de eletricidade e a implementação de soluções de carregamento inteligentes. A adoção em massa de carregadores elétricos de bateria para atender à rede de transporte público deve ser cuidadosamente planejada por meio de políticas energéticas, para evitar impactos negativos no sistema de geração com a demanda adicional de eletricidade, principalmente durante horários de pico (Molina *et al.*, 2020).

Song *et al.* (2018) enfatizam a importância de o Governo oferecer incentivos fiscais para a compra de veículos elétricos e promover o uso do transporte público em massa, o que pode contribuir significativamente para reduzir as emissões provenientes do transporte individual. Por exemplo, subsídios e benefícios fiscais são mencionados como formas de estimular a adoção de veículos elétricos, além de outras práticas como a adoção de biocombustíveis e políticas de neutralidade de carbono, implementação de cobranças com base nas emissões de veículos e o desenvolvimento de sistemas de medição inteligente para cobrança de eletricidade usada por proprietários, são medidas que influenciam a compra de veículos elétricos na Europa (Kucukvar *et al.*, 2022). Além disso, políticas abrangentes são necessárias para impulsionar a mudança da frota e melhorar a eficiência energética operacional no setor de transportes (Hafdaoui *et al.*, 2023). Estratégias financeiras e incentivos podem melhorar a viabilidade financeira dos ônibus elétricos, incluindo esquemas de leasing, precificação preferencial de eletricidade e investimentos em infraestrutura de carregamento (Kang e Quezada, 2020).

O aumento da ocupação dos ônibus pode ter um impacto significativo na redução do consumo específico de energia. Além da tecnologia do trem de força, a taxa de ocupação dos ônibus também desempenha um papel crucial na eficiência energética. O aumento do número de passageiros resulta em uma diminuição do consumo de energia por passageiro. Um estudo ressalta que, do ponto de vista ambiental, é mais vantajoso ter ônibus a diesel bem ocupados do que ônibus elétricos vazios (Schwertner e Weidmann, 2016). Outro ponto importante a ser considerado na avaliação do desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida dos modos de

transporte é a diferença entre o uso do transporte público de passageiros e o uso de veículos individuais ou compartilhados por um número intermediário de pessoas. Essa distinção resulta em maiores emissões associadas ao transporte individual em comparação com o transporte público de passageiros. Esse aspecto é crucial para que os planejadores de transporte regional possam tomar medidas informadas e priorizadas visando melhorar o impacto ambiental do transporte público (Shinde *et al.*, 2019).

A motorização e o modelo de ônibus adotado podem ser fatores importante a serem considerado em termos de custos. Pathak *et al.* (2020) realizaram uma análise sobre a contribuição das emissões de ônibus de diferentes comprimentos e minivans elétricas, concluindo que além de apresentarem diferenças nas emissões, as minivans apresentaram melhores custos e menos emissão para atender a mesma rota em Cingapura. Além disso, He *et al.* (2018) avaliaram diferentes padrões de operação e condução dos veículos, constatando que os ônibus elétricos reduzem as emissões de CO_2 em todas as condições de operação, incluindo situações de grande fluxo de veículos e em baixas velocidades, quando comparados aos veículos a diesel ou híbridos.

Outro ponto a ser analisado são as condições do trajeto e do tráfego, pois influenciam diretamente nas escolhas, especialmente devido à limitada autonomia dos veículos elétricos em longos trajetos, apesar de sua potência. Leone *et al. (*2021) investigaram as condições para a adoção de veículos elétricos em uma região montanhosa no norte da Itália e encontraram resultados promissores na substituição de veículos a diesel por veículos elétricos. Além disso, Coppola *et al.* (2023) ressaltam a importância de considerar as condições de fornecimento de energia ao longo de todo o percurso da frota, bem como a capacidade de armazenamento de bateria e consumo dos veículos para garantir a viabilidade de veículos de longo alcance. Apesar das necessidades de instalações de carregamento de alta voltagem e do maior consumo de energia, o modelo elétrico traz enormes benefícios em comparação com a frota a diesel, tanto em termos econômicos a longo prazo quanto ambientais, devido à redução das emissões (Leone *et al.*, 2021). Barraza e Estrada (2021), ao investigarem um projeto para uma rede de ônibus elétricos eficientes, realizaram uma análise das opções de trens de força disponíveis. Seu estudo destaca a importância da otimização da rede e demonstra que os ônibus elétricos convencionais, com carregamento oportunista, apresentam o menor custo total do sistema. No entanto, a infraestrutura de recarga, a produção e o descarte de baterias, bem como a necessidade de reformulação das vias de transporte, representam desafios importantes a serem superados.

Diante disso, políticas abrangentes e medidas para impulsionar a mudança da frota e melhorar a eficiência energética operacional são cruciais para enfrentar essas barreiras (Hafdaoui *et al.*, 2023).

A escolha do modelo de frota mais adequado deve levar em consideração as condições locais de onde se pretende implementar (Dreier *et al.*, 2018). Os ônibus híbridos diesel-elétricos representam uma opção de transição viável, pois não requerem a implementação imediata de infraestrutura de carregamento e podem oferecer segurança em rotas de longas distâncias (Dreier *et al.*, 2018; Hafdaoui *et al.*, 2023). No entanto, é importante considerar os custos da transição para veículos híbridos a longo prazo (Coppola *et al.*, 2023).

Além dos ônibus elétricos, alternativas de combustíveis são consideradas mais sustentáveis do que o diesel convencional, como o GNV, GNL e célula de hidrogênio. A utilização de GNV como substituto para o diesel é uma opção atrativa quando se analisam os impactos relacionados às emissões durante a fase de operação, podendo reduzir em até 60% as emissões de GEE devido à sua queima mais limpa (Pourahmadiyan *et al.*, 2021). Embora as emissões de um motor a combustão movido a GNV proporcionem redução nas emissões de gases nocivos, as emissões de CO2 permanecem semelhantes às emissões dos veículos movidos a diesel (Tomic *et al.*, 2018). No entanto, é essencial considerar a sustentabilidade a longo prazo desses combustíveis fósseis, uma vez que podem resultar em emissões de poluentes atmosféricos e GEE ao longo do tempo. Embora o GNV e o GNL possam reduzir as emissões de GEE durante a fase de operação, é importante ressaltar que são combustíveis fósseis, o que levanta preocupações sobre sua viabilidade a longo prazo (Pourahmadiyan *et al.*, 2021; Gabriel *et al.*, 2021). Essa consideração destaca a necessidade de explorar alternativas mais sustentáveis e de baixo impacto ambiental, como os ônibus elétricos, a célula de hidrogênio e outras tecnologias emergentes, para garantir uma transição mais eficaz para um sistema de transporte mais limpo e sustentável.

A célula de combustível de hidrogênio está se destacando como uma alternativa promissora ao diesel e outros combustíveis, superando até mesmo os veículos elétricos em termos de impacto ambiental (Hafdaoui *et al.*, 2023). Análises WTW de ônibus movidos a eletricidade e célula de hidrogênio revelaram uma redução significativa de 31% na pegada de carbono ao optar pelo hidrogênio (Chang *et al.*, 2019). Além disso, sua operação não emite substâncias poluentes (Chang e Huang, 2021), e suas emissões na fase de produção podem ser menores do que emitida

pela geração de eletricidade, dependendo da matriz utilizada (Hafdaoui *et al.*, 2023). Nordelöf (2019) destacou que os ônibus eletrificados e movido a HVO apresentam benefícios em comparação com os ônibus convencionais a diesel, como emissões mais baixas em todas as fases, principalmente para a fase de operação dos veículos, pois por ser biogênico, o HVO não emite CO_2 na combustão. No entanto, a eficácia e sustentabilidade do uso de hidrogênio dependem do fornecimento e da produção de hidrogênio (Luu *et al.*, 2022). Apesar dessas vantagens, sua implementação ainda não é uma realidade no Brasil, onde os estudos para produção estão apenas começando.

Além dos combustíveis mencionados, outras análises WTW têm considerado alternativas viáveis para reduzir as emissões de GEE no transporte urbano. Por exemplo, Spoof-Tuom *et al.* (2022) avaliou os benefícios da troca do diesel para o biometano, constatando que essa substituição pode reduzir as emissões de GEE em até 80%. Além disso, destacaram que o biogás pode representar uma maneira rápida e econômica de realizar a transição da frota, visando reduzir as emissões de GEE provenientes dos ônibus urbanos.

Outro ponto relevante a ser considerado para avaliar o desempenho ambiental ao longo do ciclo de vida dos modos de transporte é a diferença entre o uso do transporte público de passageiros e o uso de veículos individuais ou compartilhados por um número intermediário de pessoas. Essa distinção resulta em maiores emissões associadas ao transporte individual em comparação com o transporte público de passageiros. Esse aspecto é crucial para que os planejadores de transporte regional possam tomar medidas informadas e priorizadas visando melhorar o impacto ambiental do transporte público (Shinde *et al.*, 2019).

Diversos estudos têm empregado abordagens variadas para avaliar o ciclo de vida e as emissões nos ônibus, destacando a necessidade de considerar diferentes fatores ao buscar soluções mais sustentáveis para o transporte público. Por exemplo, Bermond *et al.* (2019) adotaram uma abordagem de ecoeficiência para avaliar o impacto das emissões do serviço de transporte público de passageiros, enquanto Correa *et al.* (2019) utilizaram um índice de sustentabilidade para avaliar diferentes combustíveis e mix energético em países como Argentina, Chile e Brasil. Essas pesquisas sugerem que os veículos elétricos são uma alternativa promissora para curtas distâncias, enquanto o hidrogênio pode ser mais adequado para longas distâncias, especialmente se produzido a partir de fontes renováveis. No entanto, é crucial considerar a sustentabilidade

a longo prazo desses combustíveis fósseis, como destacado por Pourahmadiyan *et al.* (2021) e Gabriel *et al.* (2021).

Além disso, métodos inovadores, como o emprego de redes neurais combinado com dados reais, têm sido utilizados para avaliar a eficiência da eletrificação da frota na redução das emissões (Regulski, 2023). Este estudo ressalta as diferenças entre os ônibus a diesel e os veículos elétricos em termos de eficiência, tempo de vida útil e emissões. Enquanto os ônibus a diesel tendem a ter uma vida útil mais longa e um tempo de reabastecimento menor, eles são menos eficientes e emitem substâncias nocivas durante a operação. Por outro lado, os veículos elétricos, embora possuam uma vida útil mais curta e um tempo de recarga mais longo, são altamente eficientes e não emitem poluentes ou gases de efeito estufa durante a operação (Regulski, 2023).

Esses estudos destacam a complexidade e a importância de considerar múltiplos aspectos, como a matriz energética, a sustentabilidade a longo prazo dos combustíveis e as necessidades específicas de cada região, ao buscar soluções para o melhoramento da frota de ônibus. Algumas estratégias financeiras e incentivos, como esquemas de leasing e investimentos em infraestrutura de carregamento, podem desempenhar um papel crucial na viabilidade financeira dos ônibus elétricos, contribuindo para uma transição mais eficaz para um sistema de transporte público mais limpo e sustentável (Kang e Quezada, 2020).

Essas pesquisas ressaltam a importância de considerar uma variedade de abordagens e alternativas de combustíveis para reduzir as emissões de GEE no transporte urbano, destacando a necessidade de apresentar melhorias e soluções. Portanto, apesar da existência de trabalhos que utilizaram a análise WTW para avaliar a emissão de poluentes atmosféricos e de GEE no sistema de transporte público, é importante destacar que essa dissertação aborda as particularidades geográficas e as condições reais do transporte público de passageiros, sendo uma contribuição do esforço do Espírito Santo em integrar-se ao conjunto do Brasil, visando a redução das emissões. Além disso, essa pesquisa avalia os impactos relevantes em temos de saúde humana, qualidade do ecossistema e mudanças climáticas dos poluentes atmosféricos e GEE.

3. METODOLOGIA DA PESQUISA

Neste capítulo, será abordada a metodologia da pesquisa e suas respectivas etapas a serem executadas, incluindo a estruturação das atividades para alcançar os objetivos propostos nesta dissertação.

3.1. CLASSIFICAÇÃO DA METODOLOGIA DE PESQUISA

A metodologia da pesquisa refere-se ao conjunto de abordagens e procedimentos técnicos-científicos utilizados para uma investigação científica, fornecendo uma estrutura sistemática para o planejamento, execução e avaliação de uma pesquisa, garantindo a confiabilidade dos resultados (Gil, 2002). Dentre os diversos critérios, a classificação de uma pesquisa pode ser feita de acordo com a abordagem (quantitativa, qualitativa ou mista), objetivos específicos (exploratória, descritiva ou explicativa/causal), bem como pelo escopo (documental, estudo de campo, laboratorial ou longitudinal). A seleção da metodologia depende dos objetivos, da natureza do problema, da disponibilidade dos dados e das características do estudo, sendo, por vezes, necessário incorporar elementos de diferentes abordagens para se obter uma compreensão mais detalhadas dos resultados.

A abordagem metodológica adotada nesta dissertação é classificada como pesquisa quantitativa, utilizando gráficos, tabelas e cálculos para analisar as informações obtidas na pesquisa (Gil, 2002; Vergara, 2010). A escolha pela pesquisa quantitativa neste contexto se deve pela ênfase em dados numéricos, visando quantificar as emissões de poluentes atmosféricos e GEE nos cenários investigados, analisando suas possíveis fontes e representando graficamente os resultados de forma comparativa e compreensiva.

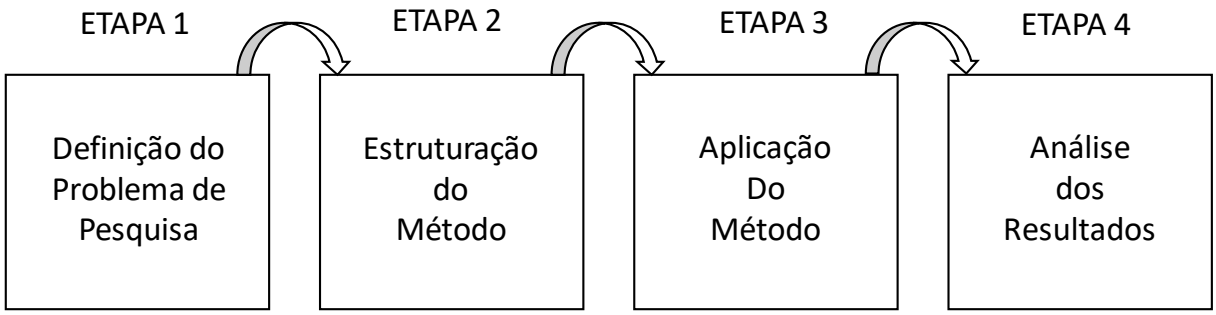
Quanto aos objetivos da pesquisa, está se classifica como uma combinação entre os objetivos exploratórios, descritivos e explicativos. O objetivo exploratório contribui para obter uma compreensão inicial do problema, através da busca de dados e informações em pesquisas bibliográficas. O objetivo descritivo utiliza coleta de dados padronizados para analisar a relação entre as variáveis do estudo de maneira clara e detalhada. E o objetivo explicativo auxilia na identificação e explicação, sendo uma pesquisa de maior aprofundamento. das relações dos impactos das emissões, relacionando-as aos diferentes combustíveis utilizados (Gil, 2002; Vergara, 2010).

Quanto ao escopo, considerando a abrangência e extensão do estudo, a pesquisa se classifica com elementos do estudo de campo e longitudinal (Vergara, 2010). Os dados foram coletados diretamente pelas empresas responsáveis pelo funcionamento dos ônibus ao longo do tempo, identificando tendências e mudanças nesse período. A escolha deste tipo de pesquisa ocorreu devido à expectativa de que o método proposto possa ser efetivamente aplicado como uma ferramenta de suporte à tomada de decisões por empresas do setor de transportes. Isso inclui a seleção de combustíveis e modelos de veículos para uso no transporte, considerando, principalmente, as implicações ambientais.

3.2. ESTÁGIOS DA METODOLOGIA DE PESQUISA

Para alcançar os objetivos da pesquisa, é fundamental adotar uma metodologia de pesquisa com etapas claramente definidas. Assim, o processo metodológico é estruturado em quatro etapas, conforme ilustrado na Figura 10. Essa abordagem visa proporcionar organização e direcionamento ao desenvolvimento da pesquisa, garantindo uma condução sistemática e eficaz do estudo.

Figura 10 - Etapas da metodologia da pesquisa



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para cada etapa da metodologia, foram estabelecidos itens a serem seguidos, totalizando em 13 itens, conforme descritas na sequência a seguir.

Etapa 1: Definição do Problema de Pesquisa

Item 1) Definir a finalidade, objetivo, escopo e unidades funcionais da pesquisa;

Item 2) Especificar os poluentes atmosféricos e os GEE que serão analisados;

Item 3) Definir a base de dados e softwares a serem utilizados para o levantamento dos fatores de emissão;

Item 4) Especificar os cenários de configuração dos veículos (modelo dos ônibus, fase do Proconve e tipo de combustível utilizado);

Item 5) Especificar as categorias de impacto e o método a ser utilizado;

Etapa 2: Estruturação do Método

Item 6) Realizar uma revisão bibliográfica baseada em artigos científicos relacionados ao tema da dissertação para identificação de pesquisas relacionadas e possíveis lacunas de pesquisa;

Item 7) Levantar informações sobre o sistema Transcol, como a abrangência, informações da frota e detalhes operacionais;

Item 8) Construir os procedimentos para o cálculo das emissões de poluentes atmosféricos e GEE baseados na análise WTW;

Etapa 3: Aplicação do Método

Item 9) Levantar os dados referentes à cadeia produtiva dos combustíveis selecionados e os fatores de emissão correspondentes à fase WTP, por meio de software;

Item 10) Levantar os dados referentes à cadeia produtiva dos combustíveis selecionados e os fatores de emissão correspondentes à fase PTW, por meio de pesquisas bibliográficas;

Item 11) Levantar as informações sobre a quilometragem percorrida e combustível consumido pelos ônibus da frota em operação no Transcol, via dados da empresa CETURB-GV;

Item 12) Calcular as emissões dos poluentes atmosféricos e GEE;

Etapa 4: Análise dos Resultados

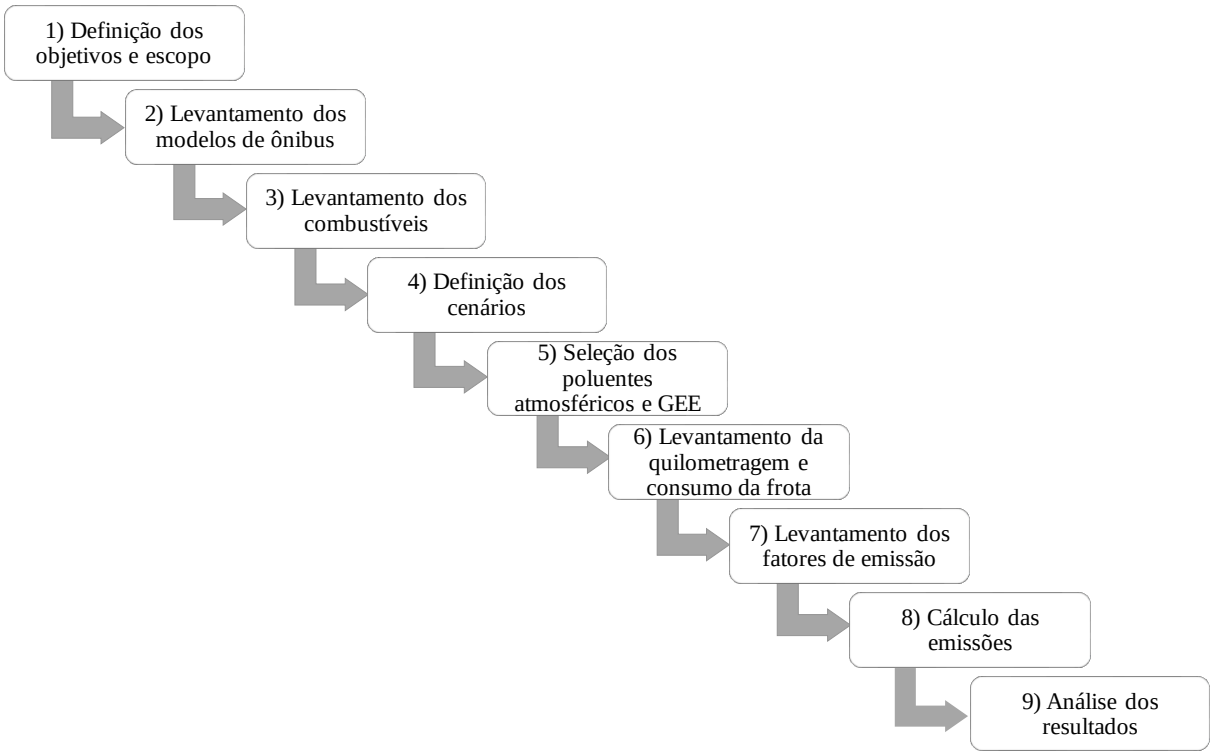
Item 13) Analisar e interpretar os resultados encontrados.

4. MÉTODO PROPOSTO BASEADO NA ANÁLISE WTW

Neste capítulo, apresenta-se o método proposto para calcular e avaliar as emissões de poluentes atmosféricos e GEE ao longo do ciclo de vida dos combustíveis. Foi utilizada a análise WTW, que abrange as etapas desde a extração e obtenção de matéria-prima para produção dos combustíveis até a utilização nos motores dos veículos, focando nos combustíveis empregados no transporte coletivo de passageiros. A formulação deste método foi desenvolvida com base nas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044 (ABNT, 2014a; ABNT, 2014b).

A seguir é apresentado o método proposto (Figura 11), subdividido em nove passos fundamentais, sendo: 1) Definição dos objetivos e escopo; 2) Levantamento dos modelos de ônibus; 3) Escolha dos combustíveis; 4) Definição dos Cenários; 5) Seleção dos poluentes atmosféricos e GEE; 6) Levantamento da quilometragem e consumo da frota; 7) Levantamento dos fatores de emissão; 8) Cálculo das emissões; e 9) Análise dos resultados.

Figura 11 - Método proposto



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

1) Definição dos objetivos e escopo

O primeiro passo consiste na definição dos objetivos da análise WTW a ser realizada. Esses objetivos devem incluir finalidade do estudo, as motivações e o público-alvo com o qual se pretende comunicar com os resultados (ABNT, 2014a). Além disso, é fundamental definir o escopo, determinando o nível de abrangência e detalhamento do estudo, alinhados com os objetivos estabelecidos.

De acordo com a NBR ISO 14040, o escopo deve incluir informações sobre o sistema a ser avaliado, as fronteiras do sistema, unidade funcional, especificação da qualidade dos dados, categorias de impacto, metodologia e interpretações, descrição dos requisitos de dados, pressupostos e limitações, além de indicação do tipo de análise ser realizada (ABNT, 2014a). A unidade funcional é fundamental para estabelecer uma referência entre os parâmetros analisados, garantindo a consistência das avaliações e facilitando a comparação e interpretação dos resultados.

2) Levantamento dos modelos de ônibus

No segundo passo, procede-se ao levantamento dos modelos de veículos a serem avaliados. Neste passo, devem ser escolhidos os ônibus que serão submetidos à análise, levando em conta a quantidade e as características dos modelos escolhidos, de modo a serem compatíveis com a frota operante do serviço de transporte a ser avaliado.

3) Levantamento dos combustíveis

No terceiro passo, é realizada a escolha dos combustíveis a serem avaliados, sendo fundamental restringir as opções aos combustíveis compatíveis com os modelos de ônibus selecionados anteriormente.

4) Definição dos cenários

No quarto passo, definem-se os cenários a serem analisados pelo método, considerando o serviço de transporte que se pretende estudar. Cada cenário deve incluir informações detalhadas

sobre os veículos escolhidos, como modelo dos ônibus, quantidade de ônibus em operação na frota e quilometragem percorrida, além de detalhes sobre os tipos de combustíveis utilizados.

Essa etapa é fundamental para garantir uma avaliação abrangente e precisa dos impactos ambientais associados ao transporte, permitindo a comparação entre diferentes alternativas e a identificação de melhorias.

5) Seleção dos poluentes atmosféricos e GEE

No quinto passo, deve-se selecionar os poluentes atmosféricos e GEE, que serão avaliados pelo método, de acordo com o objetivo do estudo e considerando as categorias de impactos ambientais a serem analisados.

Ressalta-se que a comparação entre os diversos poluentes atmosféricos e GEE nos diferentes cenários só é possível devido a escolha da unidade funcional, definida no Passo 1. Exemplos de unidades funcionais utilizadas para análise de poluentes atmosféricos e GEE incluem: gramas (g), quilogramas (kg) e toneladas (t).

6) Levantamento da quilometragem e consumo da frota

No sexto passo, é necessário levantar todas as informações referentes à quilometragem percorrida e o total de combustível consumido pela frota, considerando os diferentes modelos e motorização da frota, necessárias para calcular as emissões dos poluentes atmosféricos e GEE selecionados, em cada Cenário previamente definido, de acordo com os objetivos e escopo do estudo.

7) Levantamento de fatores de emissão

No sétimo passo, realiza-se o levantamento dos fatores de emissão. Destaca-se que o método proposto utiliza a abordagem WTW para calcular e avaliar as emissões dos poluentes atmosféricos e GEE. Para isso, o passo de levantamento de dados é subdividido em duas fases distintas: a fase WTP e a fase PTW. Essa subdivisão considera as emissões associadas à produção e distribuição de combustíveis (fase WTP) e aquelas provenientes da operação dos

veículos (fase PTW), bem como as emissões totais ao longo de todo o ciclo de vida do combustível (WTW).

O uso de bases de dados para o levantamento de fatores de emissão é vantajoso pois fornecem informações previamente coletadas e organizadas sobre diversos temas, facilitando a análise e a compreensão de padrões e tendências. Além disso, essas bases podem incluir dados históricos, viabilizando análises de longo prazo e comparações ao longo do tempo. As informações sobre as bases de dados disponíveis estão apresentadas no subcapítulo 2.1.1.

7a) Fase WTP

Para a fase WTP, devem ser levantados os fatores de emissão correspondentes aos poluentes atmosféricos e GEE selecionados no quinto passo. Esse levantamento deve ser feito para todas as etapas envolvidas na cadeia de produção de cada combustível escolhido para análise, desde a obtenção das matérias-primas para a produção do combustível até o seu transporte para os postos de abastecimento, incluindo processos como extração, produção, refino, transporte, processamento, distribuição, entre outros.

Além disso, devem ser levantadas as informações dos locais onde ocorreram cada uma das etapas da cadeia produtiva do combustível, bem como mapear as rotas percorridas ao longo desse processo até os postos de abastecimento.

Posteriormente, esses dados devem ser consolidados para formar fatores de emissão que englobem toda a fase WTP do combustível.

7b) Fase PTW

Para a fase PTW, devem ser levantados os fatores de emissão dos poluentes atmosféricos e GEE correspondentes à operação dos ônibus e consumo dos combustíveis. Isso requer a coleta de dados sobre as emissões geradas durante a operação dos veículos, incluindo o tipo de combustível utilizado, o tipo de motor e tecnologias, a eficiência do motor, as condições de condução e o padrão de uso dos ônibus. Além disso, é importante considerar as condições de manutenção dos veículos e idade da frota, pois estas também podem influenciar as emissões.

8) Cálculo das Emissões

No oitavo passo, procedesse ao cálculo das emissões dos poluentes atmosféricos e GEE selecionados no Passo 5, conforme metodologia estabelecida pelo MMA (BRASIL, 2014). Esses cálculos devem ser realizados para as fases WTP e PTW, além da fase WTW que indica as emissões totais. Devem ser calculadas as emissões para cada um dos cenários definidos. A Equação 1 é utilizada para o cálculo das emissões para os ônibus movidos a diesel (BS-500 e BS-10).

$$Emissão\ (kg) = FE * l \qquad \text{Equação 1}$$

Onde,
Emissão (kg) representa as emissões totais;
FE = Fator de emissão, em kg/l. É específico para o ano e modelo de veículo e depende do combustível utilizado.
l = Quantidade de combustível total consumido pela frota, em litros.

No caso dos ônibus híbridos (GNV – diesel), o cálculo das emissões associadas de GNV deve ser realizado utilizando a Equação 2. As emissões associadas a proporção de contribuição do diesel na mistura devem ser calculadas utilizando a Equação 1.

$$Emissão\ (kg) = FE * v \qquad \text{Equação 2}$$

Onde,
Emissão (kg) representa as emissões totais;
FE = Fator de emissão do GNV, em kg/m³;
v = Quantidade de GNV total consumido pela frota, em m³.

No caso dos veículos elétricos, o combustível utilizado é a eletricidade, e, portanto, o cálculo das emissões deve levar em consideração o consumo de energia necessário para a operação do veículo. Esse consumo deve ser calculado com base na quilometragem percorrida, a fim de determinar a quantidade de energia utilizada durante o funcionamento dos ônibus. Dessa forma, é aplicada a Equação 3 para estimar as emissões dos veículos elétricos.

$$Emissão\ (kg) = FE * c$$ Equação 3

Onde,
Emissão (kg) representa as emissões totais;
FE = Fator de emissão, em kg/MWh;
c = Quantidade de energia consumida pela frota, em MWh.

As emissões totais de GEE, expressas em unidade de CO_2e, devem ser calculadas utilizando a Equação 4. Para realizar a comparação dos gases em termos de equivalência de CO_2, é necessário utilizar o GWP de cada gás, conforme apresentado na Tabela 1. Os valores fornecidos no Sexto Relatório de Avaliação do IPCC são 273 para o óxido nitroso N_2O e 29,8 para o CH_4 de origem fóssil (IPCC, 2023).

$$CO_2\text{e} = Em_{CO2} . 1 + Em_{N20} . GWP_{N2O} + Em_{CH4} . GWP_{CH4}$$ Equação 4

Onde,
CO_2e é o total de emissão equivalente de dióxido de carbono;
Em_{C02} é a de emissão de CO_2; GWP_{CO2} são o potencial de aquecimento global do CO_2;
Em_{N20} é a de emissão de N_2O; GWP_{N2O} é o potencial de aquecimento global do N_2O;
Em_{CH4} é a emissão de CH_4; GWP_{CH4} é o potencial de aquecimento global do CH_4.

Assim como para o passo de levantamento de dados, o cálculo das emissões é subdividido em duas fases distintas: a fase WTP e a fase PTW, bem como as emissões totais ao longo de todo o ciclo de vida do combustível (WTW). O cálculo da fase WTW, consiste na soma das emissões provenientes da produção e distribuição dos combustíveis (fase WTP) com as emissões provenientes da operação dos ônibus (fase PTW), resultando nas emissões totais ao longo do ciclo de vida.

8a) Fase WTP

Para calcular as emissões durante a fase WTP, utiliza-se os fatores de emissão específicos para os poluentes atmosféricos e GEE, levantados no Passo 7, item a, juntamente com a quantidade

de combustível consumido durante a fase PTW. Esse cálculo está descrito na Equação 1 para os veículos à diesel, Equação 2 para o GNV e Equação 3 para os veículos elétricos. A Equação 4 é utilizada para converter as emissões dos três gases relevantes (CO_2, CH_4 *e* N_2O) para a unidade de equivalência de CO_2, permitindo a comparação dos diferentes GEE selecionados.

8b) Fase PTW

Para calcular as emissões da fase PTW, utiliza-se o fator de emissão específicos para os poluentes atmosféricos e GEE, levantados no Passo 7, item b, juntamente com a quantidade de combustível consumido durante a fase PTW. Esse cálculo está descrito na Equação 1 para os veículos à diesel, Equação 2 para os veículos à GNV e Equação 3 para os veículos elétricos.

A Equação 4 é utilizada para converter as emissões dos três GEE relevantes (CO_2, CH_4 *e* N_2O) para a unidade de equivalência de CO_2 permitindo a análise comparativa dos diferentes GEE selecionados.

9) Análise dos Resultados

No nono passo, que consiste na análise dos resultados, é essencial realizar análises e interpretações dos resultados obtidos pelos cálculos realizados no passo anterior. Essa etapa visa examinar o desempenho ambiental dos diferentes cenários, especialmente em termos de emissões de poluentes atmosféricos e GEE, abrangendo as fases WTP, PTW e WTW. Para cada cenário, a avaliação deve incluir análises individuais e comparativas.

As análises individuais têm como objetivo identificar os fatores que contribuíram para as emissões observadas em cada cenário e determinar qual fase exerce maior impacto ambiental. Por outro lado, as análises comparativas buscam identificar variações nas emissões entre os diferentes cenários, identificando aqueles com maiores e menores impactos.

Adicionalmente, é necessário realizar a avaliação das categorias de impacto associadas a cada cenário e a cada poluente atmosférico e GEE selecionados na pesquisa. Esta análise envolve a quantificação e interpretação dos impactos em categorias específicas selecionadas no escopo da pesquisa. As metodologias são utilizadas para quantificar e interpretar os impactos ao longo do ciclo de vida, associando a entrada e saída a um indicador de impacto específico. Essas

análises permitem destacar as categorias mais críticas para adoção de medidas de mitigação e melhorar a tomada de decisões na tentativa de melhorar o sistema de transporte avaliado.

A partir dessas análises, é possível identificar a influência que a escolha do combustível utilizado exerce nas emissões totais WTW do serviço de transporte estudado. Esse processo permite identificar quais tipos de combustíveis adotados resultam em menores ou maiores impactos ambientais. Este estágio corresponde à última fase da NBR ISO 14040, conhecida como Interpretação. Nesta etapa, são realizadas análises e conclusões, definindo recomendações e limitações da aplicação da análise WTW. As conclusões da análise de inventário e da avaliação de impacto são consideradas de maneira conjunta, garantindo que os resultados sejam consistentes com o objetivo e o escopo do estudo (ABNT, 2014a).

5. TRANSPORTE PÚBLICO DE PASSAGEIROS – SISTEMA TRANSCOL

O sistema Transcol é responsável pelo transporte público coletivo de passageiros que atende a Região Metropolitana da Grande Vitória (RMGV). Esta região engloba sete municípios: Vitória, Vila Velha, Serra, Cariacica, Viana, Fundão e Guarapari (Figura 12). A população total da RMGV é de 2.006.486 habitantes (IBGE, 2022) e sua extensão territorial é de 2.331,003 km², correspondendo a 5% do território do ES (PDUI, 2017).

Figura 12 - Região atendida pelo sistema Transcol.

Fonte: CETURB-GV (2022).

Na década de 80, foi criado o Projeto Transcol, com o objetivo de reformular e reestruturar o serviço de transporte urbano até então vigente na região. O foco do projeto era modernizar o sistema, através de um modelo tronco-alimentador, que garantisse a integração entre os municípios da RMGV. Para iniciar o projeto, foi criada a Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória (CETURB–GV), com a missão de organizar institucionalmente o sistema, gerenciar os serviços existentes e implantar o Projeto Transcol. Em agosto de 1986, com a

Companhia totalmente estruturada, foi efetivada a transferência de gestão do sistema, do DETRAN-ES para CETURB-GV.

O Sistema Transcol é gerido pela CETURB–GV, criada pela Lei estadual nº 3.693/84 com o propósito de gerenciar o sistema de transporte público coletivo de passageiros da RMGV (ES, 1984). Suas atribuições incluem a regulamentação, controle e fiscalização dos serviços, operação direta ou terceirizada, planejamento e gestão de terminais e pontos de parada. Além disso, a CETURB-GV coordena o transporte público com outras modalidades, elabora regulamentos e estudos tarifários, aplica penalidades, envolve a comunidade na gestão do sistema, promove melhorias gerenciais e executa outras atribuições governamentais. A Companhia também pode assumir funções municipais por meio de delegação, convênios ou outros acordos administrativos.

A operação do serviço é concedida a dois consórcios: o Atlântico Sul, composto por seis empresas, e o Sudoeste, composto por cinco empresas. Estes consórcios compartilham as linhas e áreas de atuação, seguindo as normas e diretrizes estabelecidas pela CETURB-GV. Com a existência de dez terminais em funcionamento, distribuídos pelos municípios atendidos, incluindo três em Cariacica (Campo grande, Itacibá, Jardim América), três na Serra (Carapina, Laranjeiras e Jacaraípe) e quatro em Vila Velha (IBES, São Torquato, Vila Velha e Itaparica), o sistema permite a integração entre diferentes tipos de linha com uma única tarifa, desde que dentro do tempo de integração estabelecido.

O sistema tronco-alimentador do Transcol é composto por quatro tipos de linhas distintas: 1) Troncais; 2) Radiais; 3) Alimentadoras; e 4) Diametrais. As linhas troncais, operadas por ônibus articulados, que têm a função de interligar os terminais rodoviários da Grande Vitória. As linhas radiais que percorrem os bairros com destino ao centro de Vitória. As linhas alimentadoras que conectam os bairros aos terminais. As linhas diametrais que têm a função de conectar os bairros entre si. Cada tipo de linha desempenha um papel específico na rede de transporte, contribuindo para a eficiência e abrangência do sistema Transcol.

Os dados referentes à frota do Transcol, para o ano de 2022 considerando a motorização, tipos de combustível utilizados, fases do Proconve dos veículos, quilometragem percorrida, consumo de combustível e quantidade de passageiros foram cedidos pela CETURB-GV por meio de planilhas fornecidas pelas empresas responsáveis. A frota de ônibus do Transcol é diversificada

(Tabela 5), composta por diferentes modelos de ônibus, como: Articulados, Convencionais e Padrón elétrico. Os modelos variam em quantidade de portas e na presença ou ausência de sistema de ar-condicionado. Na tabela, a categoria “sem ar” indica que o modelo não possui sistema de ar-condicionado, e ‘com ar” indica a presença do sistema.

Tabela 5 - Principais características da frota do Transcol

Modelo		Ar condicionado	Fase do Proconve	Combustível	Sistemas
Tipo	Subtipo				
Articulado	3 portas	sem ar	P-5	BS-500	-
	3 portas	com ar	P-5	BS-500	-
	3 portas	sem ar	P-7	BS-10	SCR
	3 portas	com ar	P-7	BS-10	SCR
	6 portas	sem ar	P-5	BS-500	-
Convencional	3 portas	sem ar	P-5	BS-500	-
	3 portas	com ar	P-5	BS-500	-
	3 portas	sem ar	P-7	BS-10	SCR
	3 portas	com ar	P-7	BS-10	SCR
	3 portas	sem ar	P-7	BS-10	EGR
	3 portas	com ar	P-7	BS-10	EGR
	3 portas	com ar	P-7	Híbrido (GNV-diesel)	-
	5 portas	sem ar	P-5	BS-500	-
	Bike GV	sem ar	P-5	BS-500	-
Padrón elétrico	3 portas	com ar	-	Eletricidade	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os ônibus do Transcol são abastecidos principalmente com diesel BS-500 e BS-10 (Figura 13) os quais já incorporam a mistura de biodiesel obrigatória por lei. Além disso, a frota de 2022 é composta por um ônibus híbrido (Figura 14), que utiliza uma proporção de mistura variável de aproximadamente 80% de GNV e 20% de BS-10. Também há três ônibus 100% elétricos com bateria (Figura 15). O ônibus híbrido foi adquirido em 2019 e iniciou suas operações em 2020. Já os três ônibus elétricos foram adquiridos e começaram a operar no início do ano de 2022.

Figura 13 – Ônibus convencional Transcol

Fonte: CETURB-GV (2019).

Figura 14 - Ônibus híbrido Transcol

Fonte: Diário do Transporte (2022).

Figura 15 - Ônibus elétrico Transcol

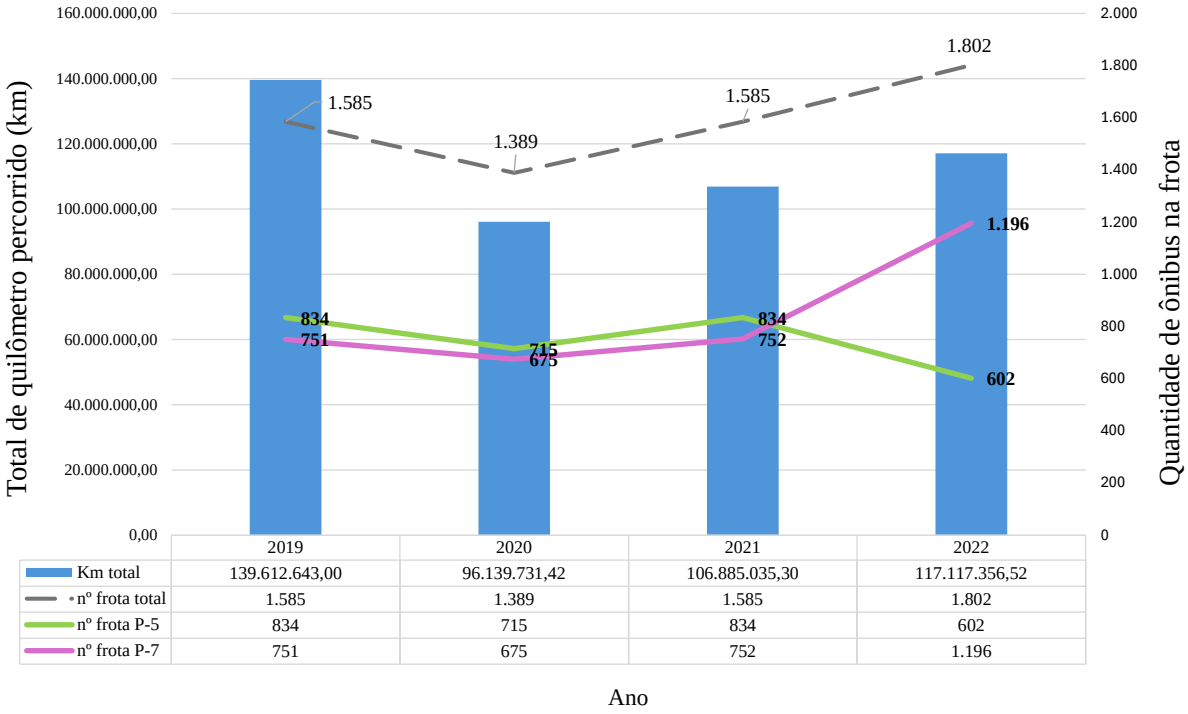
Fonte: Nerys (2022).

A Figura 16 apresenta a quantidade total de ônibus em operação na frota ao longo dos anos de 2019 (1.585 ônibus), 2020 (1.389 ônibus), 2021 (1.585 ônibus) e 2022 (1.802 ônibus). A redução na quantidade de ônibus no ano de 2020 ocorreu devido as medidas de restrição da mobilidade durante a pandemia da COVID-19. Em determinados períodos, alguns veículos deixaram de circular, especialmente aqueles equipados com ar-condicionado. Isso ocorreu em resposta às medidas restritivas que visavam evitar o contágio do vírus em ambientes fechados e às recomendações da OMS para evitar o uso de sistemas de recirculação de ar.

Em 2021, houve um aumento na quantidade de ônibus em operação na frota devido a incorporação de 300 ônibus na fase P-5 do Proconve, provenientes do sistema municipal de transporte da cidade de Vitória - ES, resultando em um aumento na quantidade de ônibus na frota do Transcol. Paralelamente, conforme informações da CETURB-GV, ocorreu a renovação de 300 ônibus, removendo veículos da fase P-5 e adquirindo 300 ônibus da fase P-7 para atender às exigências contratuais das concessões, que permitem ônibus com até 10 anos de vida útil.

A partir do final de 2021, iniciou-se uma substituição gradativa e contínua dos ônibus P-5 por ônibus P-7, e aquisição anual de novos ônibus, em conformidade com as cláusulas contratuais. Essa substituição é realizada anualmente. Em 2022, houve a renovação de 200 veículos da frota e o retorno do funcionamento completo da frota. Conforme evidenciado na Figura 16, o crescimento da frota em operação tem provocado um aumento na quilometragem percorrida.

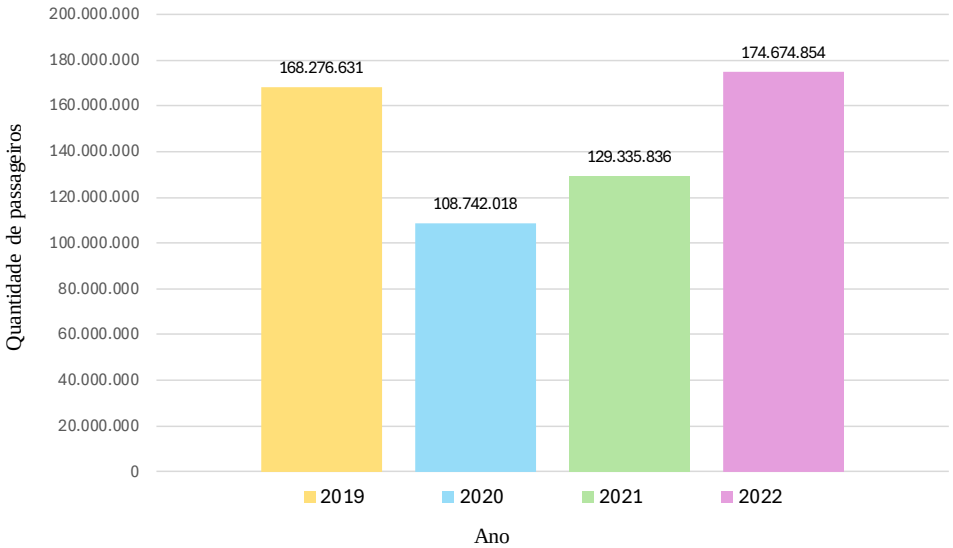
Figura 16 - Quantidade de ônibus em operação na frota e quilometragem total percorrida



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As reduções na quantidade de ônibus na frota influenciaram a quilometragem total percorrida, assim como a quantidade de passageiros que utilizaram os serviços do sistema Transcol por ano, conforme evidenciado na Figura 17. Nota-se uma diminuição no número de passageiros durante os períodos de medidas de restrição de mobilidade devido à pandemia e a redução na oferta de transporte. À medida que as atividades retornaram, o fluxo de passageiros voltou a crescer.

Figura 17 - Quantidade de passageiros do Transcol por ano



Fonte: Elaborado pelo Autor (2024).

6. APLICAÇÃO DO MÉTODO PROPOSTO AO SISTEMA TRANSCOL

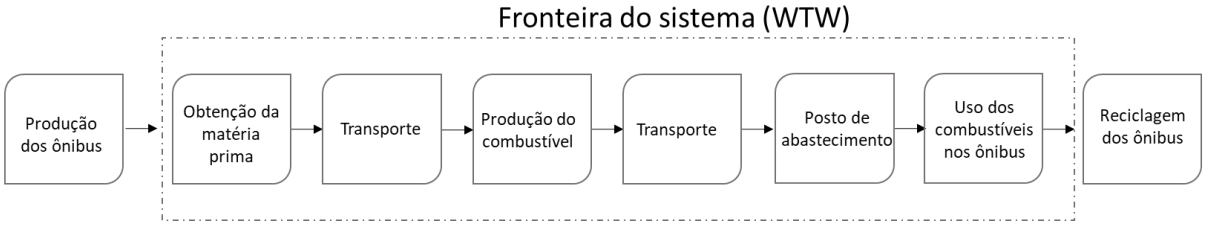
No decorrer deste capítulo, os nove passos do método proposto no capítulo anterior (Capítulo 3) serão aplicados ao estudo de caso do Transcol, estudado nesta pesquisa, conforme apresentado no Capítulo **Erro! Fonte de referência não encontrada.**. A análise dos resultados (passo 9) será abordada no próximo capítulo (Capítulo 7).

6.1. DEFINIÇÃO DOS OBJETIVOS E ESCOPO

O objetivo dessa dissertação foi realizar uma análise WTW comparativa do ciclo de vida dos combustíveis utilizados no sistema de transporte público coletivo de passageiros que atende a RMGV, incluindo o BS-500, BS-10, o híbrido (GNV - diesel) e os ônibus elétricos. A pesquisa pretende identificar a melhor composição da frota, visando a redução das emissões de poluentes atmosféricos e GEE, a avaliação dos diversos impactos em diferentes categorias.

A fronteira do sistema estudado nessa pesquisa é conhecida como *fuel life-cycle*, que abrange todas as etapas do ciclo de vida dos combustíveis, desde a extração da matéria-prima (petróleo e GN), produção (diesel e GNV), plantio (biodiesel), mistura (diesel e biodiesel), geração (eletricidade), transporte por diversos modos entre todos os processos até os postos de abastecimento e a utilização desses combustíveis pelos ônibus durante a fase de operação (Figura 188). As etapas de produção dos ônibus e de reciclagem não foram consideradas nesta pesquisa.

Figura 18 - Fronteiras do sistema analisado



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A unidade funcional adotada nesse estudo para representar as emissões dos poluentes atmosféricos e GEE foi em quilogramas (kg) dos respectivos poluentes ou GEE. O público-alvo principal dessa dissertação compreende o setor público, governamental e o Transcol e as empresas do Transcol, como as fabricantes dos ônibus. Os resultados dessa dissertação podem

contribuir com as discussões sobre os impactos ambientais dos ônibus utilizados no transporte público coletivo de passageiros do estado do ES.

Os dados utilizados nesta pesquisa foram cedidos pela CETURB-GV por meio do setor de gerência de vistorias que é responsável pelo controle e monitoramento das informações operacionais de toda a frota do sistema Transcol. Para isso, foi solicitada à CETURB-GV a disponibilização dos dados referentes ao período de janeiro de 2019 a dezembro de 2022. Dentre as informações requisitadas estão detalhes da frota, como motorização, modelo, ano, fase do Proconve, tipo de combustível utilizado, quantidade de ônibus na frota, quantidade de passageiros, quilometragem percorrida e a quantidade de combustível consumido. Os dados foram recebidos no início de 2023, portanto, não puderam ser utilizados para referência no ano em questão. Por essa razão, o ano de 2022 foi selecionado como ano-base para as análises, dada a disponibilidade de dados completos e por representar o período pós-pandemia do COVID-19, quando as operações do serviço de transporte já estavam de volta ao funcionamento regular.

Os dados sobre os fatores de emissão da fase WTP do ciclo de vida dos combustíveis foram obtidos por meio do banco de dados Ecoinvent v.3.6. e analisados utilizando o software OpenLCA v.2.2. Optou-se por utilizar essas ferramentas devido à disponibilidade de acesso. Por outro lado, os dados relativos aos fatores de emissão da fase PTW foram obtidos por meio de referências bibliográficas, incluindo artigos científicos e publicações do Ministério do Meio Ambiente (BRASIL, 2014).

As análises das categorias de impacto foram conduzidas utilizando o método IMPACT 2002+, no software OpenLCA, com foco nas categorias *endpoint* que abordam os impactos à saúde humana, qualidade dos ecossistemas e alterações climáticas. Dentre essas categorias, foram selecionadas as seguintes categorias *midpoint*: aquecimento global, acidificação aquática, acidificação e nutrição terrestre, respiração orgânica e respiração inorgânica.

As informações referentes à qualidade dos dados utilizado nesta pesquisa, têm-se que:

• Correlação temporal: Ano base de 2022.

• Correlação geográfica: Área de atuação do Transcol, RMGV, Espírito Santo, região sudeste do Brasil;

• Confiabilidade dos dados: Dados de primeiro plano, ou seja, informações medidas e verificadas, fornecidas pelas empresas por meio de planilhas. Quando não disponíveis,

recorreu-se à utilização de dados de segundo plano, obtidos através da base de dados Ecoinvent v.3.6.

6.2. LEVANTAMENTO DOS MODELOS DE ÔNIBUS

Os modelos de ônibus foram selecionados com base nas características da frota em operação no sistema do Transcol, utilizando o ano-base de 2022 (conforme apresentado na Tabela *5*). Nesta pesquisa, as emissões não foram categorizadas com base nos diferentes tipos de modelos dos ônibus que compõem a frota (Articulado, Convencional e Padrón elétrico), nem foram analisadas em termos da presença ou ausência de sistema de ar-condicionado, tampouco foi avaliado os desempenhos dos sistemas de pós-tratamento dos gases de escape EGR e SCR. Isso se deve à ausência de fatores de emissão específicos que permitam diferenciar entre ônibus com sistema de ar-condicionado e aqueles sem esse sistema, bem como para cada característica dos ônibus, limitando-se apenas a diferenciação entre as fases do Proconve.

As análises foram realizadas agrupando os modelos de acordo com a fase do Proconve e o tipo de combustível utilizado, conforme descrito na Tabela 6: ônibus P-5 utilizando BS-500; ônibus P-7 utilizando BS-10; ônibus P-7 híbrido (GNV - diesel); e ônibus elétrico utilizando eletricidade. Dessa forma, um total de 1.802 ônibus foram submetidos à análise, sendo 602 ônibus utilizando BS-500, 1.196 ônibus utilizando BS-10, um ônibus híbrido (GNV-diesel) e três ônibus elétricos. É importante ressaltar que os ônibus elétricos não estão classificados em nenhuma fase do Proconve, portanto, foi categorizado como "elétrico".

Tabela 6 – Modelo, combustível e quantidade de ônibus na frota

Modelo	Combustível utilizado	Quantidade de ônibus
P-5	BS-500	602
P-7	BS-10	1.196
	Híbrido (GNV + BS-10)	1
Elétrico	Eletricidade	3

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

6.3. LEVANTAMENTO DOS COMBUSTÍVEIS

O levantamento dos combustíveis escolhidos para a análise baseou-se na composição da frota em operação no Transcol, conforme detalhado na
Tabela 5. Dessa forma, os combustíveis selecionados para análise nesta pesquisa foram o diesel BS-500 e BS-10, GNV e eletricidade. A análise do GNV é realizada devido à presença de um ônibus híbrido na frota. De acordo com informações fornecidas pela CETURB-GV, a proporção na combustão no ônibus híbrido equipado com kit *dual-fuel* varia em torno de 80% de GNV e 20% de BS-10.

É importante destacar que todos os ônibus movidos a diesel operam com uma mistura obrigatória de biodiesel, conforme estabelecido por lei, indicado pelas designações BS-500 e BS-10. No ano de 2022, essa mistura foi de 10% de biodiesel B100. Quanto às análises associadas ao biodiesel, foram calculadas as emissões desde a fase de produção até a mistura com o diesel para consumo. Portanto, o B100 foi avaliado durante a fase WTP. Na fase PTW, o biodiesel já está obrigatoriamente misturado ao diesel, o que evita a necessidade de analisar as emissões do B100 separadamente do BS-500 e do BS-10.

6.4. DEFINIÇÃO DOS CENÁRIOS

Os cenários foram definidos considerando os modelos dos ônibus e os combustíveis selecionados nas etapas anteriores. Foram propostos seis cenários, conforme apresentado no Quadro 3, para calcular e avaliar as emissões de poluentes atmosféricos e GEE ao longo do ciclo de vida dos combustíveis utilizados pelos ônibus da frota do Transcol. Os cenários foram propostos tendo como base duas estratégias do Plano de Descarbonização e Neutralização de Emissões do ES (UFES, 2022): item 1.2. Incentivar o uso de biocombustíveis por veículos de carga (veículos pesados) e ônibus de passageiros; e item 2.1. Eletrificação dos veículos do transporte coletivo de passageiros urbanos.

- Cenário 1: Este cenário reflete as emissões reais da frota em operação no Transcol durante o ano de 2022. Este cenário foi considerado como cenário base de comparação. Foram avaliados 1.802 ônibus, dos quais: 602 movidos à BS-500, 1.196 movidos à BS-10, três movidos à eletricidade e um ônibus híbrido (na proporção de 80% de GNV e 20% de BS-10);

- Cenário 2: Este cenário reflete as emissões resultantes da substituição de todos os ônibus da frota movidos a BS-500 por ônibus movidos a BS-10. Foram consideradas as emissões do ônibus híbrido e dos três ônibus elétricos. Este cenário foi definido para avaliar as melhorias associadas à adoção de ônibus mais modernos e as reduções associadas aos novos limites de emissão da fase P-7. Foram avaliados 1.802 ônibus, dos quais: 1.798 movidos à BS-10, três movidos à eletricidade e um híbrido utilizando GNV-diesel.

A partir deste cenário, todos os ônibus movidos a diesel utilizam BS-10, eliminando as emissões associadas ao BS-500.

- Cenário 3: Este cenário reflete as emissões resultantes da substituição de 25% dos ônibus da frota movidos a diesel, considerando todos os ônibus utilizando o tipo BS-10, por ônibus elétricos. As emissões do ônibus híbrido também são contabilizadas. Foram avaliados 1.802 ônibus, dos quais: 1.348 movidos à BS-10, 453 movidos à eletricidade e um híbrido utilizando GNV-diesel.

- Cenário 4: Este cenário reflete as emissões resultantes da substituição de 50% dos ônibus da frota movidos à diesel, considerando todos os ônibus utilizando o tipo BS-10, por ônibus elétricos. As emissões do ônibus híbrido também são contabilizadas. Foram avaliados 1.802 ônibus, dos quais: 899 movidos à BS-10, 902 movidos à eletricidade e um híbrido utilizando GNV-diesel.

- Cenário 5: Este cenário representa as emissões resultantes da substituição de 100% dos ônibus da frota por ônibus elétricos. Foram avaliados 1.802 ônibus utilizando eletricidade.

- Cenário 6: Este cenário reflete as emissões resultantes da substituição de 100% dos ônibus da frota por ônibus híbridos. Foram avaliados 1.802 ônibus híbridos, com uma proporção de mistura variando em 80% de GNV e 20% de BS-10.

Quadro 3 - Cenários propostos

Cenário	Descrição da frota e combustível utilizado
1	Frota real em operação no ano-base 2022
2	Substituição total do BS-500 por BS-10
3	75% utilizando BS-10 e 25% utilizando eletricidade
4	50% utilizando BS-10 e 50% utilizando eletricidade
5	100% utilizando eletricidade
6	100% híbrido (80% de GNV e 20% de BS-10)

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

6.5. SELEÇÃO DOS POLUENTES ATMOFÉRICOS E GEE

A seleção dos poluentes atmosféricos e GEE foi baseada em uma revisão da literatura, considerando a relação entre os combustíveis selecionados nesta pesquisa e seus respectivos impactos à saúde humana e na qualidade dos ecossistemas. Assim, optou-se por avaliar os seguintes poluentes atmosféricos: CO, NO_x, SO_2, MP e $NMHC$. Essa decisão foi fundamentada pelo fato de serem os poluentes atmosféricos mais emitidos pelo setor de transporte, causando impactos adversos em níveis locais (D'Agosto, 2015). As emissões dos poluentes CO, NO_x, SO_2, MP e $NMHC$ serão expressas nas unidades: kgCO, kgNO_x, kgSO_2, kgMP e kg$NMHC$, respectivamente.

Em relação aos GEE, serão analisadas as emissões de CO_2, CH_4 e N_2O, uma vez que são os principais gases emitidos pelo setor de transporte e estão associados às alterações climáticas (D'Agosto, 2015). As emissões serão quantificadas em quilogramas equivalentes de dióxido de carbono (kgCO_2e). A conversão dos gases CO_2, CH_4 e N_2O para CO_2e será realizada utilizando a Equação 4, que leva em consideração o GWP de cada gás apresentado na Tabela 1.

6.6. LEVANTAMENTO DA QUILOMETRAGEM PERCORRIDA E COMBUSTÍVEL CONSUMIDO

Os dados referentes a quilometragem percorrida e ao combustível consumido pelos ônibus da frota foram cedidos pela CETURB-GV. O ano de 2022 foi utilizado como referência por ter

todos os dados completos, conforme citado no escopo da pesquisa. Para o ônibus híbrido, a CETURB–GV informou o consumo de GNV, em m³, e o consumo de BS-10, em litros. A Tabela 7 apresenta as informações sobre a quilometragem total percorrida e o combustível consumido pela frota em operação, de acordo com os modelos selecionados no Subcapítulo 6.2.

Tabela 7 – Informações referentes a quilometragem total percorrida e o combustível consumido

Modelo	Combustível utilizado	Quilometragem total percorrida	Combustível consumido		
			litros	m³	MWh
P-5	BS-500	33.474.239,00	12.483.329,56	-	-
P-7	BS-10	83.542.713,52	32.498.419,36	-	-
	GNV-diesel	100.404,00	-	30.188,70	-
			7.547,18	-	-
Elétrico	Eletricidade	492.020,37	-	-	841.355,45

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

O cálculo do consumo dos ônibus elétricos da frota, em MWh, foram obtidos por meio de informações adicionais e pesquisas bibliográficas. No ano de 2022, a frota do Transcol era composta por três ônibus do modelo Padrón elétrico, equipados com sistemas de bateria da marca Eletra. De acordo com os testes de funcionamento, publicados pelo Diário do Transporte, um veículo modelo Padrón da Eletra consome, em média, 1,71 KWh por quilometro percorrido (Diário do Transporte, 2023).

Os ônibus elétricos do Transcol operam exclusivamente na linha "*Transcol Rota 515*", que conecta o terminal de Laranjeiras ao terminal de Campo Grande, via Beira Mar, cobrindo uma distância de aproximadamente 31,4 km. Esses ônibus estão em serviço das 5h da manhã até a meia-noite, operando durante 19 horas diárias, todos os dias da semana, incluindo finais de semana. Cada rota completa tem uma duração aproximada de uma hora. Com uma autonomia de 150 quilômetros e um tempo de médio de recarga de duas horas (GVBus, 2022), os ônibus podem realizar até quatro rotas completas antes de necessitar de um novo carregamento. Portanto, durante um dia de operação, cada veículo consegue completar até três ciclos, incluindo tanto as viagens quanto os períodos de recarga.

Para calcular a quilometragem total percorrida pelos ônibus elétricos em um ano, é preciso considerar a quantidade de ônibus em operação na frota, os ciclos de viagem por dia, a quantidade de viagens por ciclo, a distância percorrida por cada viagem e a quantidade de dias no ano em que a frota opera. Dessa forma, conclui-se que a frota de ônibus elétricos do Transcol percorre aproximadamente 492.020,73 quilômetros por ano. Não são consideradas possíveis interferências externas nas rotas percorridas, como tráfego intenso de ônibus, atraso no itinerário, demanda extra para abastecimento, entre outras.

6.7. LEVANTAMENTO DOS FATORES DE EMISSÃO

Conforme o método proposto no Capítulo 4, o levantamento dos fatores de emissão foi subdividido em duas fases distintas: a) *Well-to-Pump* (WTP) e b) *Pump-to-Wheel* (PTW), as quais serão detalhadas a seguir.

6.7.1. Levantamento de dados da fase WTP

No levantamento dos dados para a fase WTP, foram consideradas as diversas etapas da cadeia produtiva dos combustíveis selecionados no Capítulo 6, subcapítulo 6.3. Essas etapas abrangem desde a obtenção da matéria-prima dos combustíveis, considerando processos como extração, plantio, produção, refino, transporte, processamento, armazenamento, entre outras, até a distribuição para os postos de abastecimento. Nessa dissertação, foram levantadas informações dos combustíveis utilizados no sistema Transcol, que incluem o diesel S-500 e S-10, biodiesel B100, GNL e eletricidade.

Diante da complexidade na obtenção das informações específicas sobre os locais de extração de petróleo, quantidade de matéria-prima utilizada, distâncias percorridas pelos transportes, instalações para transformação dos produtos e outros dados essenciais nesta pesquisa, optou-se por utilizar a base de dados Ecoinvent v.3.6. Os dados foram analisados utilizando o software OpenLCA v.1.11.0.

- Cadeia de produção do diesel

Os processos envolvidos na cadeia de produção do diesel incluem a extração do petróleo, importação e transporte para as refinarias, o refino do produto, transporte e distribuição nos postos de abastecimento (Figura 19). Na base de dados do Ecoinvent v.3.6 é possível distinguir

entre o diesel S-500 e o diesel S-10, permitindo uma análise mais precisa dos impactos associados à produção de cada tipo de diesel. Para fins de referência, o diesel S-500 foi considerado como a fase P-5 do Proconve, enquanto o diesel S-10 foi considerado como a fase P-7 do Proconve.

Figura 19 - Cadeia de produção do Diesel

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados referentes as distâncias entre o porto de recebimento no Brasil e o porto de recebimento no ES, bem como as distâncias até os postos de abastecimento dos ônibus do Transcol, foram incorporadas no software OpenLCA. Considerando que a importação do diesel no Brasil ocorre majoritariamente pelo porto de São Sebastião, localizado em Ilhabela, São Paulo. O transporte subsequente é realizado por via marítima até o porto Tubarão, localizado em Vitória, ES. Em seguida, o diesel é transportado por via rodoviária até os respectivos postos de abastecimento do Transcol, nos pátios da empresa, localizado em Vitória, ES. A distância marítima entre o porto de Ilhabela e o porto de Vitória foi calculada utilizando a ferramenta "*MarineTraffic*", resultando em uma distância de 727 quilômetros. Com base nas informações fornecidas pela CETURB-GV, a distância entre o porto de Vitória e o local de abastecimento dos ônibus do sistema Transcol é de 30 quilômetros.

Para calcular os fatores de emissão do diesel S-500, utilizou-se a entrada "*diesel, import from unspecified | diesel | Cutoff, U*", no software OpenLCA. Esse dado representa a importação do diesel de origem geográfica não especificada para fornecimento ao mercado interno/regional no Brasil, com a atividade se encerrando após a entrada do produto no mercado. O transporte do diesel, desde a entrada no mercado até o porto mais próximo da região em análise, é realizado via transporte marítimo. A entrada selecionada para descrever este transporte foi "*transport, freight, sea, tanker for petroleum"*, utilizando o valor de 727 quilômetros. Já o transporte entre o porto de recebimento no ES e o posto de abastecimento do sistema Transcol é realizado por via rodoviária, utilizando a entrada "*transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO 6*" para descrever essa etapa de transporte, utilizando o valor da distância de 30 quilômetros.

Para calcular os fatores de emissão do diesel S-10, utilizou-se a entrada "*diesel, low-sulfur, import from unspecified | diesel, low-sulfur | Cutoff, U – BR*", no software OpenLCA. Esse dado representa a importação do diesel de menor concentração de enxofre, de origem geográfica não especificada, destinado ao mercado interno/regional no Brasil. A atividade dessa entrada se encerra com a entrada do produto no mercado. Dado que a logística de transporte do diesel S-10 segue a mesma rota do diesel S-500, foram considerados os mesmos valores de distância. Portanto, a distância associada ao transporte marítimo permaneceu em 727 quilômetros, enquanto o transporte rodoviário também permaneceu em 30 quilômetros. Essa abordagem garante a consistência nas informações logísticas entre os dois tipos de diesel analisados.

A Tabela 8 apresenta os dados dos fatores de emissão da fase WTP para o diesel S-500 e para o diesel S-10, expressos em kg/l, obtidos pelo software OpenLCA. Esses fatores consideram todas as etapas e processos de produção até o posto de abastecimento, incluindo as distâncias associadas aos transportes.

Tabela 8 - Fatores de emissão de diesel S-500 e S-10 para a fase WTP

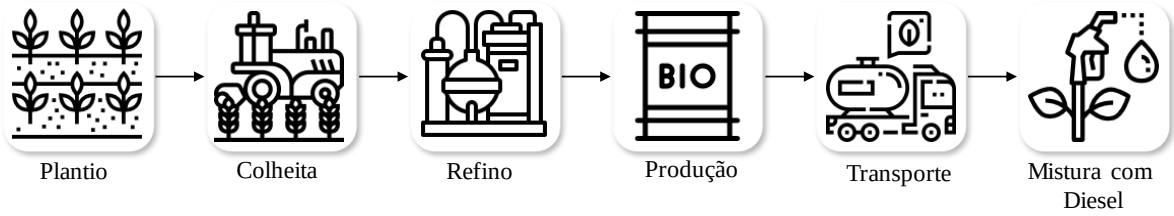
Combustível	CO (kg/l)	MP (kg/l)	SO_2 (kg/l)	$NMHC$ (kg/l)	NO_x (kg/l)	CO_2 (kg/l)	CH_4 (kg/l)	N_2O (kg/l)
S-500	0,0003085	0,0004649	0,0000818	0,0000176	0,0000379	0,0231092	0,0000083	0,0000018
S-10	0,0003359	0,0005043	0,0000865	0,0000186	0,0000403	0,0212136	0,0000075	0,0000016

Fonte: Adaptado de OpenLCA (2024).

- Cadeia de produção do biodiesel

Os processos envolvidos na cadeia de produção do biodiesel (Figura 20) incluem as etapas de produção agrícola, como o plantio da matéria-prima, colheita, transporte até a planta de produção, bem como etapas de produção do biodiesel e transporte até as refinarias onde ocorre a mistura com o diesel. O transporte das refinarias até os postos de abastecimento dos ônibus não é considerado na cadeia de produção do biodiesel, pois este é considerado na cadeia de produção do diesel.

Figura 20 - Cadeia de produção do biodiesel



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a realidade brasileira, a soja é a principal matéria-prima utilizada para a produção de biodiesel, representando 65,8% do total (ANP, 2023). Dentro do processo de produção do biodiesel de soja são consideradas diversas etapas, tais como: plantio da soja, utilização de insumos e pesticidas, colheita, secagem, esmagamento, extração do óleo, conversão do óleo em biodiesel e transporte até a refinaria para mistura com o diesel. No software OpenLCA, para a produção de biodiesel de soja no Brasil, conforme descrito por Brito *et al. (*2021), foram consideradas as entradas relacionadas ao tratamento das sementes, operação de maquinário agrícola, equipamentos industriais e utilização de insumos agrícolas, como compostos químicos e pesticidas.

Os fatores de emissão para a fase WTP do biodiesel, expressos em kg/l, obtidos do software OpenLCA são apresentadas na Tabela 9. Esses fatores consideram todas as etapas e processos de produção do biodiesel de soja no Brasil, até a etapa de mistura com o diesel.

Tabela 9 – Fatores de emissão do biodiesel na fase WTP

Combustível	CO (kg/l)	MP (kg/l)	SO_2 (kg/l)	$NMHC$ (kg/l)	NO_x (kg/l)	CO_2 (kg/l)	CH_4 (kg/l)	N_2O (kg/l)
Biodiesel	0,0004171	0,0002750	0,0001060	0,0000400	0,0000319	0,0286204	0,0000248	0,0000020

Fonte: Adaptado de OpenLCA (2024).

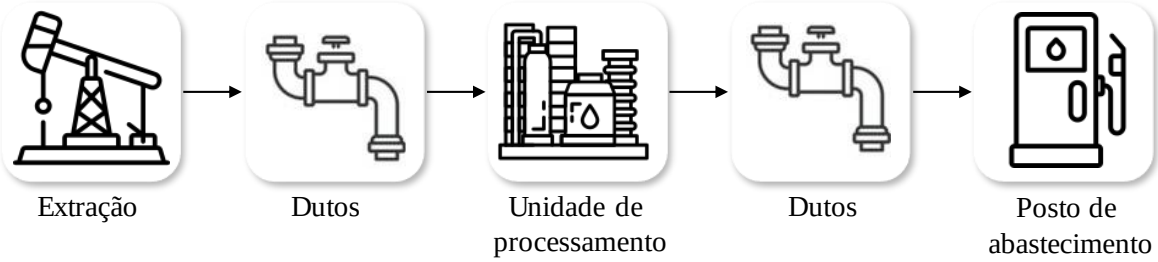
- Cadeia de produção do GNL

A cadeia de produção do GNL (Figura *21*21) compreende a exploração e extração de GN, transporte para as unidades de processamento, tratamento e processo de liquefação para se transformar em GNL, transporte por meio de dutos e armazenamento. Pode ocorrer uma etapa de regaseificação, onde o gás liquefeito é revertido para o estado gasoso para distribuição e uso como GNC ou GNV. A regaseificação não só envolve a conversão do GNL para gás, mas também permite os ajustes de pressão para garantir a distribuição adequada do gás.

Para o caso específico do Brasil, o GN que dá origem ao GNL é proveniente da Bolívia e chega até o Brasil através do gasoduto Bolívia-Brasil (GASBOL). Este gasoduto foi construído com o objetivo principal de aumentar os volumes de GN exportados para o Brasil. Entretanto, não há informações precisas sobre o local exato da extração e das unidades de processamento dos gases utilizados.

O GN boliviano é extraído *onshore,* em campos de gás associado ao petróleo, e transportado internamente por uma extensa rede de gasodutos. O gasoduto GASYRG é responsável por ligar as principais áreas produtoras de GN bolivianas ao mercado brasileiro. Atualmente, o GASYRG possui atualmente 431 km de extensão e uma capacidade máxima de 17,6 milhões de m³/dia. (EPE, 2017). No Brasil, o GN percorre o trecho norte do GASBOL, que vai do estado do Mato Grosso do Sul até Paulínia, em São Paulo. Em Paulínia, o GN é recebido na planta de liquefação da empresa GásLocal (GASLOCAL, 2017), onde é liquefeito e transformado em GNL.

Figura 21 - Cadeia de produção do GNL



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados dos fatores de emissão relacionados ao GNL foram obtidos da base de dados Ecoinvent, utilizando o software OpenLCA. Foram consideradas as entradas relacionadas à extração do GN, transporte e processo de liquefação em uma planta de liquefação. Especificamente, as entradas utilizadas foram "*natural gas production, liquefied | natural gas, liquefied | Cutoff, U*" e "*liquefied petroleum gas production, petroleum refinery operation*"), além disso, foram incluídas as entradas relativas ao transporte, como "*transport, pipeline, onshore, long distance, natural gas*". Devido à falta de informações sobre as os locais de extração do GN e da unidade de processamento, optou-se por considerar os valores fornecidos pelo software. A Tabela 10 apresenta os fatores de emissão, expressos em kg/l da fase WTP, incluindo a produção e o transporte do GNL, obtidos por meio do software OpenLCA.

Tabela 10 - Fatores de emissão para o GNV para a fase WTP.

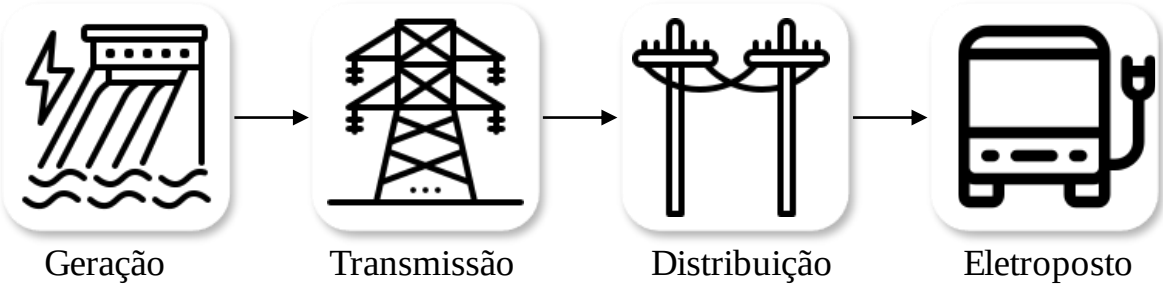
Combustível	CO (kg/l)	MP (kg/l)	SO_2 (kg/l)	$NMHC$ (kg/l)	NO_x (kg/l)	CO_2 (kg/l)	CH_4 (kg/l)	N_2O (kg/l)
GNL	0,0002800	0,0001473	0,0000199	0,000040	0,0002584	0,027900	0,000076	0,0000013

Fonte: Adaptado de OpenLCA (2024).

- Cadeia de produção da eletricidade

A cadeia de produção de eletricidade (Figura 22) envolvem a geração, transmissão e distribuição da energia. A geração de energia é influenciada pelo mix de produção adotado em cada país. No contexto brasileiro, a geração de energia é predominantemente baseada em fontes renováveis, tendo a energia hidráulica como a principal fonte de geração. A transmissão refere-se ao transporte de eletricidade em longa distância, enquanto a distribuição envolve a distribuição da energia elétrica nas áreas urbanas, onde é distribuída para estabelecimentos comerciais, residenciais e fornecida aos pontos de abastecimento para ônibus.

Figura 22 - Cadeia de produção da eletricidade



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em 2022, a fonte hidráulica, que é composta por usinas hidrelétricas, pequenas centrais hidrelétricas e centrais geradoras hidrelétricas, representou a maior parcela na geração de energia, contribuindo com 63,1% do total (EPE, 2023a). As demais fontes responderam pelo restante, com destaque para a energia eólica (12,1%), biomassa (7,6%) e geração termelétrica a gás natural (6,2%) (EPE, 2023a). O consumo total de energia elétrica no Brasil em 2022 foi 509.441.005,989 MWh (EPE, 2023) e o fator de emissão médio mensal para o ano de 2022 foi de 0,0426 tCO_2 por MWh (BRASIL, 2024). Este fator é utilizado para calcular a média das emissões de GEE para a geração de energia (EPE, 2023a).

Os fatores de emissão relacionados à produção de eletricidade foram calculados pelo software OpenLCA, ajustando os valores de geração de energia para refletir a realidade brasileira. As entradas e valores selecionados foram baseados na porcentagem de produção de cada fonte.

Considerando o mix de fontes de geração de energia elétrica no Brasil, que é composto majoritariamente pelas fontes hidráulicas e por geração a GN, foram selecionadas entradas: "*electricity production, hydro, reservoir, tropical region"* e "*electricity production, natural gas, conventional power plant" e* "*electricity production, natural gas, combined cycle power plant"*. As demais fontes como energia nuclear, carvão, eólica, biomassa, resíduo e outros não foram incorporadas ao software devido à baixa contribuição na geração total de energia no país. A Tabela 11 apresenta os fatores de emissão (em kg/MWh) da produção de eletricidade, obtidos por meio do software OpenLCA.

Tabela 11 - Fatores de emissão da eletricidade da fase WTP

Combustível	CO (kg/MWh)	MP (kg/MWh)	SO_2 (kg/MWh)	$NMHC$ (kg/MWh)	NO_x (kg/MWh)	CO_2 (kg/MWh)	CH_4 (kg/MWh)	N_2O (kg/MWh)
Eletricidade	0,0000194	0,0000320	0,0000022	0,0000005	0,0000015	0,0013872	0,0000005	0,0000002

Fonte: Adaptado de OpenLCA (2024).

Com o propósito de aprimorar a transparência do conteúdo, a Tabela 12 apresenta todos os fatores de emissão da fase WTP para os combustíveis selecionados. Esta tabela é uma síntese dos dados encontrados nas Tabelas 8 a 11, os quais foram obtidos através do software OpenLCA.

Tabela 12 - Fatores de emissão (WTP)

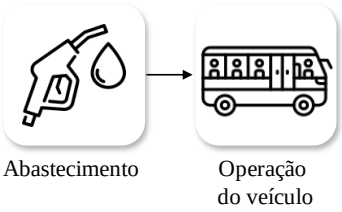
Fator de Emissão (WTP)	S-500 (kg/l)	S-10 (kg/l)	Biodiesel (kg/l)	GNL (kg/l)	Eletricidade (kg/MWh)
CO	0,0003085	0,0003359	0,0004171	0,0002800	0,0000194
MP	0,0004649	0,0005043	0,0002750	0,0002750	0,0000320
SO_2	0,0000818	0,0000865	0,0001060	0,0000199	0,0000022
$NMHC$	0,0000176	0,0000186	0,0000400	0,0004000	0,0000005
NO_x	0,0000379	0,0000403	0,0000319	0,0002584	0,0000015
CO_2	0,0231092	0,0212136	0,0286204	0,0279000	0,0013872
CH_4	0,0000083	0,0000075	0,0000248	0,0000760	0,0000005
N_2O	0,0000018	0,0000016	0,0000020	0,0000013	0,0000002

Fonte: Adaptado de OpenLCA (2024).

6.7.2. Levantamento de dados da fase PTW

Para o levantamento de dados da fase PTW, que consiste no uso dos combustíveis pelos ônibus durante a operação do motor (Figura 23), é necessário obter informações sobre os consumos dos combustíveis, selecionados na Etapa 6.3. e os fatores de emissão de cada poluente atmosférico e GEE selecionados na Etapa 6.5.

Figura 23 - Fase PTW dos combustíveis



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Os dados referentes aos fatores de emissão da fase PTW foram adaptados do 2º Inventário Nacional de Emissões de Veículos Automotores (BRASIL, 2014), sendo este o inventário mais recente, com ano base de 2013. Neste inventário, o combustível diesel analisado é referenciado como diesel comercial, que já época das análises já continha 10% de biodiesel, portanto, é igual ao percentual de mistura de biodiesel no ano de 2022. Sendo assim, não se fez necessário uma análise separada do biodiesel em termo dos fatores de emissão da fase PTW. É importante destacar que ônibus movidos a eletricidade não possuem fatores de emissão durante a fase de operação, pois não emitem poluentes atmosféricos ou GEE nesta fase. Para fins de referência, o diesel BS-500 foi considerado como o ônibus da fase P-5, enquanto o diesel BS-10 foi considerado como o ônibus da fase P-7.

No referido inventário (BRASIL, 2014) os fatores de emissão dos poluentes atmosféricos e GEE, exceto o CO_2, estão expressos em g/km. Porém, para chegar a esse valor, o referido inventário adotou um consumo médio, tanto para a fase P-5 como para a fase P-7, de 2,3 km/l. No entanto, na pesquisa desta dissertação, o consumo médio nas fases P-5 e P-7 são, respectivamente, de 2,682 e 2,571 km/l. Desta forma, identificou-se não ser possível utilizar diretamente os fatores em g/km do inventário por conta desta diferença de consumo.

É importante mencionar que no referido inventário, o fator de emissão do CO_2 está expresso em kg/l, Tabela 9 do referido inventário. Portanto, não necessitando de qualquer conversão

como será explicado adiante. O referido inventário não faz referência às emissões de SO_2 que serão também explicadas mais adiante neste subcapítulo.

Para calcular os fatores de emissão de cada poluente atmosférico e GEE em kg/l (fpl), adaptou-se a Fórmula 6 do 2º Inventário Nacional de Emissões de Veículos Automotores (BRASIL, 2014), conforme a Equação 5. O valor do fator de emissão de cada poluente atmosférico e GEE em kg/km (fpk) foi obtido na Tabela 19 do mesmo inventário citado, e o consumo em km/l de diesel BS-10 (con), tanto na fase P-5 quanto na fase P-7, foi obtido do mesmo inventário, na Tabela 18, página 42.

$$fpl(\frac{kg}{litro}) = fpk(\frac{kg}{km}) * con(\frac{km}{litro}) \quad \text{Equação 5}$$

Desta forma, utilizando a Equação 5 e os valores do referido inventário, são apresentados na Tabela 13, os fatores de emissão de cada poluente atmosférico e GEE, expressos em kg/l, conforme apresentado na Tabela 14. Ressalta-se que o fator de emissão do CO_2 já está expresso em kg/l no inventário, com o valor de 2,603 kg/l.

Tabela 13 – Valores referência para calcular os fatores de emissão do diesel em kg/l

	Fonte	Poluentes atmosféricos e GEE					
		CO	NO_x	$NMHC$	MP	CH_4	N_2O
fpk BS-500 (kg/km)	Tabela 19 (BRASIL, 2014)	0,001462	0,000179	0,007682	0,000130	0,000600	0,000030
fpk BS-10 (kg/km)	Tabela 19 (BRASIL, 2014)	0,00044	0,000033	0,002103	0,00002	0,0006	0,00003
con (km/l)	Tabela 18 (BRASIL, 2014)	2,300000	2,300000	2,300000	2,300000	2,300000	2,300000

Fonte: Adaptado de BRASIL (2014).

Sendo assim, a Tabela 14 apresenta os fatores de emissão para fase PTW dos poluentes atmosféricos e de GEE, para os combustíveis BS-500 e BS-10.

Tabela 14 - Fatores de emissão dos poluentes atmosféricos e GEE do diesel na fase PTW

Combustível	CO (kg/l)	MP (kg/l)	$NMHC$ (kg/l)	NO_x (kg/l)	CO_2 (kg/l)	CH_4 (kg/l)	N_2O (kg/l)
BS-500	0,0033626	0,0002990	0,0005935	0,0004117	0,0176686	2,6030000	0,0013800
BS-10	0,0010120	0,0000460	0,0000119	0,0000759	0,0048369	2,6030000	0,0013800

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Em relação aos fatores de emissão do SO_2, foi observada a ausência desses dados no inventário utilizado como fonte de referência. Assim, optou-se por realizar os cálculos com base no teor

de enxofre associados aos combustíveis diesel S-500 e S-10, os quais estão estabelecidos em 500 mg/kg e 10 mg/kg, respectivamente (CNT, 2012; ANP, 2016). Assumiu-se que todo o enxofre presente no combustível será transformado em SO_2 na combustão. Transformou-se mg/kg para kg/l tomando como base a densidade média do diesel B10, como sendo 0,8425 kg/l (ABNT NBR 7148). Assim, obteve-se que os fatores de emissão de SO_2 para o diesel BS-500 e BS-10 foram, respectivamente, 0,000593472 kg/l e 0,0000012 kg/l.

Os dados dos fatores de emissão da fase PTW para o GNV associado ao kit *dual-fuel* para os ônibus híbridos (Tabela 15) foram adaptados de Ribeiro (2001). Os dados apresentados no inventário do BRASIL (2014) não eram compatíveis com o consumo médio real de operação dos ônibus do Transcol, além de considerar apenas a parcela do GNV, sendo assim, optou-se por utilizar dados de bibliografia para esse combustível.

Tabela 15 - Fatores de emissão dos poluentes atmosféricos e GEE do GNV na fase PTW

Combustível	CO (kg/m³)	MP (kg/m³)	SO_2 (kg/m³)	$NMHC$ (kg/m³)	NO_x (kg/m³)	CO_2 (kg/m³)	CH_4 (kg/m³)	N_2O (kg/m³)
GNV	0,00200	0,00001	0,00000	0,00035	0,00043	1,9990	0,00190	0,000001

Fonte: Adaptado de Ribeiro (2001).

Assim como no Subcapítulo 6.7.1, visando aprimorar a transparência do conteúdo, a Tabela 16 apresenta todos os fatores de emissão da fase PTW para os combustíveis selecionados. Como previamente mencionado, os fatores de emissão do diesel já constam com a mistura obrigatória de biodiesel, portanto, a nomenclatura adotada para avaliar os diferentes tipos de diesel nessa fase é BS-500 e BS-10. Esta tabela é uma síntese dos dados encontrados nas Tabelas 14 e 15.

Tabela 16 - Fatores de emissão (PTW)

Fator de Emissão (PTW)	BS-500 (kg/l)	BS-10 (kg/l)	GNV (kg/m³)
CO	0,0033626	0,0010120	0,00200
MP	0,0002990	0,0000460	0,00001
SO_2	0,0005935	0,0000119	0,00000
$NMHC$	0,0176686	0,0048369	0,00040
NO_x	0,0004117	0,0000759	0,00035
CO_2	2,6030000	2,6030000	1,99900
CH_4	0,0013800	0,0013800	0,00190
N_2O	0,0006900	0,0006900	0,000001

Fonte: Adaptado de BRASIL (2014) e Ribeiro (2001).

6.8. CÁLCULO DAS EMISSÕES

Conforme estabelecido pelo método proposto no Capítulo 3, os cálculos das emissões foram realizados utilizando as Equações 1, 2, 3 e 4. Para calcular as emissões das fases WTP e PTW é necessário, inicialmente, calcular o total de combustível consumido e de quilômetros percorridos pela frota, para cada cenário definido no subcapítulo 6.4. As Tabelas 17 a 22, apresentam as quantidades de quilômetros percorridos e de combustível consumido para cada modelo de ônibus, nos cenários de 1 a 6, respectivamente. A quantidade total de ônibus permaneceu constante em todos os cenários, sendo avaliados um total de 1.802 ônibus.

Para a fase WTP, foram calculadas as emissões da produção dos combustíveis, considerando a o diesel S-500 e S-10, biodiesel, GNL e a eletricidade. No entanto, para a fase PTW, que considera as emissões durante a operação dos ônibus, não é necessário calcular as emissões do biodiesel de forma separada, visto que ele é considerado na mistura com o diesel, conforme indicado nos fatores de emissão utilizados como referência (BRASIL,2014). Portanto, para a PTW, foram calculadas as emissões considerando os combustíveis BS-500, BS-10, GNV e eletricidade.

Para calcular as emissões do Cenário 1, utilizou-se a quilometragem total percorrida e o combustível total consumido apresentados na Tabela 17 17. Esse cenário reflete as condições reais da frota em operação no sistema Transcol no ano de 2022, sendo utilizado com cenário de referência para as análises. As emissões deste cenário consideram os combustíveis BS-500, BS-10, GNV e eletricidade.

Tabela 17 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 1

Combustível	Quilometragem total percorrida	Combustível total consumido		
		litros	m³	MWh
BS-500	33.474.239,00	12.483.329,57	-	-
BS-10	83.542.713,52	32.498.419,36	-	-
híbrido (GNV)	100.404,00	-	30.188,70	-
híbrido (BS-10)		7.547,18	-	-
Eletricidade	492.020,73	-	-	841.355,45

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para calcular as emissões do Cenário 2, utilizou-se a quilometragem total percorrida e o combustível total consumido apresentados na Tabela 18. Esse cenário reflete a substituição dos ônibus movidos a BS-500 para BS-10, mantendo o ônibus híbrido e os ônibus elétricos. Neste cenário, todos os ônibus que usam diesel S-500 são considerados como diesel S-10, zerando assim as emissões associadas ao diesel S-500. As emissões deste cenário levam em consideração os combustíveis BS-10, GNV e eletricidade.

Tabela 18 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 2

Combustível	Quilometragem total percorrida	Combustível total consumido		
		Litros	m³	MWh
BS-500	-	-	-	-
BS-10	117.016.952,52	44.981.748,93	-	-
híbrido (GNV)	100.404,00	-	30.188,70	-
híbrido (BS-10)		7.547,18	-	-
Eletricidade	492.020,73	-	-	841.355,45

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para calcular as emissões do Cenário 4, utilizou-se a quilometragem total percorrida e o combustível total consumido apresentados na Tabela 19. Esse cenário reflete a substituição de 25% dos ônibus da frota movidos a diesel, considerando todos como sendo BS-10, por ônibus elétricos, mantendo o ônibus híbrido. As emissões deste cenário consideram os combustíveis BS-10, GNV e eletricidade.

Tabela 19 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 3

Combustível	Quilometragem total percorrida	Combustível total consumido		
		Litros	m³	MWh
BS-500	-	-	-	-
BS-10	87.762.714,39	33.723.802,87	-	-
híbrido (GNV)	100.404,00	-	30.188,70	-
híbrido (BS-10)		7.547,18	-	-
Eletricidade	29.760.615,36	-	-	50.890.652,27

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para calcular as emissões do Cenário 4, utilizou-se a quilometragem total percorrida e o combustível total consumido apresentados na Tabela 20. Esse cenário reflete a substituição de

50% dos ônibus da frota movidos a diesel, considerando todos como sendo BS-10, por ônibus elétricos, mantendo as emissões do ônibus híbrido. As emissões deste cenário consideram os combustíveis BS-10, GNV e eletricidade.

Tabela 20 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 4

Combustível	Quilometragem total percorrida	Combustível total consumido		
		Litros	m³	MWh
BS-500	-	-	-	-
BS-10	58.508.476,26	22.490.574,46	-	-
híbrido (GNV)	100.404,00	-	30.188,70	-
híbrido (BS-10)		7.547,18	-	-
Eletricidade	59.029.209,99	-	-	100.939.949,08

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para calcular as emissões do Cenário 5, utilizou-se a quilometragem total percorrida e o combustível total consumido apresentados na Tabela 21. Esse cenário reflete uma frota totalmente eletrificada, com a substituição de 100% dos ônibus da frota para ônibus elétricos. Portanto, as emissões deste cenário consideram apenas a eletricidade.

Tabela 21 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 5

Combustível	Quilometragem total percorrida	Combustível total consumido		
		Litros	m³	MWh
B500	-	-	-	-
BS-10	-	-	-	-
híbrido (GNV)	-	-	-	-
híbrido (BS-10)	-	-	-	-
Eletricidade	117.609.377,25	-	-	201.112.035,10

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para calcular as emissões do Cenário 6, utilizou-se a quilometragem total percorrida e o combustível consumido apresentada na Tabela 22. Esse cenário considera que todos os ônibus da frota sejam híbridos, com a proporção de mistura no motor girando em torno de 80% de GNV e 20% de BS-10. As emissões deste cenário consideram os combustíveis GNV e BS-10.

Tabela 22 - Quilometragem percorrida e combustível consumido no Cenário 6

Combustível	Quilometragem total percorrida	Combustível total consumido		
		litros	m³	MWh
BS-500	-	-	-	-
BS-10	-	-	-	-
híbrido (GNV)	117.609.377,25	-	35.361.884,76	-
híbrido (BS-10)		8.840.471,19	-	-
Eletricidade	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As emissões das fases WTP e PTW, e as emissões totais WTW para cada um dos seis cenários foram calculadas considerando os fatores de emissão levantados nos subcapítulos 6.7.1 (Tabela 12) e 6.7.2 (Tabela 16), e as quantidades de combustíveis consumidos pela frota, apresentados nas Tabelas 17 a 22. As emissões do total de GEE, expressas em unidade de CO_2e, foram determinadas utilizando a Equação 4. Os resultados dos cálculos serão apresentados no Capítulo 7.

Em relação as análises das categorias de impacto, as análises foram realizadas utilizando o método IMPACT 2002+, sendo avaliadas com base nos fatores de caracterização, conforme apresentado pela Tabela 23. As categorias foram selecionadas de acordo com os poluentes atmosféricos e GEE escolhidos, visando avaliar o impacto no ar e em áreas com alta densidade populacional. Os fatores de caracterização dos *Midpoints* baseiam-se em princípios de equivalência, expressando a quantidade em kg equivalentes de uma substância, comparada a uma substância de referência. Essas substâncias de referência são geralmente aquelas mais conhecidas por gerar determinado problema ambiental. Quando esses problemas ambientais são combinados, são multiplicados por um fator de caracterização de danos e transformados em um dano ambiental.

A normalização é o processo que converte os resultados das categorias de impacto em valores dimensionais, comparando-os com uma referência. Este processo permite entender a magnitude dos impactos em relação a uma base de referência, comparando entre diferentes categorias de impacto e identificando quais categorias têm maior relevância em um determinado contexto. A ponderação é utilizada para atribuir diferentes níveis de importância às categorias de impacto. Eles são aplicados após a normalização e servem para agregar os resultados normalizados em um único indicador final.

É calculado um valor agregado referente à soma dos impactos calculados para todas as categorias consideradas e para todos os cenários avaliado, que representa uma medida global dos impactos ambientais considerando todas as categorias e cenários analisados juntos.

Tabela 23 - Categorias de impacto e fatores do IMPAC 2002+

Categoria de Impacto		Substância	Fator de Caracterização	Unidade	Fator de normalização	Ponderação
Endpoint	*Midpoint*					
Mudanças climáticas	Aquecimento global	Monóxido de Carbono (CO)	1,57	kgCO_2e	1.01×10^{-4}	1,0
		Dióxido de Carbono (CO_2)	1,00			
		Óxido Nitroso (N_2O)	156,00			
		Metano (CH_4)	10,35			
Saúde humana	Respiração inorgânica	Material Particulado (MP)	1,00	kg$MP_{2,5}$e	$2{,}01\times 10^{5}$	$7{,}0\times 10^{-4}$
		Monóxido de Carbono (CO)	0,0010			
		Dióxido de Enxofre (SO_2)	0,0780			
		Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	0,1273			
	Respiração orgânica	Hidrocarboneto não metano $(NMHC)$	0,60094	kgC_2H_4e	$6{,}62\times 10^{7}$	$2{,}13\times 10^{-6}$
		Metano (CH_4)	0,0060			
Qualidade dos ecossistemas	Acidificação aquática	Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	0,70	kgSO_2e	22,00	-
		Dióxido de Enxofre (SO_2)	1,0			
	Acidificação/ Nutrição terrestre	Óxidos de Nitrogênio (NO_x)	5,59		$7{,}02\times 10^{-5}$	1,04
		Dióxido de Enxofre (SO_2)	1,00			

Fonte: Adaptado de IMPACT 2002+ e OpenLCA (2024)

No Capítulo 7, serão apresentados os resultados dos cálculos das emissões dos poluentes atmosféricos e GEE selecionados, tanto nas fases WTP quanto PTW, além das emissões totais

WTW e as discussões dos resultados. Também serão realizadas análises das categorias de impacto e uma análise geral dos resultados.

7. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados dos cálculos realizados, conforme o nono passo do método proposto no Capítulo 4. Serão analisados e interprestados os resultados dos cálculos aplicados ao sistema Transcol, discutindo suas implicações. As Tabelas 24 e 25 apresentam os resultados das emissões dos poluentes atmosféricos e de GEE para os seis cenários analisados, durante as fases WTP e PTW, respectivamente.

Para a fase WTP, considerou-se as cadeias produtivas dos combustíveis diesel S-500 e S-10, biodiesel, GNL e eletricidade. A Tabela 24 resume as emissões para cada cenário.

Tabela 24 - Emissões da fase WTP em todos os cenários

Cenário	Emissão total – Fase WTP (kg x 10^3)								
	CO	MP	SO_2	NO_x	$NMHC$	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2e
1	15,193	21,244	3,928	1,756	0,935	1.011,014	0,428	0,077	1.044,903
2	15,313	21,563	3,933	1,769	0,929	976,842	0,408	0,075	1.009,455
3	12,599	17,867	3,096	1,417	0,740	811,953	0,339	0,065	839,895
4	9,707	14,060	2,213	1,051	0,533	634,739	0,259	0,055	657,448
5	3,907	6,432	0,444	0,312	0,108	278,992	0,096	0,034	291,143
6	12,942	9,464	1,485	9,486	14,328	1.180,683	2,769	0,061	1.279,817

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Na fase PTW, que representa o abastecimento e operação dos ônibus, considerou-se os combustíveis diesel BS-500 e BS-10, GNV e eletricidade. A Tabela 25 apresenta as emissões para cada cenário.

Tabela 25 - Emissões da fase PTW em todos os cenários

Cenário	Emissão total – Fase PTW (kg x 10^3)								
	CO	MP	SO_2	NO_x	$NMHC$	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2e
1	74,933	5,228	7,794	7,617	377,803	117.167,485	62,143	3,104	119.866,806
2	45,590	2,070	0,534	3,425	217,621	117.167,485	62,143	3,104	119.866,806
3	34,197	1,552	0,400	2,571	163,167	87.863,051	46,607	2,327	89.887,334
4	22,829	1,035	0,267	1,718	108,835	58.623,739	31,105	1,552	59.974,484
5	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
6	79,670	0,760	0,105	13,048	56,905	93.700,154	79,387	0,645	96.242,081

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Por fim, foram calculadas as emissões totais WTW de CO, MP, SO_2, $NMHC$, NO_x, CO_2, CH_4 e N_2O para cada um dos seis cenários definidos. As emissões totais do ciclo de vida resultam da soma das emissões da fase WTP (Tabela 24) com a fase PTW (Tabela 25). A Tabela 26 apresenta as emissões totais em todos os seis cenários.

Tabela 26 - Emissões WTW em todos os cenários

Cenário	Emissão total – WTW (kg x 10^3)								
	CO	MP	SO_2	NO_x	$NMHC$	CO_2	CH_4	N_2O	CO_2e
1	90,126	26,472	11,722	9,373	378,738	118.178,499	62,570	3,182	120.911,709
2	60,902	23,629	4,466	5,193	218,513	118.124,538	62,540	3,179	120.856,015
3	46,796	19,419	3,496	3,987	163,907	88.675,004	46,946	2,393	90.727,229
4	32,536	15,095	2,480	2,769	109,368	59.258,478	31,364	1,607	60.631,932
5	3,907	6,432	0,444	0,312	0,108	278,992	0,096	0,034	291,143
6	92,613	10,224	1,590	22,534	71,234	94.880,837	82,157	0,706	97.521,898

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7.1. EMISSÃO DE POLUENTES ATMOSFÉRICOS

Neste subcapítulo, serão discutidos os resultados das emissões para os poluentes atmosféricos CO, MP, SO_2, NO_x e $NMHC$.

7.1.1. Emissões de CO

As emissões de CO para os seis cenários analisados, durante as fases WTP, PTW e as emissões totais WTW são apresentadas na Figura 24. Observa-se que a maior contribuição das emissões ocorre durante a fase PTW, exceto para o Cenário 5, onde não há emissão de CO associadas à operação do ônibus elétrico.

No Cenário 1, que reflete as emissões reais da frota em operação no sistema Transcol, as emissões da fase PTW (74,93 kgCOx10^3) representam aproximadamente 83,14% das emissões totais WTW, que é de 90,13 kgCOx10^3. Já a fase WTP é responsável por 16,85% das emissões totais desse cenário (15,19 kgCOx10^3). Esse resultado sugere que as emissões estão majoritariamente associadas à queima de combustível nos motores a diesel.

No Cenário 2, que reflete a substituição dos ônibus movidos a BS-500 por ônibus movidos à BS-10, ocorre um aumento nas emissões durante na fase WTP (15,31 kgCOx10^3) em comparação com o Cenário 1, devido às diferenças nos fatores de emissão da produção do combustível diesel S-10. A fase WTP representa 25,13% das emissões totais WTW nesse cenário. Apesar disso, a fase PTW (45,59 kgCOx10^3) continua sendo a principal fonte de contribuição das emissões, responsável por 74,86% das emissões totais WTW (60,90 kgCOx10^3). Isso pode ser atribuído ao fato de que os ônibus mais novos, que utilizam BS-10,

possuem uma queima mais limpa e completa, evitando a formação de CO durante o processo de combustão, além de incorporarem tecnologias avançadas de controle de emissões.

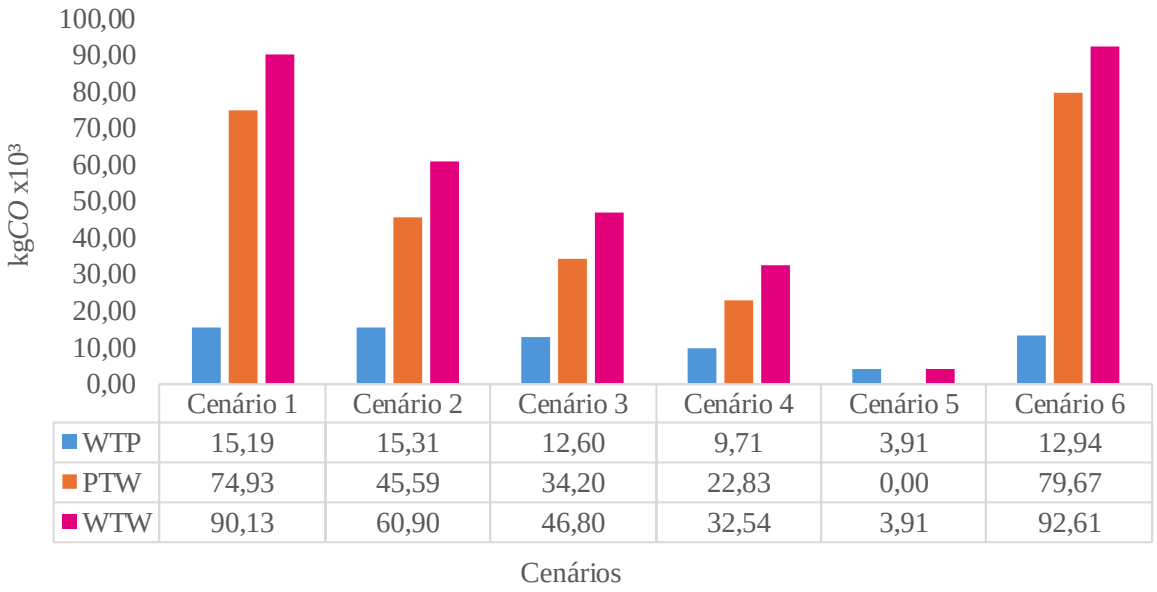
No Cenário 3, que reflete a substituição de 25% dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos, isso é, começa a eletrificação parcial da frota, ocorre redução das emissões em ambas as fases, quando comparadas ao Cenário 1, devido a redução do combustível diesel. Em relação ao Cenário 1, há uma redução de 48,08% nas emissões totais de CO, que resultam em 46,80 kgCOx10³. Nesse cenário, a fase WTP (12,60 kgCOx10³) é responsável por 26,92% das emissões totais e a fase PTW (34,20 kgCOx10³) é responsável por 73,07% das emissões totais.

No Cenário 4, com o aumento da proporção de substituição dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos para 50%, há uma redução de 63,90% nas emissões totais WTW de CO em comparação com o cenário real, totalizando 32,54 kgCOx10³. Tanto a fase WTP (9,71 kgCOx10³), que representa 29,84% das emissões totais, quanto a fase PTW (22,83 kgCOx10³), que representa 70,15% das emissões totais, apresentam menores emissões em comparação com os cenários anteriores, destacando o potencial da eletrificação da frota como uma estratégia para mitigar as emissões de CO no setor de transporte.

No Cenário 5, que considera uma frota totalmente eletrificada (100% de ônibus elétricos), as emissões totais de CO são reduzidas em 95,66% em comparação com o Cenário 1, totalizando em 3,91 kgCOx10³. A fase PTW resulta em redução de 100% das emissões, pois não ocorre emissão de poluentes durante a operação dos ônibus elétricos. Portanto, a fase WTP, correspondente à etapa de produção de energia elétrica, é responsável por todas as emissões neste cenário (3,91 kgCOx10³).

No Cenário 6, que representa toda a frota de ônibus híbridos (GNV – diesel), variando na proporção de 80% de GNV e 20% de BS-10, observa-se um aumento de 2,76% nas emissões totais WTW de CO em comparação com o Cenário 1, totalizando em 92,61 kgCOx10³. Os resultados das emissões totais nesse cenário superam as emissões reais da frota em operação. Isso se deve ao processo de combustão do GNV, que pode resultar em maiores emissões de CO. Assim como nos demais cenários, a fase PTW (79,67 kgCOx10³) é responsável pela maior parcela de contribuição das emissões totais, contribuindo com 86,02%, enquanto a fase WTP (12,94 kgCOx10³) contribui com 13,97% das emissões totais.

Figura 24 – Emissões de CO (kg x10³)



	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
WTP	15,19	15,31	12,60	9,71	3,91	12,94
PTW	74,93	45,59	34,20	22,83	0,00	79,67
WTW	90,13	60,90	46,80	32,54	3,91	92,61

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 25 apresenta as emissões totais WTW de CO para os seis cenários analisados. Observa-se que o Cenário 6 registra as maiores emissões desse poluente atmosférico, o que desqualifica a opção de uma frota totalmente composta por ônibus híbridos ou utilizando GNV como combustível para reduzir as emissões deste poluente, visto que resultaria em um aumento destas. Em comparação com o Cenário 1, que reflete as emissões reais do sistema Transcol, nesse cenário ocorre um aumento de 2,76% nas emissões totais, totalizando em 92,613 kgCOx10³.

Além disso, o Cenário 1, que representa a composição atual da frota em operação, também demonstra valores elevados de emissão, de 90,13 kgCOx10³, indicando que a configuração do Transcol, considerando os modelos e combustíveis utilizados, não é a mais eficaz em termos de controle e redução de emissões de CO. A substituição dos ônibus movidos à BS-500 por ônibus movidos à BS-10, conforme evidenciado pelo Cenário 2 reduz em 32,43% as emissões totais WTW de CO em comparação com o Cenário 1, resultando em 60,90 kgCOx10³.

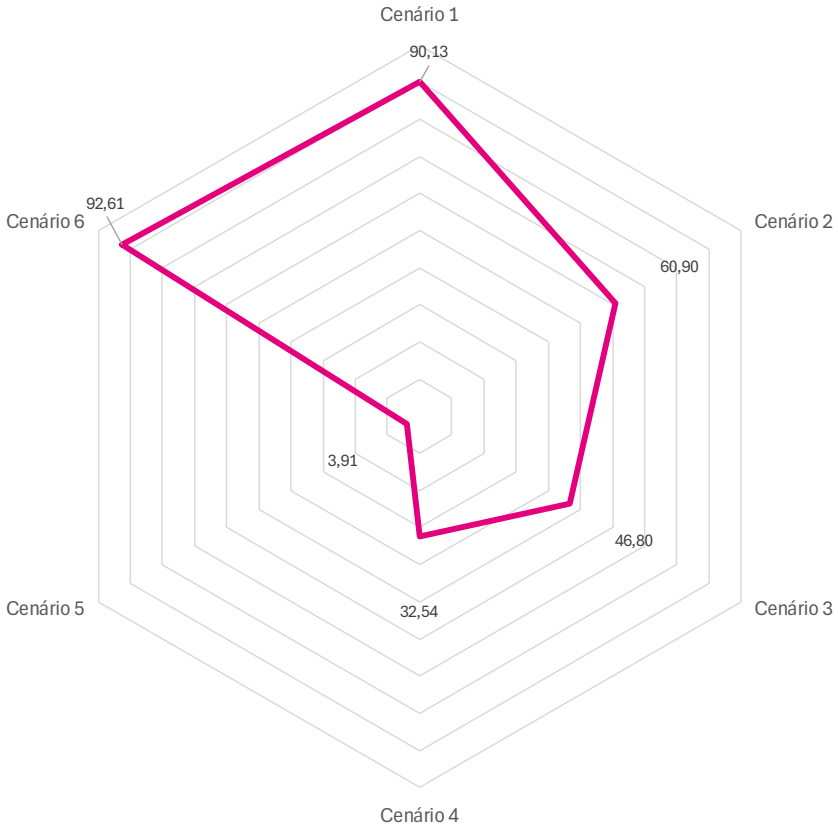
Observa-se, na Figura 25, uma tendência de redução nas emissões de CO à medida que aumenta a proporção de ônibus elétricos na frota e que ocorre a retirada dos ônibus movidos à diesel. Os cenários que contemplam a introdução de ônibus elétricos, ou uma frota totalmente eletrificada, exibem os menores índices de emissão desse poluente atmosférico. No Cenário 3, observa-se

uma redução de 48,08% nas emissões totais WTW de CO, que resultam em 46,79 kgCOx10³. No Cenário 4, observa-se uma redução de 63,90% nas emissões totais WTW de CO, totalizando 32,53 kgCOx10³. Isso sugere que a adoção de tecnologias de propulsão mais limpas, mesmo que parcialmente, pode desempenhar um papel significativo na redução das emissões deste poluente atmosférico no sistema de transporte. Já a eletrificação total da frota, como representado pelo Cenário 5, resulta na redução de 95,66% das emissões totais WTW de CO, em comparação com o cenário real, totalizando em 3,907 kgCOx10³.

As reduções dos cenários, comparados com o cenário real da frota em operação (Cenário 1), são de:

- Cenário 2 (60,902 kgCOx10³): redução de 32,43%
- Cenário 3 (46,796 kgCOx10³): redução de 48,08%
- Cenário 4 (32,536 kgCOx10³): redução de 63,90%
- Cenário 5 (3,907 kgCOx10³): redução de 95,66%
- Cenário 6 (92,613 kgCOx10³): aumento de 2,76%

Figura 25 - Emissões WTW de CO



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7.1.2. Emissões de MP

As emissões de MP para os seis cenários analisados, durante as fases WTP, PTW e as emissões totais WTW são apresentadas na Figura 26. Observa-se que a maior contribuição das emissões ocorre durante a fase WTP, indicando que as etapas associadas a produção do combustível, como a extração, refino e transporte, tem maior influência nas emissões totais desse poluente atmosférico.

No Cenário 1, que reflete as emissões reais da frota em operação no sistema Transcol, a fase WTP (21,24 kgMPx10³) representa aproximadamente 80,24% das emissões totais WTW, que é de 26,47 kgMPx10³. Já a fase PTW (5,23 kgMPx10³) é responsável por 19,75% das emissões totais desse cenário. Esse resultado sugere que as emissões estão majoritariamente associadas às etapas de produção do combustível diesel.

No Cenário 2, que reflete a substituição dos ônibus movidos a BS-500 por ônibus movidos à BS-10, ocorre uma redução de 10,74% nas emissões totais de MP (23,63 kgMPx10³), em comparação com o Cenário 1. A fase WTP (21,56 kgMPx10³) é a principal contribuinte para as emissões totais do ciclo de vida desse poluente, contribuindo com 91,23%. A fase PTW (2,07 kgMPx10³) contribui com 8,76% para as emissões totais. Essa redução é atribuída às propriedades do diesel S-10, que incluem uma melhor ignição e a redução das emissões de fumaça e particulados (Petrobras, 2023). Além disso, a adoção de sistemas de pós-tratamento dos gases de escape em ônibus da fase P-7 do Proconve, que utilizam o S-10, contribui para a redução da formação e acúmulo de MP.

No Cenário 3, que reflete a substituição de 25% dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos, ocorre uma redução das emissões em ambas as fases, quando comparadas ao Cenário 1. Isso se deve, principalmente, à redução da utilização do combustível diesel na frota. Em relação ao Cenário 1, há uma redução de 26,66% nas emissões totais de MP, que resultam em 19,42 kgMPx10³. Nesse cenário, a fase WTP (17,87 kgMPx10³ é responsável por 92,01% das emissões totais e a fase PTW (1,55 kgMPx10³ é responsável por 7,98% das emissões totais.

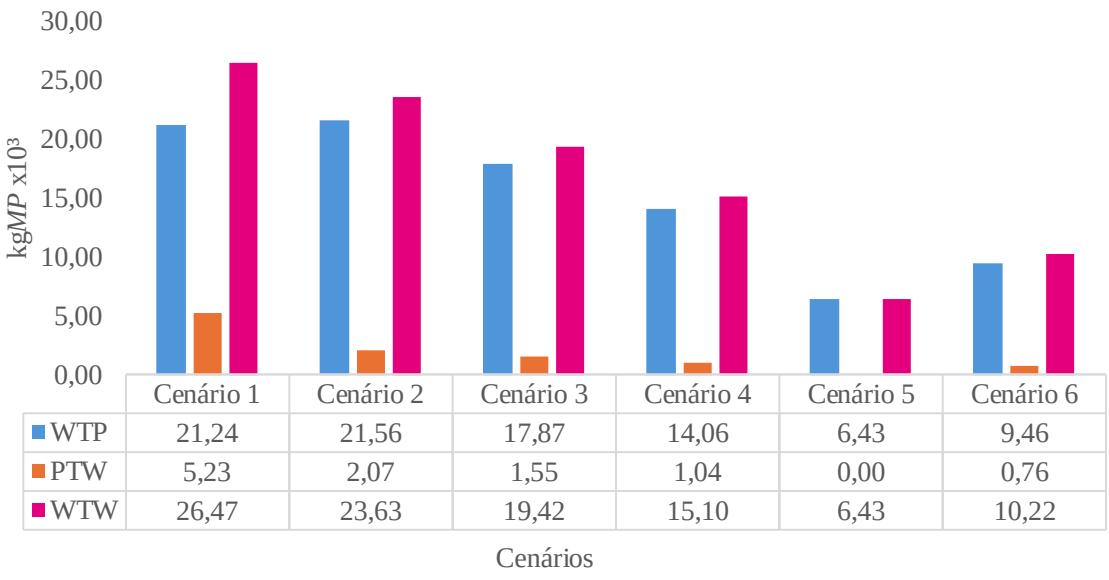
No Cenário 4, com o aumento da proporção de substituição dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos para 50%, há uma redução de 42,86% nas emissões totais WTW de MP em

comparação com o cenário real, totalizando 15,10 kgMPx10³. Tanto a fase WTP (14,06 kgMPx10³), que representa 93,11% das emissões totais, quanto a fase PTW (1,04 kgMPx10³), que representa 6,88% das emissões totais, apresentam menores emissões em comparação com os cenários anteriores, destacando o potencial da eletrificação da frota como uma estratégia para mitigar as emissões de MP no setor de transporte.

No Cenário 5, que considera uma frota totalmente eletrificada (100% de ônibus elétricos), as emissões totais de MP são reduzidas em 75,69% em comparação com o Cenário 1, totalizando em 6,43 kgMPx10³. A fase PTW resulta em redução de 100% das emissões, pois não ocorre emissão de poluentes durante a operação dos ônibus elétricos. Portanto, a fase WTP, correspondente à etapa de produção de energia elétrica, é responsável por todas as emissões neste cenário (6,43 kgMPx10³).

No Cenário 6, que representa toda a frota de ônibus híbridos (GNV – diesel), variando na proporção de 80% de GNV e 20% de BS-10, observa-se uma redução de 61,35% das emissões totais de MP, em comparação com o Cenário 1, totalizando em 10,22 kgMPx10³. A fase WTP (9,46 kgMPx10³) representa 95,56% das emissões totais. Já na fase PTW (0,76 kgMPx10³), as emissões são reduzidas, representando 7,43%, principalmente em comparação com os cenários que ainda utilizam o diesel como combustível (Cenários 1, 2 e 3). Isso ocorre porque o GNV, composto principalmente por metano, reduz a formação de MP em comparação com o diesel.

Figura 26 - Emissões de MP (kg x10³)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 27 apresenta as emissões totais WTW de MP para os seis cenários analisados. Observa-se que o Cenário 1, que representa a composição real da frota do Transcol em operação, apresenta as maiores emissões desse poluente atmosférico (26,47 kgMPx10³) devido a cadeia de produção do diesel. Além disso, a parcela de ônibus movidos a BS-500 em operação na frota, nesse cenário, pode contribuir para as emissões devido a idade da frota, que influencia na queima incompleta do combustível, resultando em maiores emissões de particulados.

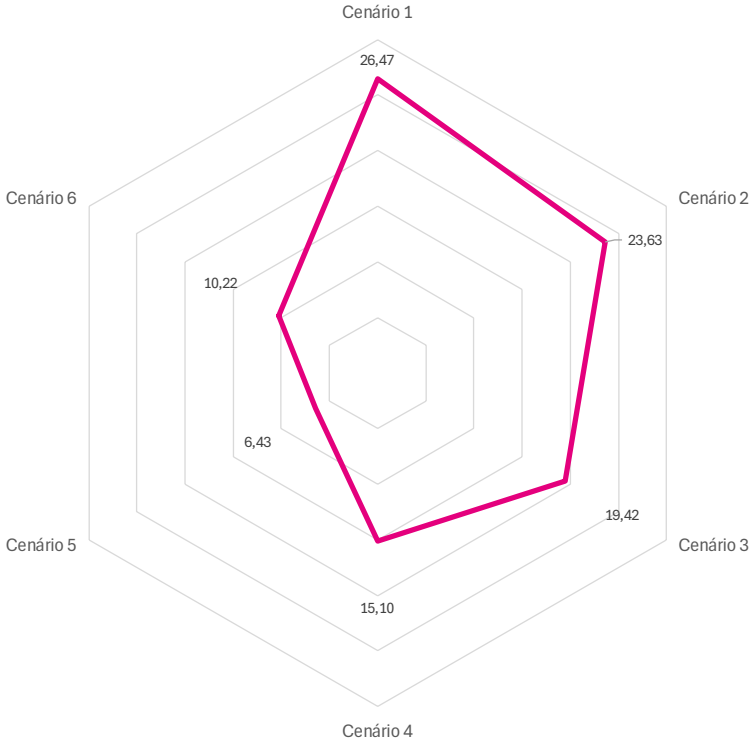
No Cenário 2, embora haja uma redução de 10,74% nas emissões totais em relação ao cenário real, ainda são observados valores elevados de emissão (23,629 kgMPx10³). O Cenário 6, que considera uma frota híbrida GNV-diesel, também apresenta reduções comparadas ao Cenário 1, com reduções de 61,35% das emissões totais do ciclo de vida, que totalizam em 10,224 kgMPx10³.

Observa-se, na Figura 27, uma tendência de redução nas emissões de MP à medida que aumenta a proporção de ônibus elétricos na frota e que ocorre a retirada dos ônibus movidos à diesel. Os cenários que contemplam a introdução de ônibus elétricos, ou uma frota totalmente eletrificada, exibem os menores índices de emissão desse poluente atmosférico. No Cenário 3, observa-se uma redução de 26,66% nas emissões totais WTW de MP, que resultam em 19,419 kgMPx10³. No Cenário 4, observa-se uma redução de 42,86% nas emissões totais WTW de MP, totalizando 15,095 kgMPx10³. Isso sugere que a adoção de tecnologias de propulsão mais limpas, mesmo que parcialmente, pode desempenhar um papel significativo na redução das emissões deste poluente atmosférico no sistema de transporte. Já a eletrificação total da frota, como representado pelo Cenário 5, resulta na redução de 75,69% das emissões totais WTW de MP, em comparação com o cenário real, totalizando em 6,432 kgMPx10³.

As reduções dos cenários, comparados com o cenário real da frota em operação (Cenário 1), são de:

- Cenário 2 (23,629 kgMPx10³): redução de 10,74%
- Cenário 3 (19,419 kgMPx10³): redução de 26,66%
- Cenário 4 (15,095 kgMPx10³): redução de 42,86%
- Cenário 5 (6,432 kgMPx10³): redução de 75,69%
- Cenário 6 (10,224 kgMPx10³): redução de 61,35%

Figura 27 - Emissões WTW de MP



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7.1.3. Emissões de SO_2

As emissões de SO_2 para os seis cenários analisados, durante as fases WTP, PTW e as emissões totais WTW são apresentadas na Figura 28. Nota-se que apenas o Cenário 1 apresenta as maiores emissões associadas à fase PTW, enquanto nos demais cenários, a fase WTP é a que apresenta as maiores emissões. Isso se deve a utilização do diesel BS-500 no Cenário 1. predominante.

No Cenário 1, que reflete as emissões reais da frota em operação no sistema Transcol, as emissões da fase PTW (7,79 kgSO_2x10³) representam aproximadamente 66,46% das emissões totais WTW, que totalizam em 11,72 kgSO_2x10³. Isso evidencia que a queima de combustível nos motores a diesel é a principal fonte dessas emissões, especialmente devido à utilização do diesel S-500 na frota, caracterizado por uma maior concentração de enxofre, resultando em emissões mais elevadas desse poluente atmosférico. Já a fase WTP (3,93 kgSO_2x10³) é responsável por 33,53% das emissões totais desse cenário.

No Cenário 2, que reflete a substituição dos ônibus movidos a BS-500 por ônibus movidos à BS-10, ocorre uma redução de 61,91% das emissões totais de SO_2, que apresentam um total de 4,46 kgSO_2x10³. A fase WTP (3,93 kgSO_2x10³) é responsável por 88,11% das emissões totais e fase PTW (0,53 kgSO_2x10³) é responsável por 11,88% das emissões totais. Esse resultado se deve ao menor teor de enxofre presente no diesel S-10, em comparação com o S-500, resultando em menores emissões de SO_2 durante a queima do combustível diesel. As regulamentações ambientais têm estabelecido limites cada vez mais rigorosos para os teores de enxofre no diesel, visando a redução adicional das emissões de SO_2 e a melhoria da qualidade do ar.

No Cenário 3, que reflete a substituição de 25% dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos, isso é, começa a eletrificação parcial da frota, ocorre redução das emissões em ambas as fases, quando comparadas ao Cenário 1, devido a redução do combustível diesel. Em relação ao Cenário 1, há uma redução de 70,16% nas emissões totais de SO_2, que resultam em 3,50 kgSO_2x10³. Nesse cenário, a fase WTP (3,10 kgSO_2x10³) é responsável por 88,57% das emissões totais e a fase PTW (0,40 kgSO_2x10³) é responsável por 11,42% das emissões totais.

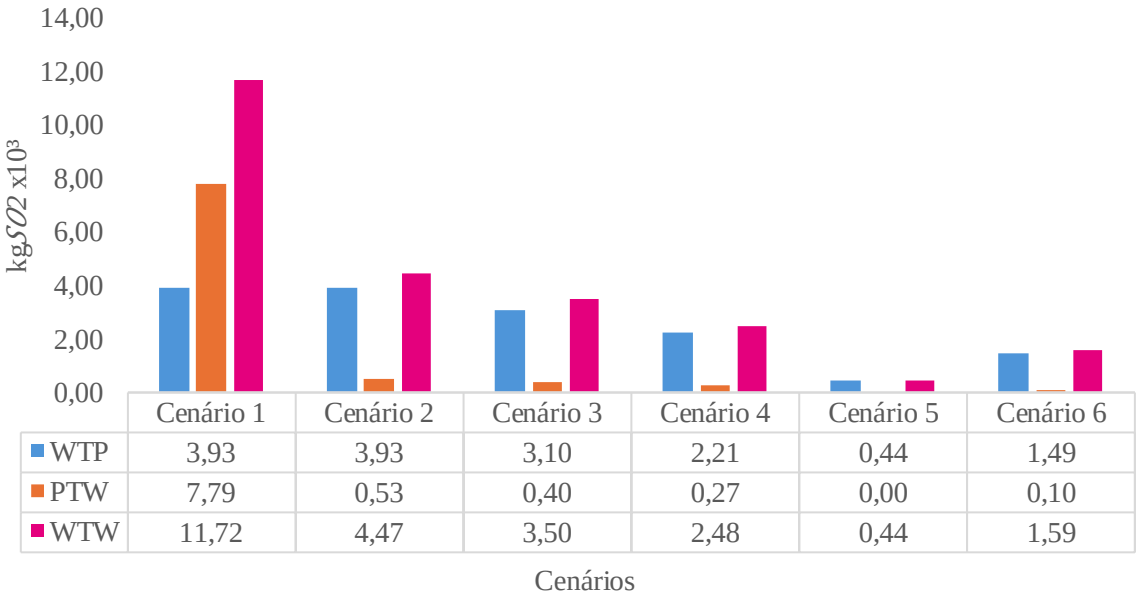
No Cenário 4, com o aumento da proporção de substituição dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos para 50%, há uma redução de 78,83% nas emissões totais WTW de SO_2 em comparação com o cenário real, totalizando 2,48 kgSO_2x10³. Tanto a fase WTP (2,21 kgSO_2x10³), que representa 89,11% das emissões totais, quanto a fase PTW (0,27 kgSO_2x10³), que representa 10,88% das emissões totais, apresentam menores emissões em comparação com os cenários anteriores, destacando o potencial da eletrificação da frota como uma estratégia para mitigar as emissões de SO_2 no setor de transporte.

No Cenário 5, que considera uma frota totalmente eletrificada (100% de ônibus elétricos), as emissões totais de SO_2 são reduzidas em 96,21% em comparação com o Cenário 1, totalizando em 0,44 kgSO_2x10³. A fase PTW resulta em redução de 100% das emissões, pois não ocorre emissão de poluentes durante a operação dos ônibus elétricos. Portanto, a fase WTP, correspondente à etapa de produção de energia elétrica, é responsável por todas as emissões neste cenário (0,44 kgSO_2x10³).

No Cenário 6, que representa toda a frota de ônibus híbridos (GNV – diesel), variando na proporção de 80% de GNV e 20% de BS-10, observa-se uma redução de 86,41% das emissões

totais de SO_2, em comparação com o Cenário 1, totalizando em 1,59 kgSO_2x10³. A fase WTP (1,49 kgSO_2x10³) é a maior contribuinte, representando 93,71% das emissões totais. Já na fase PTW (0,10 kgSO_2x10³), as emissões são reduzidas, representando 6,28%, pois o GNV é praticamente livre de enxofre em comparação com o diesel.

Figura 28 – Emissões de SO_2 (kg x10³)



	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
WTP	3,93	3,93	3,10	2,21	0,44	1,49
PTW	7,79	0,53	0,40	0,27	0,00	0,10
WTW	11,72	4,47	3,50	2,48	0,44	1,59

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 29 apresenta as emissões totais WTW de SO_2 para os seis cenários analisados. Observa-se que o Cenário 1, que representa a composição real da frota em operação no sistema Transcol, registra as maiores emissões (11,72 kgSO_2x10³). Isso se deve principalmente ao uso de BS-500, que contém maior teor de enxofre, resultando no aumento da formação e emissão de SO_2.

Ao analisar o Cenário 2, que reflete a substituição do diesel BS-500 pelo BS-10, que contém menor quantidade de enxofre na sua composição, observa-se uma redução de 61,91% nas emissões totais WTW, que resultam em 4,46 kgSO_2x10³. Isso sugere que, em termos de redução das emissões de SO_2, a transição para um diesel mais limpo é uma medida eficiente.

Ao analisar a redução dos ônibus movidos à diesel na frota em operação, mesmo considerando o BS-10, nota-se que ocorrem maiores reduções das emissões desse poluente. No Cenário 3, observa-se uma redução de 70,16% nas emissões totais WTW de SO_2, que resultam em 3,496

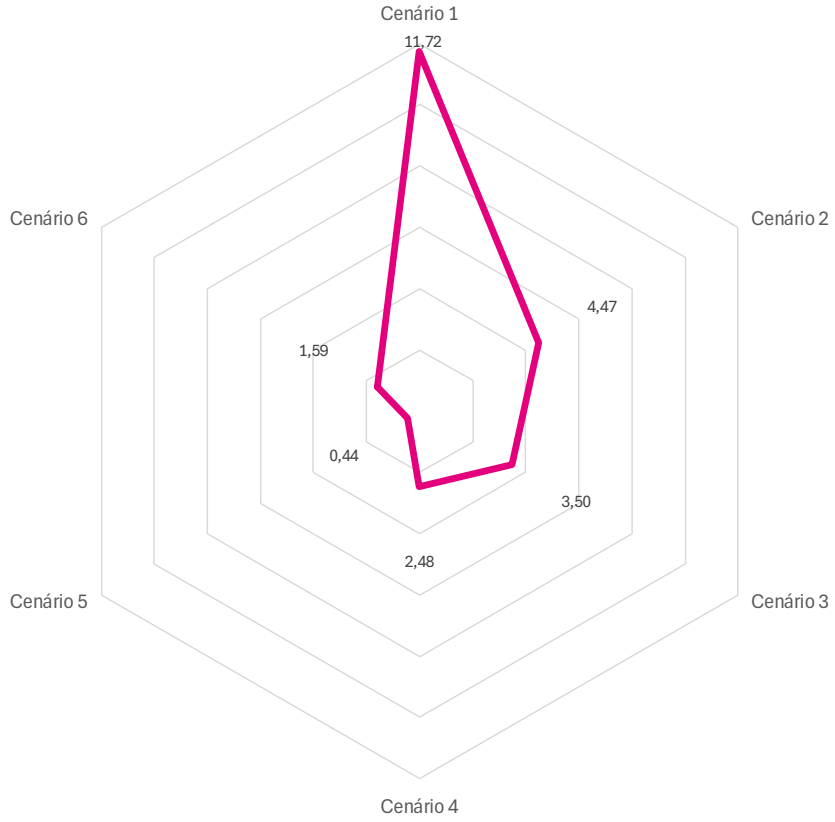
kgSO_2x10³. No Cenário 4, observa-se uma redução de 78,83% nas emissões totais WTW de SO_2, totalizando 2,480 kgSO_2x10³. Isso sugere que a adoção de tecnologias de propulsão mais limpas, mesmo que parcialmente, pode desempenhar um papel significativo na redução das emissões deste poluente atmosférico no sistema de transporte. Já a eletrificação total da frota, como representado pelo Cenário 5, resulta na redução de 96,21% das emissões totais WTW de SO_2, em comparação com o cenário real, totalizando em 0,444 kgSO_2x10³. Portanto, a eliminação dos ônibus movidos à diesel da frota resultará em uma redução quase total das emissões deste poluente, contribuindo para uma melhoria da qualidade do ar.

E mesmo apresentando uma porcentagem de diesel na mistura em ônibus híbridos, representados pelo Cenário 6, ocorre uma redução de 86,41% das emissões totais em comparação com o Cenário 1, resultando em 1,590 kgSO_2x10³. Isso ocorre pois, durante a queima do GNV, as emissões SO_2 são praticamente nulas, sendo, portando, representadas nesse cenário apenas pela % de mistura com o diesel.

As reduções dos cenários, comparados com o cenário real da frota em operação (Cenário 1), são de:

- Cenário 2 (4,466 kgSO_2x10³): redução de 61,91%
- Cenário 3 (3,496 kgSO_2x10³): redução de 70,16%
- Cenário 4 (2,480 kgSO_2x10³): redução de 78,83%
- Cenário 5 (0,444 kgSO_2x10³): redução de 96,21%
- Cenário 6 (1,590 kgSO_2x10³): redução de 86,41%

Figura 29 - Emissões WTW de SO_2



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7.1.4. Emissões de NO_x

As emissões de NO_x para os seis cenários analisados, durante as fases WTP, PTW e as emissões totais WTW são apresentadas na Figura 30. Observa-se que para todos os cenários, a fase PTW é a que apresenta maior contribuição das emissões totais WTW, exceto para o Cenário 5, onde não há emissão de NO_x associadas à operação do ônibus elétrico.

No Cenário 1, que reflete as emissões reais da frota em operação no sistema Transcol, as emissões da fase PTW (7,62 kgNO_xx10³) representam aproximadamente 81,32% das emissões totais WTW, que é de 9,37 kgNO_xx10³. Já a fase WTP (1,76 kgNO_xx10³) é responsável por 18,78% das emissões totais desse cenário. Durante a operação dos ônibus com motores a combustão interna, o combustível é queimado dentro do motor, onde a mistura ar-combustível é comprimida e inflamada. Isso pode promover a formação de NO_x a partir do nitrogênio e do oxigênio presentes no ar, especialmente em casos de combustão incompleta, que pode ocorrer devido ao tipo de combustível utilizado ou à idade da frota.

No Cenário 2, que reflete a substituição dos ônibus movidos a BS-500 por ônibus movidos à BS-10, ocorre uma redução de 44,60% nas emissões de NO_x em comparação com o Cenário 1, totalizando 5,19 kgNO_xx10³. A fase WTP (1,77 kgNO_xx10³) representa 34,10% das emissões totais WTW nesse cenário. Apesar disso, a fase PTW (3,43 kgNO_xx10³) continua sendo a principal fonte de emissões, representando 66,08% das emissões totais, mas é reduzida devido à adoção de ônibus movidos a diesel BS-10, que possuem características de combustão mais limpa e utilizam tecnologias avançadas. A fase P-7 do Proconve, à qual pertencem os ônibus que utilizam o BS-10, requer a adoção de sistemas de pós-tratamento dos gases, resultando em menores emissões deste poluente, não apenas devido à composição do combustível.

No Cenário 3, que reflete a substituição de 25% dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos, isso é, começa a eletrificação parcial da frota, ocorre redução das emissões em ambas as fases, quando comparadas ao Cenário 1, devido a redução do combustível diesel. Em relação ao Cenário 1, há uma redução de 57,47% nas emissões totais de NO_x, que resultam em 3,99 kgNO_xx10³. Nesse cenário, a fase WTP (1,42 kgNO_xx10³) é responsável por 35,58% das emissões totais e a fase PTW (2,57 kgNO_xx10³) é responsável por 64,41% das emissões totais.

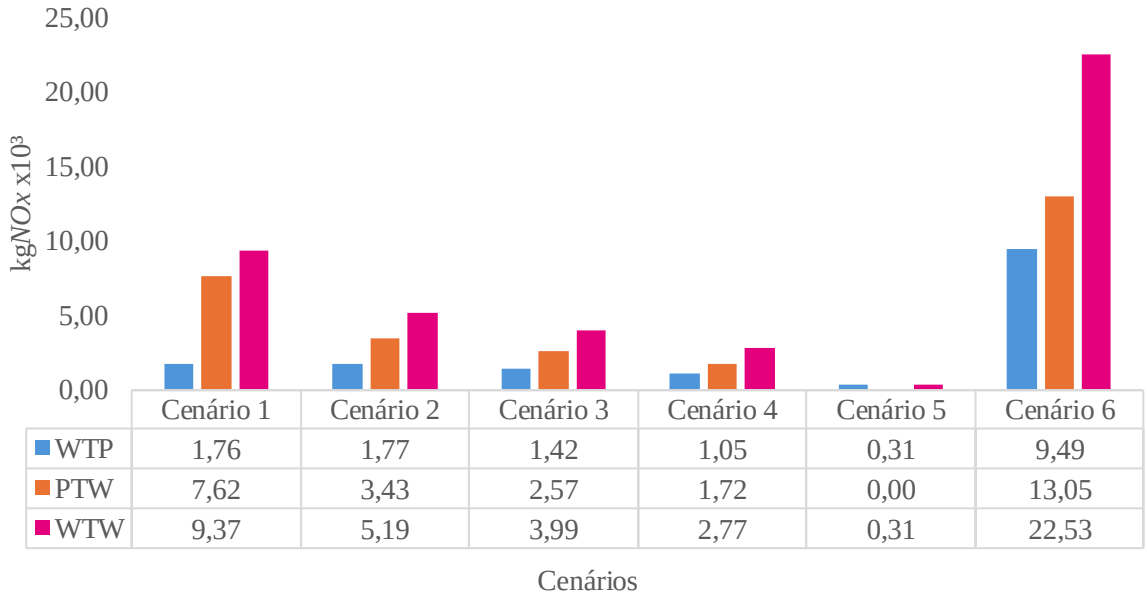
No Cenário 4, com o aumento da proporção de substituição dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos para 50%, há uma redução de 70,47% nas emissões totais WTW de NO_x em comparação com o cenário real, totalizando 2,77 kgNO_xx10³. Nesse cenário, a fase WTP (1,05 kgNO_xx10³) é responsável por 37,90% das emissões totais e a fase PTW (1,72 kgNO_xx10³) é responsável por 62,09% das emissões totais.

No Cenário 5, que considera uma frota totalmente eletrificada (100% de ônibus elétricos), as emissões totais de NO_x são reduzidas em 96,67%em comparação com o Cenário 1, totalizando em 0,31 kgNO_xx10³). A fase PTW resulta em redução de 100% das emissões, pois não ocorre emissão de poluentes durante a operação dos ônibus elétricos. Portanto, a fase WTP, correspondente à etapa de produção de energia elétrica, é responsável por todas as emissões neste cenário (0,31 kgNO_xx10³).

No Cenário 6, que representa toda a frota de ônibus híbridos (GNV – diesel), variando na proporção de 80% de GNV e 20% de BS-10, observa-se um aumento de 140,38% (acima de 100%) nas emissões totais WTW de NO_x em comparação com o Cenário 1, totalizando em

22,53 kgNO_xx10³. Isso se deve ao processo de combustão desse combustível, já que as altas temperaturas durante a combustão podem ser suficientes para causar a oxidação do nitrogênio atmosférico, resultando na formação de NO_x. Esse aumento é determinado pelo fator de emissão associado ao uso do GNV, com valores mais elevados do que os do combustível diesel. Assim como nos demais cenários, a fase PTW (13,05 kgNO_xx10³) é responsável pela maior parcela de contribuição das emissões totais, contribuindo com 57,92%, enquanto a fase WTP (9,49 kgNO_xx10³) contribui com 42,12% das emissões totais.

Figura 30 – Emissões de NO_x (kg x10³)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 31 apresenta as emissões totais WTW de NO_x para os seis cenários analisados. Observa-se que o Cenário 6 registra as maiores emissões desse poluente atmosférico em comparação com os demais cenários (22,53 kgNO_xx10³), o que desqualifica a opção de uma frota totalmente composta por ônibus híbridos ou utilizando GNV como combustível para reduzir as emissões deste poluente, visto que resultaria em um aumento destas. Isso ocorre devido à associação da queima do GNV com a formação desse poluente atmosférico. Em comparação com a frota atual, ocorre um aumento de 140% nas emissões nesse cenário.

o Cenário 1, que representa a composição atual da frota em operação, também demonstra valores elevados de emissão, de 9,37 kgNO_xx10³, indicando que a configuração do Transcol, considerando os modelos e combustíveis utilizados, não é a mais eficaz em termos de controle e redução de emissões de NO_x. Isso se deve ao uso do BS-500, que está associado a uma maior

emissão de poluentes durante a queima do combustível, é adotado por ônibus mais antigos em operação na frota. Além disso, esses ônibus mais antigos não são obrigados a adotar sistemas de pós-tratamento dos gases de escape, conforme as regulamentações da fase vigente do Proconve.

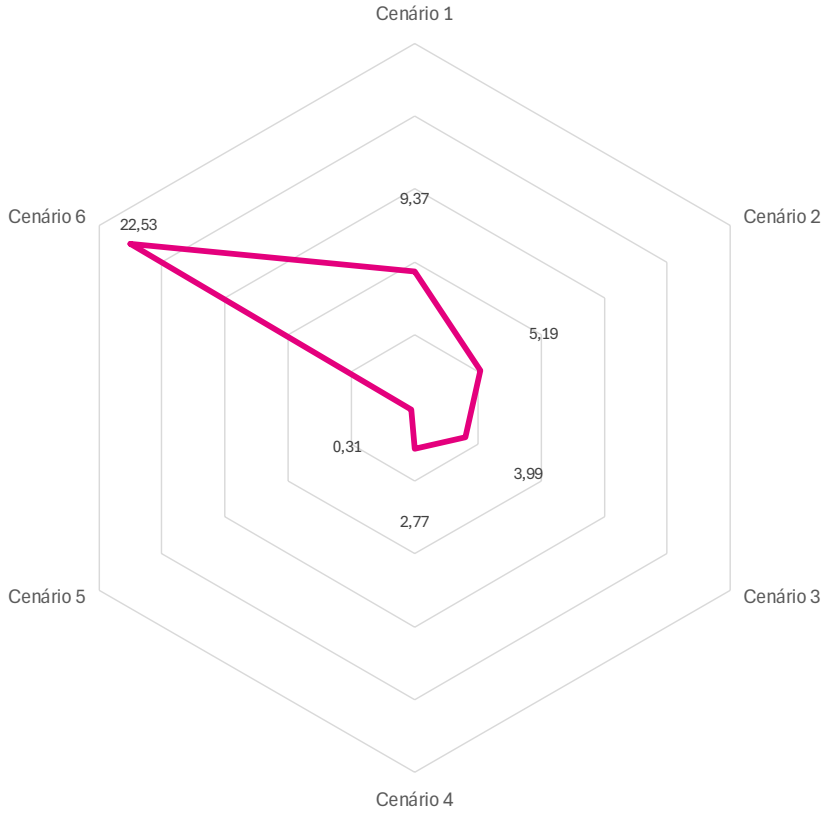
No Cenário 2, onde ocorre a substituição do BS-500 pelo BS-10, observa-se uma redução de 44,60% nas emissões totais, resultando em 5,193kgNO_xx10³. Essa redução é atribuída ao menor teor de poluentes do BS-10 e à presença de tecnologias de pós-tratamento de gases de escape nos ônibus mais modernos, principalmente as tecnologias SCR e EGR.

A adoção de ônibus elétricos na frota resulta na redução desse poluente, pois as emissões estão associadas apenas à produção de eletricidade, não havendo emissões provenientes da operação dos ônibus em si. No Cenário 3, observa-se uma redução de 57,47% nas emissões totais WTW de NO_x, que resultam em 3,987 kgNO_xx10³. No Cenário 4, observa-se uma redução de 70,47% nas emissões totais WTW de NO_x, totalizando em 2,769kgNO_xx10³. Isso sugere que a adoção de tecnologias de propulsão mais limpas, mesmo que parcialmente, pode desempenhar um papel significativo na redução das emissões deste poluente atmosférico no sistema de transporte. Já a eletrificação total da frota, como representado pelo Cenário 5, resulta na redução de 96,67% das emissões totais WTW de NO_x, em comparação com o cenário real, totalizando em 0,312 kgNO_xx10³.

As reduções dos cenários, comparados com o cenário real da frota em operação (Cenário 1), são de:

- Cenário 2 (5,193kgNO_xx10³): redução de 44,60%
- Cenário 3 (3,987 kgNO_xx10³): redução de 57,47%
- Cenário 4 (2,769kgNO_xx10³): redução de 70,47%
- Cenário 5 (0,312 kgNO_xx10³): redução de 96,67%
- Cenário 6 (22,534kgNO_xx10³): aumento de 140,38%

Figura 31 - Emissões WTW do NO_x



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7.1.5. Emissões de $NMHC$

As emissões de $NMHC$ para os seis cenários analisados, durante as fases WTP, PTW e as emissões totais WTW são apresentadas na Figura 32. Observa-se que a fase PTW é a maior contribuinte para as emissões totais em todos os cenários, exceto para o Cenário 5, onde não há emissão de $NMHC$ associadas à operação do ônibus elétrico.

No Cenário 1, que reflete as emissões reais da frota em operação no sistema Transcol, as emissões da fase PTW (377,80 kg$NMHC$x10³) representam aproximadamente 99,75% das emissões totais WTW, que é de 378,74 kg$NMHC$x10³. Já a fase WTP (de 0,93 kg$NMHC$x10³) é responsável por uma parcela mínima de 0,24% das emissões totais desse cenário. Isso se deve ao fato de que a queima de combustíveis fósseis nos motores a diesel é a principal fonte dessas emissões.

No Cenário 2, que reflete a substituição dos ônibus movidos a BS-500 por ônibus movidos à BS-10, redução de 42,34% nas emissões totais $NMHC$, em comparação com o Cenário 1,

totalizando em 218,51 kg$NMHC$x10³. A fase WTP (0,93 kg$NMHC$x10³) representa 0,41% das emissões totais WTW nesse cenário. Apesar disso, a fase PTW (217,62 kg$NMHC$x10³) continua sendo a principal fonte de contribuição das emissões, responsável por 99,59% das emissões totais. A redução encontrada nesse cenário evidencia as propriedades de combustão mais limpa do diesel BS-10 em comparação com o diesel BS-500, utilizado no Cenário 1.

No Cenário 3, que reflete a substituição de 25% dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos, isso é, começa a eletrificação parcial da frota, ocorre redução das emissões em ambas as fases, quando comparadas ao Cenário 1, devido a redução do combustível diesel. Em relação ao Cenário 1, há uma redução de 56,73% nas emissões totais de $NMHC$, que resultam em 163,91 kg$NMHC$x10³. Nesse cenário, a fase WTP (0,74 kg$NMHC$x10³) é responsável por 0,45% das emissões totais e a fase PTW (163,17 kg$NMHC$x10³) é responsável por 99,54% das emissões totais. Embora a fase PTW permaneça como a principal fonte de emissões, sua contribuição é menor em comparação com os cenários anteriores, totalizando. Essa redução adicional nas emissões de $NMHC$ sugere que a introdução de ônibus elétricos na frota, mesmo em uma proporção relativamente baixa, pode contribuir para a melhoria da qualidade do ar e para a redução das emissões desse poluente

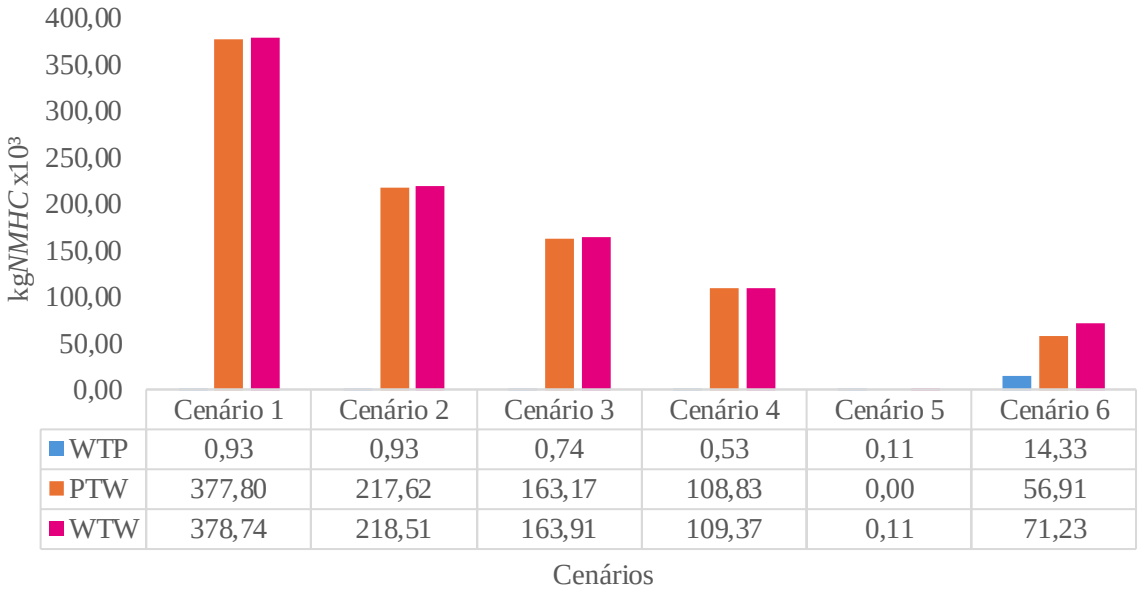
No Cenário 4, com o aumento da proporção de substituição dos ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos para 50%, há uma redução de 71,12% nas emissões totais WTW de $NMHC$ em comparação com o cenário real, totalizando 109,37 kg$NMHC$x10³. Tanto a fase WTP (0,53 kg$NMHC$x10³), que representa 0,48% das emissões totais, quanto a fase PTW (108,83 kg$NMHC$x10³), que representa 99,50% das emissões totais, apresentam menores emissões em comparação com os cenários anteriores, devido à maior presença de ônibus elétricos na frota.

No Cenário 5, que considera uma frota totalmente eletrificada (100% de ônibus elétricos), as emissões totais de $NMHC$ são reduzidas em 99,97% em comparação com o Cenário 1, totalizando em 0,11 kg$NMHC$x10³. Nesse Cenário, a fase WTP (0,11 kg$NMHC$x10³) é responsável pela totalidade das emissões, mas seu impacto é muito menor em comparação com os cenários que envolvem ônibus que utilizam combustíveis fósseis.

No Cenário 6, que representa toda a frota de ônibus híbridos (GNV – diesel), variando na proporção de 80% de GNV e 20% de BS-10, observa-se uma redução de 81,18% nas emissões

totais WTW de $NMHC$ quando comparadas ao Cenário 1, resultando em um total de 71,23 kg$NMHC$x10³. Isso se deve à natureza do GNV, que tende a emitir menos $NMHC$ em comparação com combustíveis líquidos como o diesel. Na fase WTP, a redução nas emissões é devido ao processo de extração e produção do GNV, que resulta em menos impurezas e subprodutos indesejados em comparação com o diesel, que passa por extensos processos de refino. Assim como nos demais cenários, a fase PTW (56,91 kg$NMHC$x10³) é responsável pela maior parcela de contribuição das emissões totais, contribuindo com 79,89%, enquanto a fase WTP (14,33 kg$NMHC$x10³) contribui com 20,11% das emissões totais.

Figura 32 – Emissões de $NMHC$ (kg x10³)



	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
WTP	0,93	0,93	0,74	0,53	0,11	14,33
PTW	377,80	217,62	163,17	108,83	0,00	56,91
WTW	378,74	218,51	163,91	109,37	0,11	71,23

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 33 apresenta as emissões totais WTW de $NMHC$ para os seis cenários analisados. Observa-se que o Cenário 1, que representa a composição real da frota em operação no sistema Transcol, registra as maiores emissões, totalizando 378,74 kg$NMHC$x10³. Isso se deve principalmente às emissões geradas durante o processo de combustão de combustíveis fósseis. Quando o diesel é queimado no motor, ocorrem reações complexas que podem resultar na formação de $NMHC$ como subproduto, que podem incluir diferentes tipos de hidrocarbonetos, dependendo das condições de combustão, como temperatura, pressão e eficiência do motor. Comparativamente, no Cenário 2, ocorre uma redução de 42,34% nas emissões de $NMHC$ em comparação com o Cenário 1, que resultam em 218,51 kg$NMHC$x10³. Essa redução é atribuída

à substituição dos ônibus movidos a BS-500 por ônibus que utilizam BS-10, que são mais novos e apresentam maior eficiência do motor.

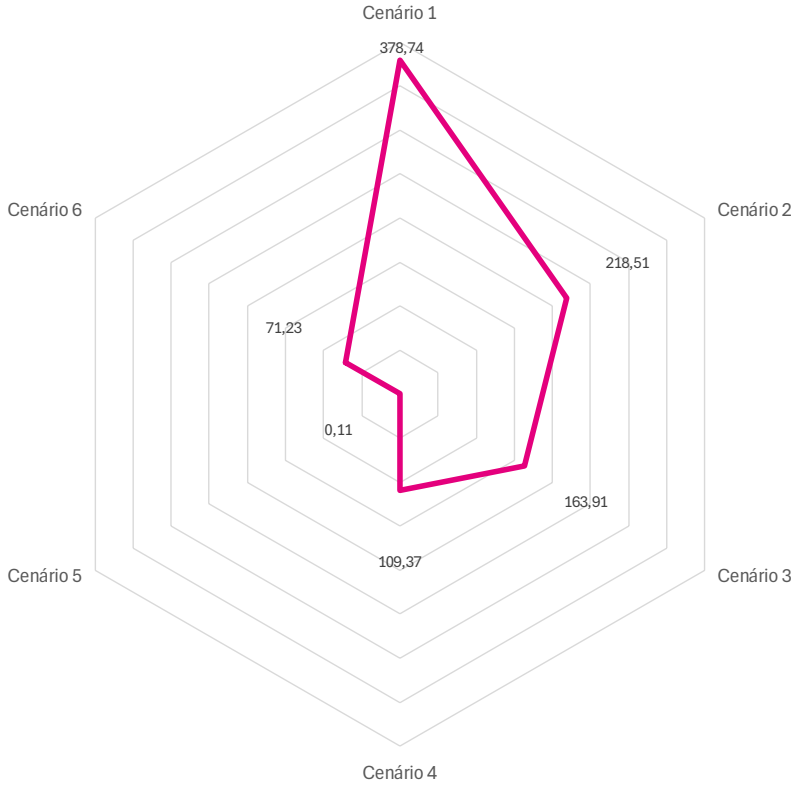
Conforme a proporção de ônibus movidos a diesel na frota é reduzida, mesmo considerando o uso do diesel BS-10, há uma diminuição nas emissões de $NMHC$, sugerindo que essas emissões são diretamente influenciadas pelo tipo de combustível diesel utilizado. No Cenário 3, observa-se uma redução de 56,73% nas emissões totais WTW de $NMHC$, que resultam em 163,907 kg$NMHC$x10³. No Cenário 4, observa-se uma redução de 71,12% nas emissões totais WTW de $NMHC$, totalizando 109,368 kg$NMHC$x10³. Isso sugere que a adoção de tecnologias de propulsão mais limpas, mesmo que parcialmente, pode desempenhar um papel significativo na redução das emissões deste poluente atmosférico no sistema de transporte. Já a eletrificação total da frota, como representado pelo Cenário 5, resulta na redução de 99,91% das emissões totais WTW de $NMHC$, em comparação com o cenário real, totalizando em 0,108 kg$NMHC$x10³.

O Cenário 6 apresenta reduções de 81,18% em comparação com o cenário real da frota, totalizando em 71,234 kg$NMHC$x10³. Além disso, as emissões do Cenário 6 apresentam-se menores até quando comparadas ao Cenário 4 (50% diesel e 50% elétrico), devido à maior contribuição do GNV no kit *dual-fuel* dos ônibus híbridos, tendo apenas 20% da mistura proveniente do BS-10.

As reduções dos cenários, comparados com o cenário real da frota em operação (Cenário 1), são de:

- Cenário 2 (218,513 kg$NMHC$x10³): redução de 42,34%
- Cenário 3 (163,907 kg$NMHC$x10³): redução de 56,73%
- Cenário 4 (109,368 kg$NMHC$x10³): redução de 71,12%
- Cenário 5 (0,108 kg$NMHC$x10³): redução de 99,97%
- Cenário 6 (71,234 kg$NMHC$x10³): redução de 81,18%

Figura 33 - Emissões WTW de $NMHC$



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7.2. EMISSÕE DE GEE

Neste subcapítulo, serão apresentados e discutidos os resultados dos cálculos das emissões dos GEE. Serão apresentadas as emissões dos gases CO_2, CH_4 *e* N_2O, as quais serão discutidas em termos de equivalência de CO_2 (CO_2e) para possibilitar uma análise comparativa entre os três diferentes GEE. De acordo com o inventário utilizado como referência (BRASIL, 2014), os fatores de emissão dos diferentes GEE analisados (CO_2, CH_4 e N_2O) permanecem constantes entre as diferentes fases do Proconve analisadas nesta pesquisa, isto é, não variam com o tipo de diesel utilizado.

As emissões de CO_2 para os seis cenários analisados, durante as fases WTP, PTW e as emissões totais WTW, expressas em kgCO_2x10³, são apresentadas na Figura 34. Observa-se que a maior contribuição das emissões ocorre durante a fase PTW, exceto para o Cenário 5, onde não há emissão associadas à operação dos ônibus elétrico.

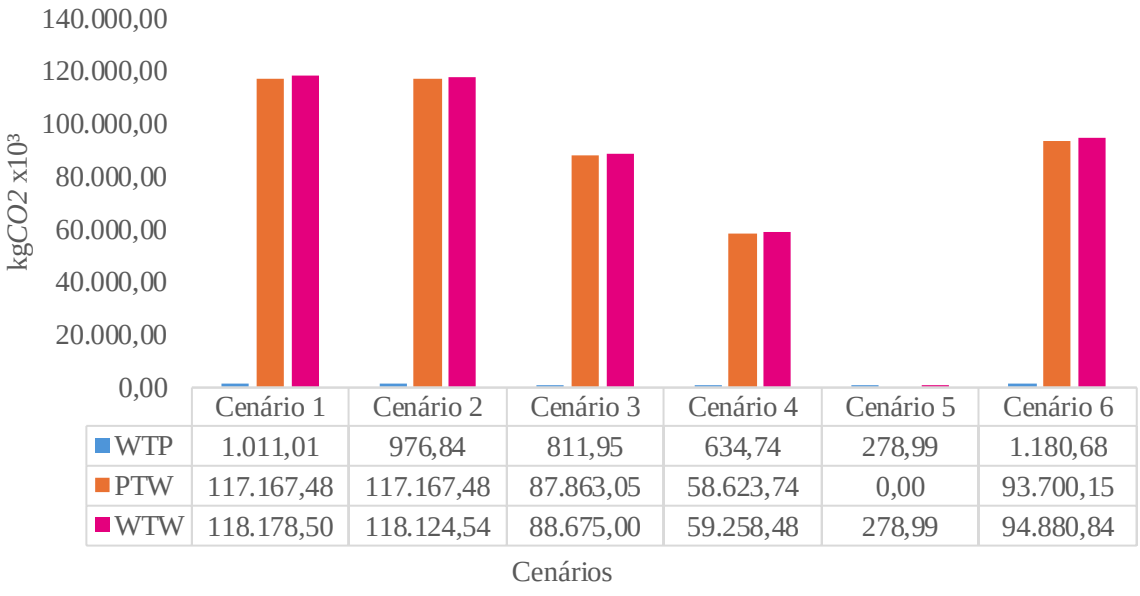
Observa-se que os valores de PTW para o Cenário 1 e Cenário 2 são idênticos, pois não há diferença nos fatores de emissão para o diesel S-500 e S-10 durante a fase de operação dos

ônibus, de acordo com os dados utilizados como referência (BRASIL, 2014). No entanto, é observada uma redução de 0,5% nas emissões totais WTW no Cenário 2, atribuída pela fase WTP. No Cenário 1, a fase WTP (1.011,01 kgCO_2x10³) corresponde a 0,85% das emissões totais WTW, e a fase PTW (117.167,48 kgCO_2x10³) corresponde a 99,14% das emissões totais. Assim como para o Cenário 2, em que a fase WTP (976,84 kgCO_2x10³) corresponde a 0,82% das emissões totais WTW, e a fase PTW (117.167,48 kgCO_2x10³) corresponde a 99,18% das emissões totais.

À medida que aumenta a quantidade de ônibus elétricos na frota, como observado nos Cenários 3, 4 e 5, ocorre uma redução das emissões em ambas as fases do ciclo de vida, assim como no total WTW. No Cenário 3, a fase WTP (811,95 kgCO_2x10³) corresponde a 0,91% das emissões totais WTW, e a fase PTW (87.863,05 kgCO_2x10³) corresponde a 99,08% das emissões totais. No Cenário 4, a fase WTP (634,74 kgCO_2x10³) corresponde a 1,07% das emissões totais WTW, e a fase PTW (58.623,74 kgCO_2x10³) corresponde a 98,92% das emissões totais. No Cenário 5, a fase WTP (278,99 kgCO_2x10³) corresponde a 100% das emissões totais WTW, visto que não há emissão associada a operação dos ônibus elétricos (fase PTW).

No Cenário 6, que reflete uma frota movida por ônibus híbridos, a fase WTP (1.180,68 kgCO_2x10³) corresponde a 1,24% das emissões totais WTW, enquanto a fase PTW (93.700,15 kgCO_2x10³) corresponde a 98,75% das emissões totais.

Figura 34 - Emissões de CO_2 (kg x10³)

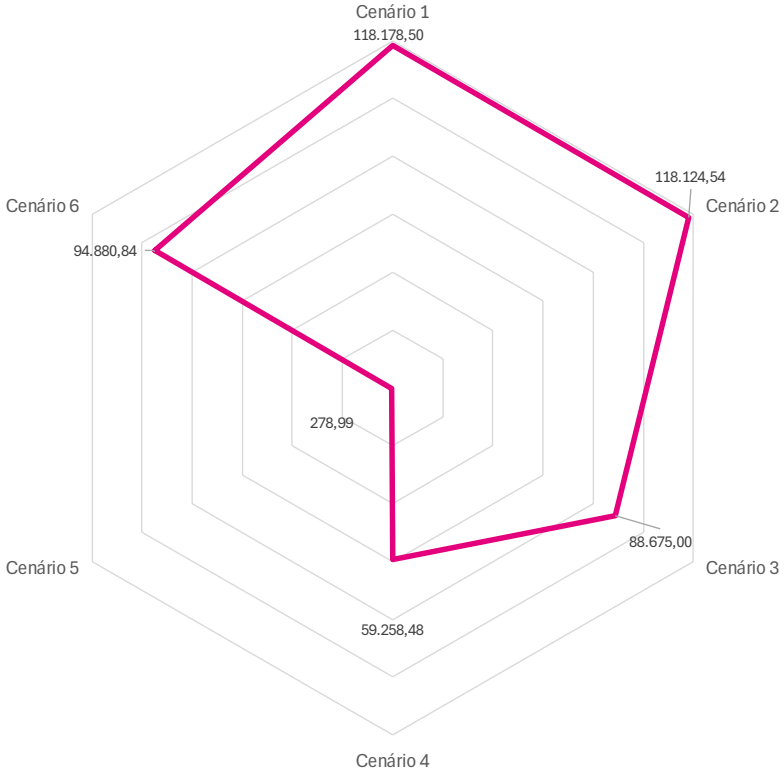


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 35 apresenta as emissões totais WTW de CO_2 para os seis cenários analisados. O Cenário 1, que representa a composição real da frota em operação no sistema Transcol, registra as maiores emissões em comparação com os demais cenários analisados. Observa-se uma redução de 0,05% entre os Cenários 1 e 2, associada à fase WTP (de produção de cada combustível diesel), pois, durante a fase de operação (PTW), os fatores de emissão são os mesmos para os diferentes tipos de diesel, de acordo com o inventário utilizado como referência.

O Cenário 6 apresenta redução de 19,72% em comparação com o Cenário 1, em partes também devido a queima do diesel BS-10 durante a operação do ônibus híbrido. Fica evidente que conforme a proporção de ônibus movidos a diesel na frota é reduzida, ocorre reduções nas emissões de CO_2, principalmente associadas à queima desse combustível pelos motores. Com reduções de 24,97% para o Cenário 3 e 49,86% para o Cenário 4. Atingindo reduções de 99,76% nas emissões para o Cenário 5, que considera a frota totalmente eletrificada.

Figura 35 - Emissões WTW do CO_2



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As emissões de CH_4 para os seis cenários analisados, durante as fases WTP, PTW e as emissões totais WTW, expressas em kgCH_4x10³, são apresentadas na Figura 36. Observa-se que a maior

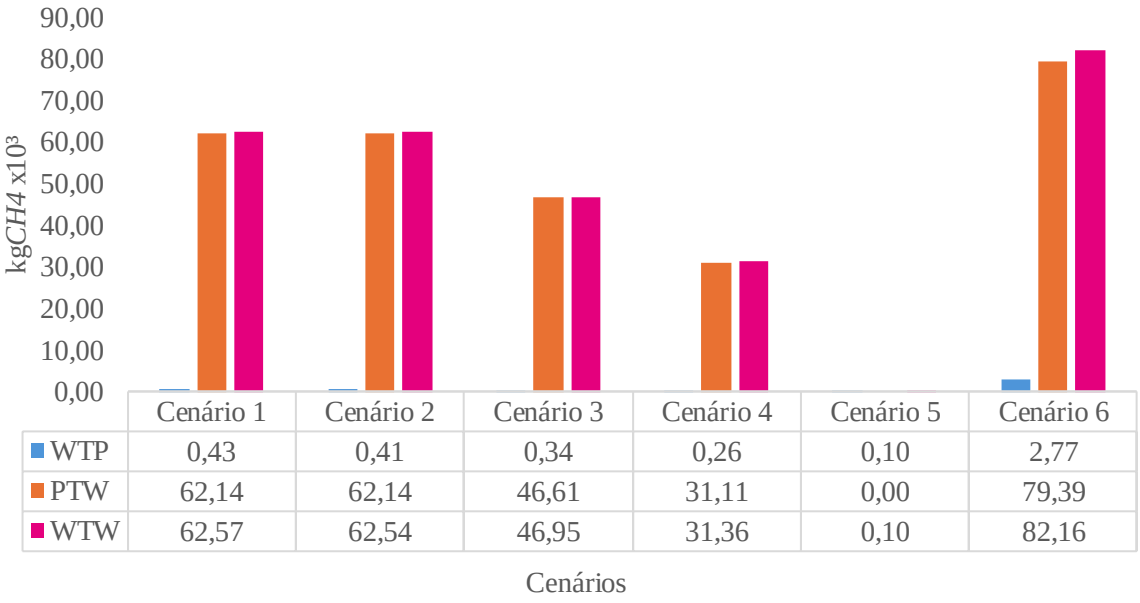
contribuição das emissões ocorre durante a fase PTW, exceto para o Cenário 5, onde não há emissão associadas à operação dos ônibus elétrico.

Ao analisar das emissões de CH_4, observa-se que os maiores valores estão associados ao Cenário 6, devido à utilização de GNV, que é um combustível fóssil composto principalmente por hidrocarbonetos, com destaque para o metano. Isso resulta em altas emissões desse GEE, principalmente durante a fase PTW (79,39 kgCH_4x10³), que corresponde a 96,62% do total, enquanto a fase WTP (2,77 kgCH_4x10³) corresponde a 3,37% das emissões totais WTW desse gás.

Assim como observado para as emissões de CO_2, os valores da fase PTW nos Cenários 1 e 2 são idênticos, pois não há diferença nos fatores de emissão para o diesel S-500 e S-10 durante a fase de operação dos ônibus, de acordo com os dados utilizados como referência (BRASIL, 2014). No entanto, é observada uma redução de 0,048% nas emissões totais WTW no Cenário 2, atribuída pela fase WTP. No Cenário 1, a fase WTP (0,43 kgCH_4x10³) corresponde a 0,68% das emissões totais WTW, e a fase PTW (62,14 kgCH_4x10³) corresponde a 99,31% das emissões totais. Assim como para o Cenário 2, em que a fase WTP (0,41 kgCH_4x10³) corresponde a 0,65% das emissões totais WTW, e a fase PTW (62,14 kgCH_4x10³) corresponde a 99,34% das emissões totais.

Em comparação, os demais cenários apresentam baixos valores de emissão desse GEE, seguindo o padrão de redução das emissões à medida que a quantidade de ônibus elétricos na frota aumenta. No Cenário 3, a fase WTP (0,34 kgCH_4x10³) corresponde a 0,72% das emissões totais WTW, e a fase PTW (46,61 kgCH_4x10³) corresponde a 99,27% das emissões totais. No Cenário 4, a fase WTP (0,26 kgCH_4x10³) corresponde a 0,82% das emissões totais WTW, e a fase PTW (31,11 kgCH_4x10³) corresponde a 99,20% das emissões totais. No Cenário 5, a fase WTP (0,10 kgCH_4x10³) corresponde a 100% das emissões totais WTW, visto que não há emissão associada a operação dos ônibus elétricos.

Figura 36 - Emissões de CH_4 (kg x10³)

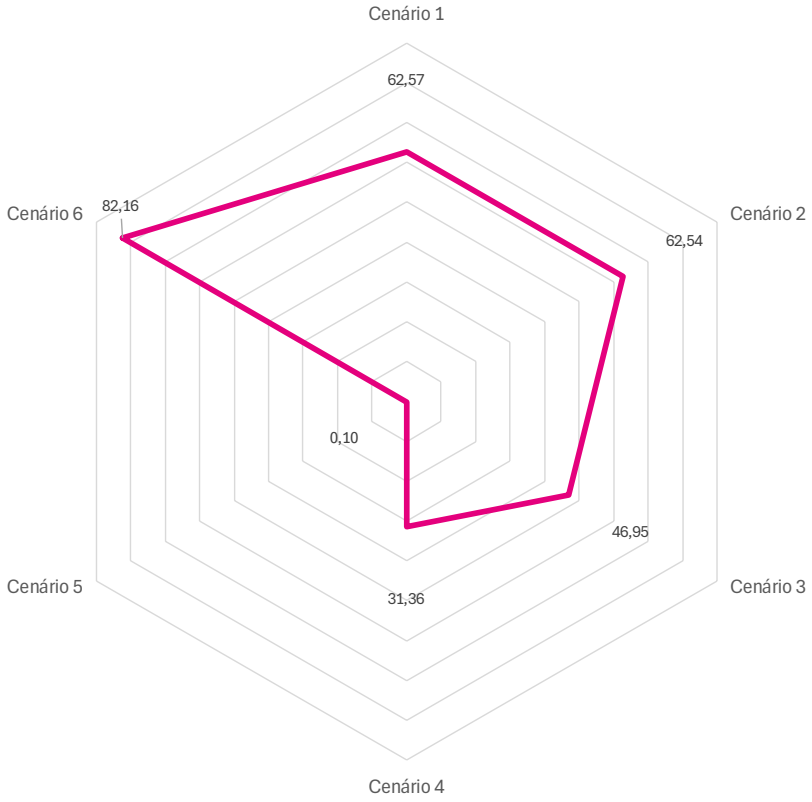


Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 37 apresenta as emissões totais WTW de CH_4 para os seis cenários analisados. Observa-se que o Cenário 6 apresenta as maiores emissões, com um aumento de 31,30% em comparação com o cenário real da frota do Transcol em operação. Esse resultado se deve ao fato de que o GNV é formado, em sua maioria, de metano, o que explica o aumento das emissões associadas a queima desse combustível. O Cenário 1, que reflete as emissões reais também apresenta emissões elevadas, com um total de 62,57 kg, que se deve ao processo da queima do diesel. Por não haver variação entre os fatores de emissão desse gás para diferentes tipos de diesel nas fases do Proconve, os valores da fase PTW para o Cenário 2 são as mesmas para o Cenário 1, portanto, a redução das emissões totais WTW entre os dois cenários são de apenas 0,048%.

Conforme a proporção de ônibus movidos a diesel na frota é reduzida, mesmo considerando o uso do diesel BS-10, há uma diminuição nas emissões de metano, alcançando reduções de 24,98% para o Cenário 3, 49,89% para o Cenário 4 e 99,85% para o Cenário 5, em comparação com o cenário real (Cenário 1).

Figura 37 - Emissões WTW do CH_4



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As emissões de N_2O para os seis cenários analisados, durante as fases WTP, PTW e as emissões totais WTW, expressas em kgN_2Ox10³, são apresentadas na Figura 38. Observa-se que a maior contribuição das emissões ocorre durante a fase PTW, exceto para o Cenário 5, onde não há emissão associadas à operação dos ônibus elétrico.

Observa-se pequenas variações entre os cenários que têm ônibus movidos a diesel como componente da frota, como, por exemplo, para o Cenário 1 e Cenário 2 que apresentam variações de 3,182 kgN_2Ox10³ e 3,179 kgN_2Ox10³ para a fase WTW, respectivamente.

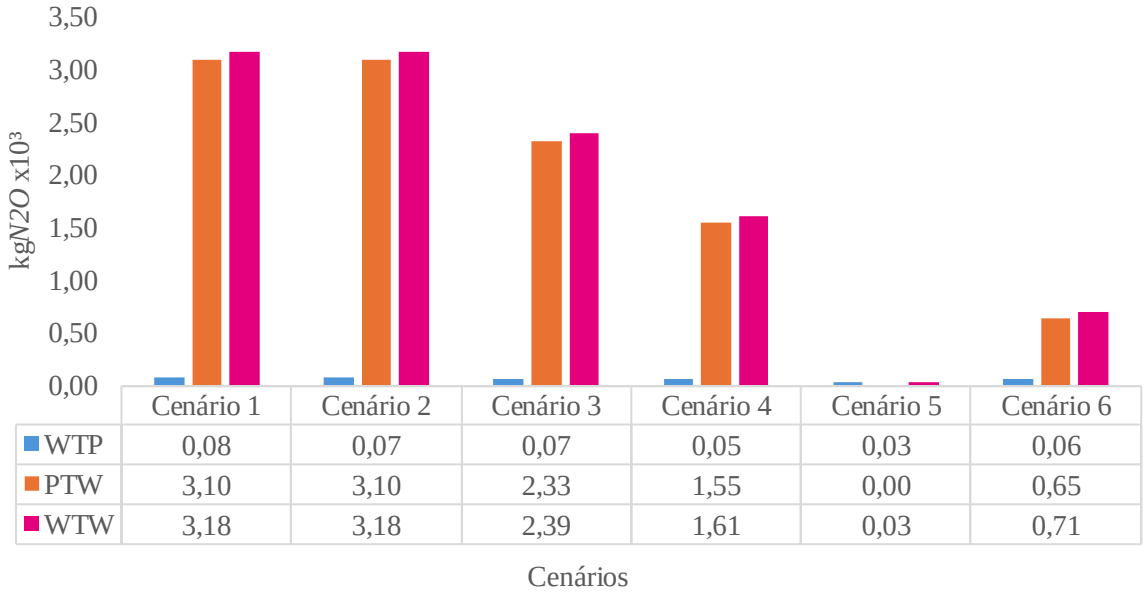
Observa-se que os valores de PTW para o Cenário 1 e Cenário 2 são idênticos, pois não há diferença nos fatores de emissão para o diesel S-500 e S-10 durante a fase de operação dos ônibus, de acordo com os dados utilizados como referência (BRASIL, 2014). No entanto, é observada uma redução de 0,5% nas emissões totais WTW no Cenário 2, atribuída pela fase WTP. No Cenário 1, a fase WTP corresponde a 2,51% das emissões totais WTW, e a fase PTW corresponde a 97,48% das emissões totais. Assim como para o Cenário 2, em que a fase WTP

corresponde a 2,20% das emissões totais WTW, e a fase PTW corresponde a 97,48% das emissões totais.

À medida que aumenta a quantidade de ônibus elétricos na frota, como observado nos Cenários 3, 4 e 5, ocorre uma redução das emissões em ambas as fases do ciclo de vida, assim como no total WTW. No Cenário 3, a fase WTP (0,07 kgN_2Ox10³) corresponde a 2,92% das emissões totais WTW, e a fase PTW (2,33 kgN_2Ox10³) corresponde a 97,48% das emissões totais. No Cenário 4, a fase WTP (0,05 kgN_2Ox10³) corresponde a 3,72% das emissões totais WTW, e a fase PTW (1,55 kgN_2Ox10³) corresponde a 96,27% das emissões totais. No Cenário 5, a fase WTP (0,03 kgN_2Ox10³) corresponde a 100% das emissões totais WTW, pois não há emissão associada a operação dos ônibus elétricos.

No Cenário 6, que reflete uma frota movida por ônibus híbridos, ocorre reduções de 77,82% em comparação com o cenário real da frota em operação. Com emissões mínimas de 0,71 kgN_2Ox10³. A fase WTP (0,06 kgN_2Ox10³) corresponde a 8,45% das emissões totais WTW, e a fase PTW (0,65 kgN_2Ox10³) corresponde a 91,54% das emissões totais.

Figura 38 - Emissões de N_2O (kg x10³)



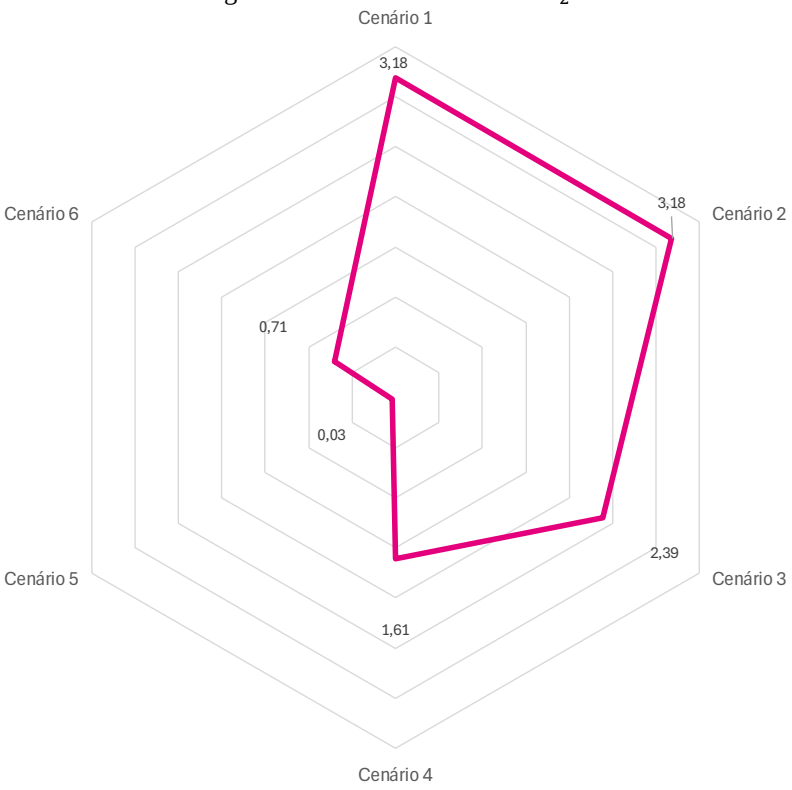
Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 39 apresenta as emissões totais WTW de N_2O para os seis cenários analisados. O Cenário 1, que representa a composição real da frota em operação no sistema Transcol, registra as maiores emissões em comparação com os demais cenários analisados. Observa-se uma

redução de 0,09% entre os cenários que apresentam ônibus movidos à diesel como principais componentes da frota (Cenário 1 e Cenário 2) que apresentam, respectivamente, um total de 3,182 kgN_2Ox10³ e 3,179 kgN_2Ox10³ para as emissões totais WTW. Essa pequena variação ocorre devido a fase WTP, com diferentes valores encontrados para as etapas de produção de cada tipo de diesel. Pois, para a fase PTW, conforme evidenciado para os demais gases, os fatores de emissão não apresentam variação entre os diferentes tipos de diesel e fases do Proconve.

Assim como encontrado para os demais GEE, ocorre redução nas emissões de N_2O conforme a proporção de ônibus movidos a diesel na frota é reduzida, mesmo considerando o uso do diesel BS-10. As reduções encontradas para esse gás são de 24,76% para o Cenário 3, 49,57% para o Cenário 4 e 98,93% para o Cenário 5, em comparação com o cenário real (Cenário 1). Ocorrem reduções de 77,82% para o Cenário 6 devido ao valor do fator de emissão de N_2O associado ao uso do GNV.

Figura 39 - Emissões WTW do N_2O



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

As emissões de CO_2, CH_4 e N_2O foram convertidas para unidades de equivalência de CO_2, utilizando a Equação 4. Essa conversão é importante para comparar diretamente os diferentes

GEE, de acordo com o potencial de aquecimento de cada gás. A Figura 40 apresenta as emissões de CO_2e, em todos os seis cenários.

No Cenário 1, que representa a frota real em operação no sistema Transcol, a maior parte das emissões totais WTW de CO_2e (120.911,71 kgCO_2ex10³) ocorre durante a fase PTW (119.866,81 kgCO_2ex10³), que corresponde a 99,13% das emissões totais WTW, enquanto uma parcela mínima de 0,86% é atribuída à fase WTP (1.044,90 kgCO_2ex10³). Esse cenário reflete a alta pegada de carbono da frota real, uma vez que os fatores de emissão permanecem constantes entre as fases do Proconve. É importante destacar que as emissões de GEE têm um impacto global significativo, muitas vezes sem impactos locais imediatos, mas sim consequências que perduram por décadas, até milênios.

Com a retirada e substituição dos ônibus movidos BS-500 por BS-10 (Cenário 2), há uma redução de 0,05% nas emissões totais WTW de CO_2e (120,856,01 kgCO_2ex10³) em comparação com o Cenário 1. A fase PTW (119.866,81 kgCO_2ex10³) continua sendo a principal fonte de emissões, representando 99,18%, enquanto a fase WTP (1.009,46 kgCO_2ex10³) corresponde com 0,83% das emissões totais. Nesse caso, a substituição do combustível não parece ter um impacto significativo nas emissões de CO_2e. Isso ocorre porque as emissões de GEE estão diretamente relacionadas à quilometragem e ao consumo de combustível dos ônibus, independentemente do tipo de diesel utilizado.

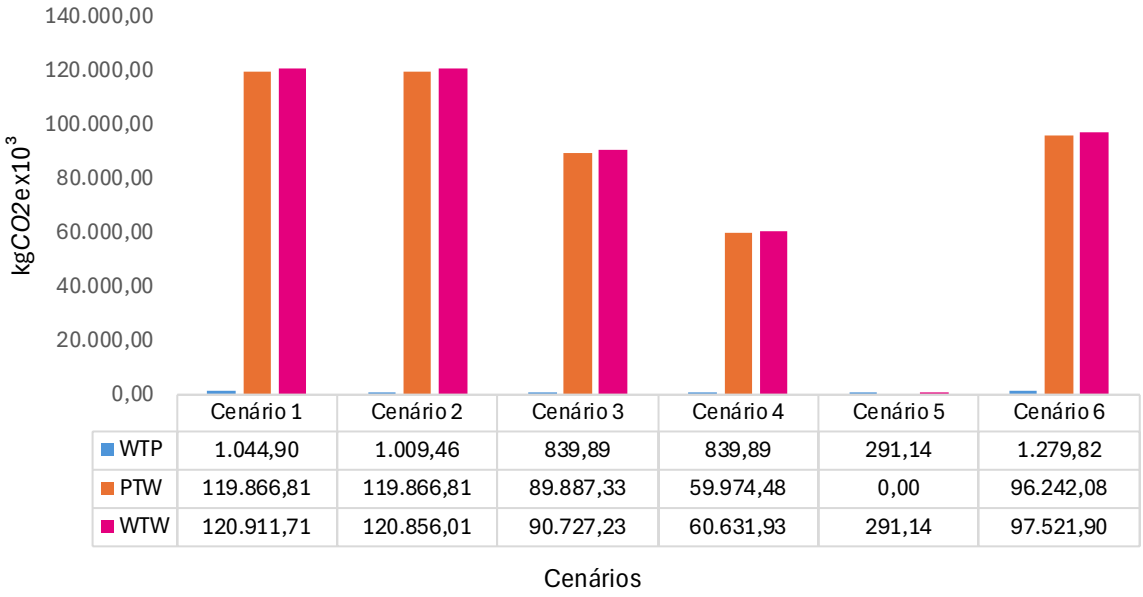
No Cenário 3, que consiste na substituição de 25% de ônibus movidos a BS-10 para ônibus elétricos, observa-se uma redução de 24,95% nas emissões totais WTW de CO_2e em comparação com o Cenário 1, resultando em 90.727,22 kgCO_2ex10³. No Cenário 3, a fase WTP (839,89 kgCO_2ex10³) corresponde a 0,92% das emissões totais WTW, e a fase PTW (89.887,33 kgCO_2ex10³) corresponde a 99,07% das emissões totais.

Ao aumentar a proporção de ônibus elétricos para 50% no Cenário 4, observa-se uma redução de 49,85% nas emissões totais WTW de CO_2e, totalizando 60.631,93 kgCO_2ex10³. Neste Cenário, a fase WTP (839,89 kgCO_2ex10³) corresponde a 1,38% das emissões totais e a fase PTW (59.947,48 kgCO_2ex10³) corresponde a 98,87% das emissões totais WTW.

No Cenário 5, onde todos os ônibus são elétricos, as emissões totais de CO_2e são mínimas (291,14 kgCO_2ex10³), reduzidas em 99,75%, quando comparadas ao Cenário 1. Isso se deve ao fato de que não há emissões durante a operação dos ônibus. A eliminação das emissões durante a operação do ônibus, fase PTW, destaca a eficácia da eletrificação completa da frota na redução das emissões de CO_2e no transporte público. Embora a fase WTP contribua com a maioria das emissões de CO_2e neste cenário, seu impacto é muito menor em comparação com os cenários que envolvem a utilização de combustíveis fósseis.

No Cenário 6, em que a frota é composta por ônibus híbridos, com a maior parcela de mistura de GNV, há uma redução de 19,35% nas emissões totais WTW, totalizando em 97.521,89 kgCO_2ex10³. A fase WTP (1.279,82 kgCO_2ex10³) corresponde a 1,31% das emissões totais e a fase PTW (96.242,08 kgCO_2ex10³) corresponde a 98,68% das emissões totais WTW. É importante destacar que nesse cenário as emissões totais de GEE são elevadas devido à alta liberação de metano associada ao GNV.

Figura 40 – Emissões de CO_2e (kg x10³)



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 41 apresenta as emissões totais WTW de CO_2e para os seis cenários analisados. Observa-se que as maiores emissões estão associadas ao Cenário 1, que totaliza 120.991,71 kgCO_2ex10³, que é devido principalmente à queima do diesel. Nota-se uma pequena redução de 0,05% entre os Cenários 1 e 2 (120.856,015 kgCO_2ex10³). A redução ocorre pela substituição do diesel S-500 pelo diesel S-10, variando na fase de produção do diesel. Porém,

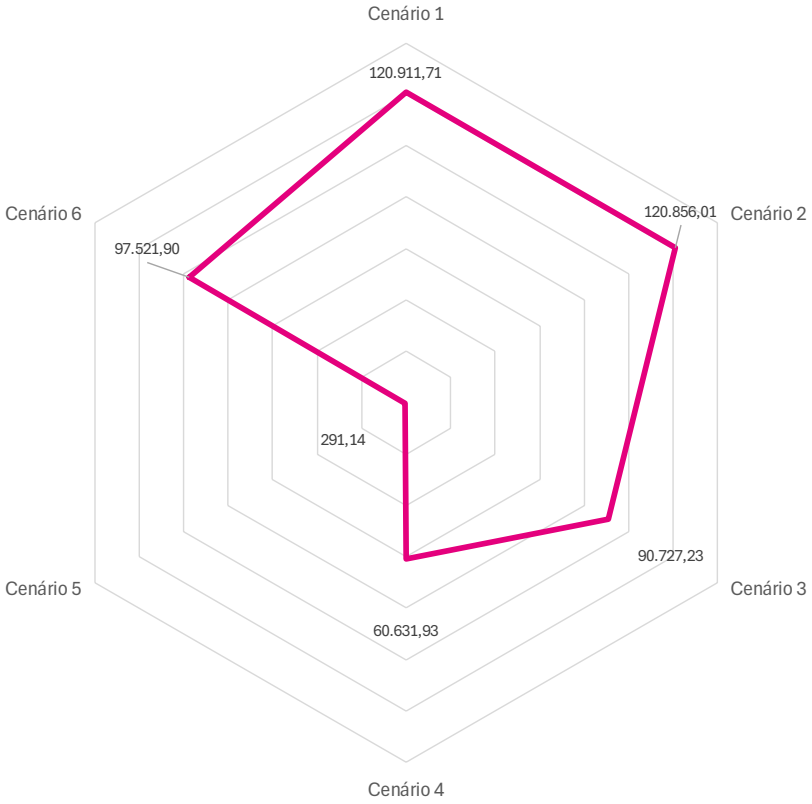
conforme mencionado anteriormente nesta dissertação, os fatores de emissão para os diferentes tipos de diesel analisados não apresentam variação por fases do Proconve, sendo as emissões unicamente influenciadas pelo consumo do combustível e quilometragem percorrida, que foi a mesma entre os dois cenários. O Cenário 6 apresenta uma pequena redução de 19,35% (97.521,898 kgCO_2ex10³) quando comparada ao cenário real da frota, devido a contribuição nas emissões de CH_4 oriundas da produção e queima do GNV nesse cenário.

Observa-se uma tendência de redução nas emissões de CO_2e à medida que aumenta a proporção de ônibus elétricos na frota e que ocorre a retirada dos ônibus movidos à diesel. No Cenário 3, observa-se uma redução de 24,95% nas emissões totais WTW de CO, que resultam em 90.727,229 kgCO_2ex10³. No Cenário 4, observa-se uma redução de 49,85% nas emissões totais WTW de CO, totalizando 60.631,932 kgCO_2ex10³. Isso sugere que a adoção de tecnologias de propulsão mais limpas, mesmo que parcialmente, pode desempenhar um papel significativo na redução das emissões deste poluente atmosférico no sistema de transporte. Já a eletrificação total da frota, como representado pelo Cenário 5, resulta na redução de 99,75 % das emissões totais WTW de CO, em comparação com o cenário real, totalizando em 291,143 kgCO_2ex10³.

As reduções dos cenários, comparados com o cenário real da frota em operação (Cenário 1), são de:

- Cenário 2 (120.856,015 kgCO_2ex10³): redução de 0,05%
- Cenário 3 (90.727,229 kgCO_2ex10³): redução de 24,95%
- Cenário 4 (60.631,932 kgCO_2ex10³): redução de 49,85%
- Cenário 5 (291,143 kgCO_2ex10³): redução de 99,75 %
- Cenário 6 (97.521,898 kgCO_2ex10³): redução de 19,35%

Figura 41 - Emissões WTW do CO_2e



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

7.3. ANÁLISE COMPARATIVA DAS EMISSÕES

Após uma análise detalhada dos poluentes atmosféricos (Subcapítulo 7.1), algumas tendências significativas emergiram. Para a maioria dos poluentes, CO, SO_2, $NMHC$ e NO_x, a fase de operação (PTW) foi identificada como a principal fonte de emissões durante o ciclo de vida. Durante essa fase, que abrange desde o abastecimento até o uso do combustível, diversas variáveis podem influenciar nas emissões, como o tipo de combustível, tecnologias empregadas, padrões de condução, condições das vias, congestionamentos, topografia, frenagens e até mesmo a quantidade de passageiros a bordo (Mahmoud *et al.*, 2016). Por outro lado, para as emissões de MP, a fase de produção do combustível (WTP) emergiu como a principal contribuinte nos seis cenários analisados, indicando a necessidade de considerar a extração, produção, transporte e demais processos associados a produção dos combustíveis nas análises e tomadas de decisão para metidas de redução das emissões de poluentes atmosféricos.

O Cenário 1, que reflete as emissões reais da frota em operação no sistema Transcol, apresentou níveis elevados de poluentes atmosféricos comparativamente com os demais cenários. Isso

sugere que uma modificação na composição da frota, considerando os modelos dos ônibus e os combustíveis adotados, pode apresentar impactos positivos na qualidade do ar.

Especificamente para o Cenário 6, que considera a frota inteira composta por ônibus híbridos, com uma proporção de mistura variando em torno de 80% de GNV e 20% de BS-10, as emissões totais do ciclo de vida dos poluentes atmosféricos CO e NO_x foram as mais elevadas, até mesmo quando comparadas ao cenário real da frota em operação. Isso sugere que apesar de reduzir as emissões de alguns poluentes atmosféricos, adotar uma frota inteiramente composta por esse combustível não é uma solução para o transporte público em termos de redução das emissões.

A qualidade do combustível tem influência direta na quantidade de emissões produzidas. A presença de altos teores de enxofre, como no diesel S-500, que contém até 500 ppm de enxofre, tende a aumentar a quantidade de substâncias poluentes emitidas pelos escapamentos dos ônibus, conforme evidenciado também por Nylund e Koponen (2012). Isso fica evidente ao comparar as emissões do Cenário 1 com as do Cenário 2, em que a única alteração é a substituição total dos ônibus movidos a BS-500 para BS-10, resultando em reduções de 32,43% CO, 61,91% de SO_2, 44,60% de NO_x, 10,74% de MP e 42,34% de $NMHC$. Essa variação não se deve apenas à composição mais limpa e com menos substâncias poluentes do combustível, mas também ao fato de que os ônibus mais novos e modernos conseguem realizar uma queima completa do combustível, diminuindo principalmente as emissões de poluentes atmosféricos como o CO. Além disso, os ônibus mais novos são submetidos a regulamentações mais rigorosas e padrões mais elevados de manutenção e inspeção, para assim evitar essas emissões.

Além disso, a fase P-7 do Proconve, à qual pertencem os ônibus que utilizam o BS-10 exige a adoção de sistemas de pós-tratamento dos gases, tendo uma parcela da frota do Transcol utilizando o SCR e uma parcela utilizando o EGR. Esses sistemas são eficazes na redução das emissões de poluentes atmosféricos, principalmente de NO_x e MP, devido a recirculação dos gases e filtração do material particulado ou pela reação química associada ao reagente líquido ARLA-32 (DESPOLUIR, 2012). Sendo assim, essas reduções das emissões no Cenário 2, na fase PTW, são devido à substituição por um diesel com menos substância poluente (S-10), pela idade da frota e pela adoção de tecnologias e sistemas de pós-tratamento. É importante destacar que a fase P-8 requer a adoção simultânea de ambos os sistemas de pós-tratamento, o que deve contribuir ainda mais para a redução das emissões.

Ao analisar todos os poluentes atmosféricos considerados no escopo da pesquisa, fica evidente que a transição para uma frota totalmente elétrica (Cenário 5) se destaca como a opção mais eficaz na redução das emissões de poluentes atmosféricos em comparação com as alternativas consideradas nos demais cenários. Isso se deve a dois fatores principais: O primeiro é que os ônibus elétricos não emitem substâncias poluentes durante sua operação, principalmente, por não ter motores à combustão, eliminando assim todas as emissões associadas à fase PTW. Segundo é que, a geração de energia no Brasil provém, principalmente, de fontes renováveis, resultando em baixas emissões durante a fase de produção da energia (fase WTP). Portanto, o cenário de eletrificação total emerge como um indicador promissor em termos de redução das emissões e melhoria da qualidade do ar.

As vantagens associadas à eletrificação refletem-se nos cenários que combinam uma parcela de ônibus elétricos com outra utilizando o BS-10, pois apresentam reduções nas emissões dos poluentes atmosféricos. Especificamente, os Cenários 3 e 4, com 25% e 50% de ônibus movidos a BS-10 e o restante de elétrico, respectivamente, destacam-se por apresentar uma queda substancial nas emissões de poluentes em comparação com a frota real (Cenário 1). Essa melhoria não se limita apenas à eletrificação, sendo também devido a utilização de um diesel com menor teor de enxofre na sua composição (BS-10) e a implementação de sistemas de pós-tratamento dos gases.

Portanto, em relação às emissões de poluentes atmosféricos, uma análise completa dos cenários revela que a transição para uma frota de ônibus elétricos é a estratégia mais eficaz para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos. No entanto, a combinação de ônibus elétricos com ônibus à combustíveis mais limpos e tecnologias de controle de emissões pode servir como uma etapa intermediária viável para reduzir as emissões, enquanto a infraestrutura necessária para uma frota totalmente elétrica é desenvolvida e implementada.

A comparação entre os Cenários destaca a transição para uma frota totalmente elétrica como a estratégia mais vantajosa, pois os ônibus elétricos eliminam completamente as emissões durante a operação e se beneficiam de uma matriz energética mais limpa, especialmente em países onde a geração de eletricidade é predominantemente proveniente de fontes renováveis.
É importante analisar os GEE de forma distinta dos poluentes atmosféricos, pois, ao contrário destes últimos, não há diferenciação nos fatores de emissão entre as fases P-5 e P-7 do

Proconve. Isso significa que as emissões são determinadas exclusivamente pela quilometragem percorrida e pelo consumo dos ônibus em operação. Como resultado, uma frota que tenha percorrido mais quilômetros em um determinado período apresentará emissões mais elevadas de GEE, independentemente das características dos ônibus e do combustível utilizados, em comparação com uma frota que tenha sido menos utilizada durante o mesmo período analisado.

Em relação as emissões de GEE (Subcapítulo 7.2), ao analisar os diferentes cenários em relação a composição da frota, nota-se que o Cenário 1, o qual representa as emissões reais da frota em operação no ano de 2022, os valores de CO_2, CH_4 e N_2O são os mais elevados, refletindo as condições atuais do sistema de transporte. Neste contexto, as emissões de CO_2 durante a fase de produção do combustível representam a maior parcela das emissões totais, destacando a importância da escolha da matéria-prima na redução das emissões. Por outro lado, nos Cenários 3 e 4, que combinam uma proporção de ônibus movidos a BS-10 com a introdução de ônibus elétricos, observa-se uma redução nas emissões de todos os GEE em comparação com o Cenário 1. Essa redução é especialmente significativa durante a fase de operação do veículo, onde os ônibus elétricos conseguem zerar as emissões dos GEE.

De mesma forma que para os poluentes atmosféricos, para o GEE o Cenário 5 é que apresenta as menores emissões em todas as fases do ciclo de vida. Isso se deve à eliminação das emissões durante a operação dos ônibus elétricos, combinada com a utilização de energia de matriz renovável na fase de produção, resultando em uma redução expressiva das emissões totais de CO_2, CH_4 e N_2O.

Para uma análise geral em termos de equivalência de CO_2, o Cenário 1, que representa as emissões reais da frota em operação, registra um total de emissões de 121.548,78 kg CO_2e, refletindo as condições atuais do sistema de transporte. Neste Cenário, as emissões durante a fase de produção do combustível contribuem significativamente para as emissões totais, destacando a importância da escolha da matéria-prima na redução das emissões. Já nos Cenários 3 e 4, que combinam uma proporção significativa de ônibus elétricos com a introdução de combustíveis mais limpos, como o diesel S-10, observa-se uma redução gradativa nas emissões de CO_2e em comparação com o Cenário 1. Essa redução é especialmente significativa durante a fase de operação do veículo, pois os ônibus elétricos contribuem para uma diminuição substancial das emissões. No entanto, é no Cenário 5, que representa a transição para uma frota totalmente elétrica, que se observa a maior redução das emissões de CO_2e em todas as fases do

ciclo de vida do veículo. Isso se deve à eliminação completa das emissões durante a operação dos ônibus elétricos, combinada com a utilização de energia de matriz renovável na fase de produção, resultando em uma redução expressiva das emissões totais de CO_2e.

7.4. ANÁLISE DAS CATEGORIAS DE IMPACTO

O objetivo desse subcapítulo é realizar uma análise das categorias de impacto considerando as emissões totais WTW do ciclo de vida, dos seis cenários analisados. Foi utilizado o método IMPACT 2002+, considerando três categorias de impacto final (*endpoint*): danos à saúde humana, mudanças climáticas e qualidade dos ecossistemas. Dentro dessas categorias finais, foram selecionadas cinco categorias de impacto intermediário para avaliação (*midpoint*): respiração orgânica, respiração inorgânica, aquecimento global, acidificação aquática e acidificação/nutrição terrestre. Para esse fim, os resultados obtidos nas análises WTW dos seis cenários foram convertidos em valores de impacto através do software OpenLCA.

Na categoria de impacto de mudanças climáticas, a unidade utilizada é kg equivalente de CO_2, onde os gases que contribuem para o aquecimento global são traduzidos para CO_2. Na categoria de impacto de saúde humana, para a respiração inorgânica, a unidade utilizada é kg equivalente de $MP_{2,5}$, e para a respiração orgânica é em kg equivalente de C_2H_4. Na categoria de impacto na qualidade dos ecossistemas, a unidade utilizada, para ambas as categorias, é em kg equivalente de SO_2.

As emissões totais WTW foram convertidas em unidades de impacto utilizando os fatores de caracterização indicados na Tabela 23 para cada categoria de impacto. A Tabela 27 apresenta os resultados das emissões em termos de categoria de impacto.

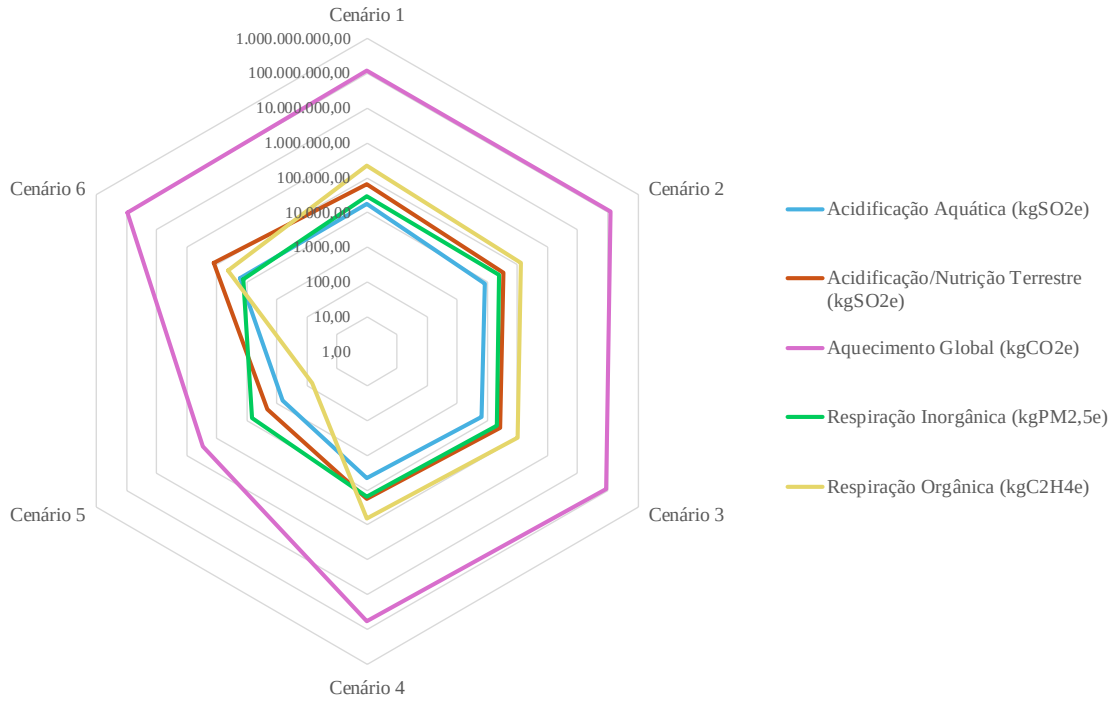
Tabela 27 - Análises das categorias de impacto

Cenários	Acidificação Aquática (kg$\boldsymbol{SO_2e}$)	Acidificação/Nutrição Terrestre (kg$\boldsymbol{SO_2e}$)	Aquecimento Global (kg$\boldsymbol{CO_2e}$)	Respiração Inorgânica (kg$\boldsymbol{PM_{2,5}e}$)	Respiração Orgânica (kg$\boldsymbol{C_2H_4e}$)
1	18.283,67	63.163,11	119.463.951,82	28.673,73	227.974,49
2	8.101,56	32.965,52	119.363.317,85	24.701,55	131.688,90
3	6.287,36	25.378,76	89.607.643,71	20.248,26	98.780,31
4	4.418,71	17.678,62	59.884.922,89	15.675,40	65.911,99
5	662,62	2.154,92	291.426,40	6.510,10	65,20
6	17.363,99	125.255,27	95.986.726,41	13.313,29	43.300,76

Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

A Figura 42 apresenta os resultados das diferentes categorias de impacto. Os valores foram plotados em escala logarítmica apenas para demonstrar como os diferentes cenários influenciam em cada categoria de impacto. Conforme evidenciado, a categoria de mudanças climáticas é a que apresenta os maiores impactos, devido aos altos fatores de caracterização e aos poluentes atmosféricos e GEE considerados nesta categoria de impacto. Observa-se que a eletrificação total da frota (Cenário 5) contribui para a redução dos impactos associados às mudanças climáticas em comparação com os demais cenários, principalmente, devido ao baixo impacto de emissões de CO_2.

Figura 42 - Categorias de impacto



Fonte: Elaborado pelo autor (2024).

Para a categoria de Mudanças Climáticas, é analisado o impacto do aquecimento global causado pelas emissões de GEE, medidos em quilogramas de CO_2 equivalente (CO_2e). O aquecimento global é o aumento da temperatura média da Terra, que resulta em mudanças no clima, como alterações nos padrões de chuva, elevação do nível do mar e outros impactos no meio ambiente. Os resultados das análises mostram que as emissões de CO_2 são maiores nos cenários em que a utilização do combustível diesel é predominante. Isso se deve ao fato de que os ônibus a diesel

emitem mais CO_2 durante a queima de combustível e possuem um alto fator de emissão durante a fase de operação.

O Cenário 1, que representando a frota real em operação, têm um impacto elevado em termos de aquecimento global, indicando que a composição da frota está contribuindo consideravelmente para as mudanças climáticas. Em comparação, a substituição do diesel BS-500 pelo BS-10 (Cenário 2) apresenta uma redução de 0,08% do impacto.

A substituição de 25% de ônibus movidos à BS-10 por ônibus elétricos na frota (Cenário 3), apresenta reduções de 25,00% nos impactos do aquecimento global, quando comparados aos impactos gerados pela frota real. A substituição para 50% dos ônibus movidos à BS-10 para ônibus elétricos (Cenário 4) resulta em reduções de 49,92%, quando comparados ao cenário real da frota em operação (Cenário 1). Já a eletrificação total da frota (Cenário 5) praticamente elimina o impacto de aquecimento global (redução de 99,75%), evidenciando os benefícios dos ônibus elétricos. Esse resultado contrasta com os resultados encontrados por Jakub *et al*. (2022), onde os ônibus elétricos mostraram uma carga ambiental maior devido à matriz de produção de energia elétrica utilizada no país. Portanto, a mitigação dos impactos está diretamente relacionada a fonte de energia, sendo que as fontes renováveis conseguem minimizar as emissões de CO_2.

Embora apresente um impacto menor do que o cenário real da frota (Cenário 1), o Cenário 6, o qual considera a utilização de GNV e BS-10, ainda apresenta uma redução de 19,65% em comparação com o cenário real. Isso ressalta que, embora o GNV seja uma alternativa mais limpa em comparação com o diesel, ainda contribui para as emissões de GEE.

Para a respiração orgânica, o valor encontrado, 227.974,49 kg de equivalente de etileno (C_2H_4), sugere que a composição real da frota de ônibus (Cenário 1) está contribuindo para o impacto nesta categoria, apresentando o maior impacto quando comparado aos demais cenários. Isso se deve às emissões de poluentes atmosféricos, como hidrocarbonetos e compostos orgânicos voláteis, que prejudicam a qualidade do ar e a saúde respiratória. Ao retirar os ônibus movidos à BS-500 (Cenário 2) é possível obter uma redução de 42,23% no impacto na respiração orgânica em comparação com a composição real.

Com a substituição parcial dos ônibus movidos à BS-10 para ônibus elétricos, é possível encontrar uma redução gradual desse impacto. Sendo que, a substituição de 25% (Cenário 3) pode resultar em reduções de 56,68% e a substituição de 50% (Cenário 4) pode resultar em reduções de 71,09%. Isso indica que a introdução de ônibus elétricos pode ter um impacto positivo na redução das emissões que afetam a saúde respiratória. Com todos os ônibus da frota movidos a eletricidade (Cenário 5), é possível praticamente eliminar o impacto, apresentando reduções de 99,97%, o que mostra os benefícios dos ônibus elétricos.

No cenário em que todos os ônibus são híbridos (Cenário 6), observa-se uma redução de 81,01%, mas ainda distante do ideal, quando comparado ao Cenário 5 (eletrificação total da frota). É importante destacar que, embora o GNV seja considerado uma alternativa mais limpa em relação ao diesel, ainda pode gerar emissões de COVs e outros poluentes orgânicos durante a queima do combustível nos motores.

Para os impactos na respiração inorgânica, o valor encontrado, 28.673,73 kg de equivalente de $MP_{2,5}$ (partículas finas) sugere que a composição real da frota de ônibus (Cenário 1), com sua variedade de combustíveis, está contribuindo significativamente para esse impacto, sendo o cenário de maior impacto nessa categoria. Isso se deve às emissões de poluentes atmosféricos como NO_x, óxidos de enxofre (SO_x) e partículas inaláveis, que são prejudiciais à saúde respiratória quando inaladas.

Ao retirar os ônibus movidos a BS-500 (Cenário 2), é possível reduzir o impacto nessa categoria, com redução de 13,86%, em comparação com os impactos gerados pelo cenário real. Ao analisar os cenários onde ocorrem a substituição de parte dos ônibus movidos a BS-10 por ônibus elétricos, observa-se uma redução contínua de acordo com a introdução dos ônibus elétricos. A substituição de 25% dos ônibus movidos à BS-10 para ônibus elétricos (Cenário 3) resulta em uma redução de 29,38% do impacto. Já a substituição de metade dos ônibus movidos a BS-10 por ônibus elétricos (Cenário 4) resulta em uma redução de 45,34% no impacto. Com todos os ônibus movidos a eletricidade (Cenário 5), a redução é de 77,34%, indicando uma redução nas emissões de poluentes que afetam a saúde respiratória. Isso confirma que a eletrificação completa da frota é uma boa opção para reduzir esse impacto.

A utilização de kit *dual-fuel* na frota inteira, utilizando uma mistura de GNV com BS-10 (Cenário 6) mostra uma redução de 55,53% do impacto na respiração inorgânica. Porém, não tão eficiente quanto a eletrificação total da frota (Cenário 5), que foi de 77,34%.

Para a categoria de acidificação aquática, a frota real do sistema Transcol (Cenário 1) apresenta maior acidificação (18.283,67 kgSO_2e) quando comparado com todos os outros cenários, indicando o maior impacto negativo nesta categoria. Esse resultado sugere que a presença de ônibus movidos a diesel (BS-500 e BS-10) está contribuindo para a acidificação aquática. O diesel é conhecido por emitir SO_x, que pode se transformar em ácido sulfúrico na atmosfera e, eventualmente, serem depositados na água, contribuindo para a acidificação. Ao eliminar o uso do BS-500, que possui mais enxofre quando comparado ao BS-10, no Cenário 2, é possível reduzir a acidificação em 55,68%.

A substituição gradual dos ônibus a BS-10 por ônibus elétricos nos Cenários 3 (25% da frota elétrica) e 4 (50% da frota elétrica) resulta, respectivamente, em reduções de 65,60% e 75,80%. Já o Cenário 5, que representa uma frota movida apenas por ônibus elétricos, apresenta o menor impacto na categoria de acidificação em relação a todos os outros cenários. Em relação a frota real (Cenário 1), apresenta uma redução de 96,39%, evidenciando o benefício ambiental dos ônibus elétricos.

Ao considerar uma frota totalmente composta por ônibus híbrido (GNV – diesel) (Cenário 6), o impacto é similar ao encontrado pelo cenário real da frota (Cenário 1), mostrando que a combinação GNV com BS-10 não é tão eficaz para reduzir os impactos da acidificação aquática, apresentando uma redução de 5,03%. Isso ocorre porque, embora o GNV seja considerado uma alternativa mais limpa em relação ao diesel, ainda pode gerar NO_x, que também contribuem para a acidificação quando reagem com a água na atmosfera.

Já para a análise do impacto na acidificação/nutrição terrestre, o valor elevado encontrado (63.163,11 kgSO_2e) sugere que a real composição da frota de ônibus (Cenário 1), com sua variedade de combustíveis, resulta em um alto impacto nessa categoria. Isso se deve as emissões de poluentes atmosféricos, como SO_x e NO_x que podem impactar a qualidade do solo. Ao retirar os ônibus movidos a BS-500 (Cenário 2), observa-se uma redução do impacto, em torno de 47,82%.

Com a substituição de parte dos ônibus BS-10 por ônibus elétricos no Cenário 3, observa-se uma redução de 59,87% desse impacto. Já a substituição de metade dos ônibus BS-10 por ônibus elétricos no Cenário 4 resulta em uma redução de 72,09% nesse impacto. Isso sugere que a introdução e o aumento da proporção de ônibus elétricos podem ter um impacto positivo na redução das emissões que afetam o solo. Com todos os ônibus movidos a eletricidade no Cenário 5, a redução de 96,54% nos impactos reflete a ausência de emissões diretas de poluentes atmosféricos que afetam o solo. Portanto, esse cenário resulta em um impacto mínimo de acidificação/nutrição terrestre.

Por outro lado, o Cenário 6, que considera toda a frota em operação de ônibus híbrido, com maior parcela contribuição de GNV na mistura, o impacto na acidificação/nutrição terrestre é aumentado em torno de 98,33%, sendo o pior cenário para esta categoria. Esse impacto pode ser atribuído às emissões de NO_x associadas à queima do GNV, que podem afetar a qualidade do solo quando depositadas.

A normalização e ponderação foram realizadas utilizando os fatores indicados na Tabela 23, através do software OpenLCA. Os resultados da ponderação foram agregados, conforme método IMPACT 2002+, para fornecer um único valor indicador de impacto ambiental. No método utilizado, a normalização é realizada pela divisão do valor agregado com o fator de normalização. Já a ponderação é realizada através da multiplicação do valor encontrado na normalização com o valor de ponderação informado pelos métodos e software utilizados. Os resultados da ponderação são apresentados na Tabela 28. Essa tabela resume os valores de impacto agregado para cada uma das cinco categorias analisadas, para os seis cenários analisados.

Ao analisar os resultados com os valores agregados, pode-se comparar as diferentes categorias analisadas e observa-se que a categoria de aquecimento global é que a apresenta o maior impacto. Em seguida, a categoria de acidificação/nutrição terrestre também contribui para os impactos. A acidificação aquática, embora com um impacto menor em comparação com essas categorias, ainda representa uma contribuição relevante. Já as categorias de respiração orgânica e inorgânica mostraram valores de impacto agregado muito baixos para os cenários analisados, sugerindo que esses impactos são menos relevantes quando comparadas as demais categorias.

Tabela 28 – Valores agregados das categorias de impacto

Categoria de Impacto	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6
Acidificação/ Nutrição Terrestre	$9{,}36\times 10^{8}$	$4{,}88\times 10^{8}$	$3{,}76\times 10^{8}$	$2{,}62\times 10^{8}$	$0{,}32\times 10^{8}$	$18{,}56\times 10^{8}$
Acidificação Aquática	831,08	368,25	285,79	200,85	30,12	789,27
Respiração Inorgânica	$9{,}96\times 10^{5}$	$8{,}58\times 10^{5}$	$7{,}04\times 10^{5}$	$5{,}45\times 10^{5}$	$2{,}26\times 10^{5}$	$4{,}63\times 10^{5}$
Respiração Orgânica	$7{,}34\times 10^{-9}$	$4{,}24\times 10^{-9}$	$3{,}18\times 10^{-9}$	$2{,}12\times 10^{-9}$	$0{,}002\times 10^{-9}$	$1{,}39\times 10^{-9}$
Aquecimento Global	$11{,}82\times 10^{11}$	$11{,}81\times 10^{11}$	$8{,}87\times 10^{11}$	$5{,}93\times 10^{11}$	$0{,}028\times 10^{11}$	$9{,}50\times 10^{11}$

Fonte: Adaptado de OpenLCA (2024).

Ao analisar a Tabela 28, observa-se que o Cenário 1 é o que apresenta os piores resultados em termos de impacto, exceto para a categoria de acidificação/nutrição terrestre, em que o Cenário 6, que apresenta mistura do GNV com BS-10 apresenta o maio valor em termo de impacto.

7.5. ANÁLISE GERAL

Diante das preocupações com os impactos ao meio ambiente e na saúde humana, torna-se necessário promover estudos e discussões sobre a diversificação dos combustíveis utilizados no transporte público de passageiros, inclusive considerando a transição para fontes de energias limpas como uma estratégia para reduzir as emissões de poluentes atmosféricos e GEE. Embora os motores Diesel sejam conhecidos por sua alta durabilidade e desempenho, sua dependência dos combustíveis fósseis os torna suscetíveis à volatilidade dos preços do petróleo, e associados a diversas emissões, tanto de gases de escape durante o funcionamento do motor, como gases associados a cadeia de produção do combustível. A maior parte do setor de transporte público de passageiros ao redor do mundo ainda utiliza o petróleo como principal combustível, enquanto a adoção de tecnologias alternativas ainda é muito limitada, apesar das várias soluções tecnológicas que foram implementadas nos últimos anos (Mahmoud *et al.*, 2016).

Como análise geral desta pesquisa, pôde-se perceber que a adoção de ônibus elétricos na frota resultou em maiores ganhos ambientais, tanto em termos de redução das emissões dos poluentes atmosféricos e de GEE, quando em termos de redução dos impactos associados à saúde humana, qualidade dos ecossistemas e às mudanças climáticas. Sendo que, a adoção de uma frota totalmente eletrificada (Cenário 5) é capaz de reduzir de 75,69% a 99,97% as emissões

associadas. No entanto, a transição para uma frota totalmente eletrificada enfrenta desafios econômicos e logísticos, incluindo altos custos de aquisição, infraestrutura de carregamento e incertezas sobre a demanda futura. Conforme informado pela CETURB-GV, o custo de aquisição de um ônibus elétrico é de aproximadamente três vezes o custo de um ônibus convencional movido à diesel.

A implementação em larga escala de ônibus elétricos demanda grandes investimentos não apenas para adquirir os veículos, mas também para estabelecer a infraestrutura de carregamento, redes de transmissão, planejamento urbano e custos operacionais. Essas iniciativas enfrentam incertezas quanto à demanda futura, desencorajando investimentos na cadeia produtiva. Quando se trata do transporte público de passageiros, um fator importante e que influencia diretamente na gestão é o tempo de abastecimento dos ônibus, visto que afeta a disponibilidade operacional dos ônibus para atender à população. Comparando ônibus movidos à diesel e ônibus elétricos, além das emissões, é essencial considerar a vida útil e eficiência operacional. OS ônibus a diesel têm longa vida útil e rápido abastecimento, porém perdem eficiência com o tempo e emitem substâncias nocivas. Já os elétricos, apesar de menor vida útil e tempo de carga maior, são eficientes e não emitem poluentes durante a operação (Regulski, 2023).

Além disso, ao expandir o escopo da análise para incluir outras fronteiras, como no estudo de Jelti et al. (2021), que considerou as emissões associadas à produção de baterias para ônibus elétricos dentro da análise da ACV, observou-se uma redução das emissões associadas à fase PTW devido a redução de combustível fóssil, quando comparadas com veículos movidos a diesel. No entanto, verificou-se um aumento das emissões na fase WTP devido ao consumo de carvão na fabricação das baterias. Apesar desse aumento, o uso intensificado de energia renovável para geração elétrica resultou em menores emissões associadas à fase WTP no ciclo de vida dos ônibus elétricos, consolidando-se como uma solução eficaz para reduzir as emissões ao longo de todo o ciclo.

Embora a eletrificação da frota tem se mostrado uma solução eficaz para reduzir as emissões e os impactos ambientais, é essencial considerar outros fatores. A configuração da frota com uma combinação de ônibus movidos a diesel mais limpo (BS-10) e ônibus elétricos pode ser uma solução transitória viável, apresentando resultados satisfatórios. No entanto, é importante planejar essa transição para uma eletrificação total ou para outro combustível alternativo de forma que seja viável para a realidade do estado do Espírito Santo.

Conforme evidenciado nesta pesquisa, uma porcentagem significativa de ônibus elétricos na frota, já pode ser considerada uma solução viável para reduzir as emissões. Essa abordagem progressiva pode contribuir para reduzir os impactos ambientais ao mesmo tempo em que considera os desafios logísticos e econômicos envolvidos na implementação de tecnologias alternativas no transporte público. A substituição de 25% dos ônibus movidos a BS-10 por ônibus elétricos na frota do Transcol, conforme evidenciado pelas análises do Cenário 3, pode resultar em reduções de 48,08% de CO, 57,47% de NO_X, 26,66% de MP, 70,16% de SO_2, 56,73 de $NMHC$ e 24,95% nas emissões totais de CO_2e. Já uma substituição de 50%, conforme evidenciado no Cenário 4, proporciona melhorias ainda mais expressivas, como reduções de 63,90% de CO, 70,47% de NO_X, 78,83% de SO_2, 63,90% de MP e 71,12% de $NMHC$, além de reduzir em 49,85% as emissões de CO_2e.

O uso do GNV, mesmo associado a mistura em ônibus híbrido, mostrou benefícios ambientais moderados em comparação com a frota real em operação. Houve reduções nas emissões totais de alguns poluentes atmosféricos e GEE: 31,35% de MP, 86,41% de SO_2, 81,15% de $NMHC$ e 19,35% de CO_2e. No entanto, as emissões totais de CO e NO_X aumentaram, respectivamente, em 2,76% e 140,38%. Quanto ao GEE, houve um aumento de 31,30% nas emissões de CH_4, devido ao fato de que o GNV é um combustível fóssil composto principalmente de metano. Esses aumentos nas emissões associadas ao uso de GNV sugerem que este combustível não é uma opção viável para o transporte público de passageiros, especialmente quando se busca reduzir emissões e melhorar a qualidade do ar.

Este estudo destacou que, de maneira geral, o uso de BS-500 é a pior opção entre os combustíveis analisados. Esse combustível foi avaliado apenas no Cenário 1, que representa a configuração real da frota em operação no sistema Transcol, e esse cenário demonstrou as maiores emissões em comparação com todos os outros cenários analisados. Essas emissões elevadas estão diretamente associadas ao uso desse tipo de diesel. Como evidenciado nesta pesquisa, ao considerar o Cenário 2, que envolve a remoção dos ônibus que utilizam o BS-500, e a substituição total destes por ônibus movidos a BS-10, observa-se reduções nas emissões de todos os poluentes atmosféricos e GEE: 32,43% de CO, 10,74% de MP, 61,91% de SO_2, 44,60% de NO_X, 42,34% de $NMHC$ e de 0,05% de CO_2e.

Em relação as fases WTP e PTW, a análise WTW aplicada para os combustíveis utilizados pelos ônibus do sistema Transcol enfatizou a importância de considerar as emissões da fase WTP. Embora esta fase contribua, principalmente, para as emissões de MP, ela também tem influência considerável nas emissões totais de todos os poluentes atmosféricos e GEE analisados. Para o caso da produção da eletricidade no Brasil, onde a produção de energia está amplamente ligada a fontes renováveis, as emissões da fase WTP são reduzidas em comparação com outros estudos realizados em diferentes regiões. Portanto, é essencial conduzir estudos específicos em contextos locais para compreender completamente o potencial de redução de emissões e os impactos específicos de vários tipos de ônibus elétricos em cada região. E, os altos valores de emissões encontrados na fase PTW destacam a necessidade de investimentos para reduzir as emissões durante a operação dos ônibus, seja por meio de avanços tecnológicos ou pela adoção de combustíveis mais limpos.

Para as análises das categorias de impacto, os resultados mostraram que a substituição da frota atual por ônibus elétricos (Cenário 5) apresenta os maiores benefícios ambientais em todas as categorias de impacto analisadas. A eletrificação parcial (Cenários 3 e 4) também oferece melhorias significativas, enquanto a substituição por ônibus híbridos, considerando uma participação do combustível GNV (Cenário 6) e o cenário com maior composição de ônibus movidos à diesel (Cenário 2) mostram maiores impactos. O Cenário 1, que representa a frota real em operação no Transcol, demonstra os piores resultados, sendo a configuração que apresenta o maior impacto ambiental e as maiores emissões em relação a todos os outros cenários.

Ao analisar os resultados dos valores agregados, destaca-se que a categoria de aquecimento global apresenta o maior impacto agregado, sendo responsável pela maior parte dos impactos totais avaliados. Na sequência aparecem as categorias de acidificação/nutrição terrestre e a categoria acidificação aquática, embora com um menor impacto em comparação com a primeira. Por outro lado, as categorias de respiração orgânica e inorgânica mostraram valores de impacto agregado muito baixos nos cenários analisados, sugerindo que esses impactos são mínimos.

Por fim, é importante destacar que o método proposto nesta pesquisa se mostrou eficaz para calcular e avaliar as emissões de poluentes atmosféricos e GEE, além de analisar diversas categorias de impacto. A aplicação deste método em um estudo de caso, utilizando dados reais

da frota do sistema Transcol, demonstrou a aplicabilidade do método proposto nesta dissertação. Por ser baseado nas normas NBR ISO 14040 e NBR ISO 14044, este método pode servir como referência para empresas operadoras de ônibus e agências reguladoras municipais, estaduais e federais brasileiras. Além disso, pode ser adaptado para outras modalidades de transporte terrestre em diferentes regiões do Brasil.

8. CONCLUSÕES

Esta dissertação utilizou a análise WTW para calcular e avaliar as emissões de poluentes atmosféricos e GEE associados aos combustíveis utilizados pelos ônibus do sistema Transcol. Foram utilizados dados reais de operação da frota, fornecidos pela CETURB-GV, a entidade responsável pela gestão das operações.

Para realizar a análise, foi proposto um método seguindo as normas NBR ISO 14040 e 14044 como diretrizes. Foram criados seis cenários representando diferentes configurações de frota, considerando o modelo dos ônibus e o tipo de combustível utilizado, incluindo o BS-500, BS-10, GNV e eletricidade. As emissões foram mensuradas para os poluentes atmosféricos CO, NO_X, SO_2, MP e $NMHC$ e para os GEE CO_2, CH_4 e N_2O. O escopo da pesquisa considerou a fase WTP, de produção do combustível, e a fase WTW, de operação dos ônibus. Não foram consideradas as etapas de produção e descarte dos ônibus. Os cálculos consideraram o consumo de combustível, a produção dos combustíveis e os fatores de emissão. Os dados relacionados aos processos de produção dos combustíveis analisados foram obtidos da base de dados Ecoinvent, através do software OpenLCA.

A análise dos resultados revelou que a adoção de ônibus elétricos proporciona redução de emissões em comparação com outros cenários, tanto em termos de emissões de poluentes atmosféricos quanto de GEE, atingindo reduções que variam de 75,69% a 99,97%. Isso é particularmente relevante para o Brasil, onde a matriz energética é majoritariamente limpa e renovável, resultando em reduções nas emissões associadas a fase de produção da energia. Porém, é necessário avaliar a viabilidade da transição para uma frota totalmente eletrificada, considerando os custos de aquisição dos ônibus e a necessidade de infraestrutura de recarga.

A substituição parcial da frota por ônibus elétricos também apresentou reduções quando comparada com todos os outros cenários, mostrando que a adoção parcial de ônibus elétricos pode ser a melhor rota para a descarbonização do sistema Transcol. A substituição de 50% de ônibus movido a BS-10 por ônibus elétricos (Cenário 4), apresentou reduções das emissões de: 63,90% de CO, 70,47% de NO_X, 78,83% de SO_2, 63,90% de MP e 71,12% de $NMHC$, além de reduzir em 49,85% as emissões de CO_2e.

A análise do uso do GNV, mostrou que apesar de apresentar redução das emissões de alguns poluentes atmosféricos e GEE, resultou em um aumento significativo das emissões de CO,

NO_x e CH_4, desqualificando esse combustível como uma opção para reduzir as emissões. Além disso, a adoção de uma frota híbrida requer adaptações nos ônibus e infraestrutura de abastecimento. Portanto, esse combustível não se apresenta como uma solução viável para o transporte público analisado.

As análises das categorias de impacto seguiram os mesmos padrões encontrados para a análise dos poluentes atmosféricos e GEE, indicando que a transição para uma frota elétrica consegue reduzir os impactos no aquecimento global, na saúde humana e na qualidade dos ecossistemas. O resultado do uso do GNV em relação às categorias de impacto, apresentaram um aumento do impacto na categoria de acidificação/nutrição terrestre.

Portanto, a eletrificação parcial e a transição para uma frota totalmente elétrica, considerando porcentagens de ônibus elétricos acima de 25% se apresentam como soluções viáveis a curto prazo. Para as análises de valores agregados, as categorias que apresentaram os maiores impactos foram: aquecimento global, acidificação/nutrição terrestre e acidificação aquática. Por outro lado, as categorias de respiração orgânica e inorgânica mostram valores mínimos de impacto.

Espera-se que essas descobertas forneçam uma orientação para os operadores de transporte e formuladores de políticas, incentivando uma transição para um sistema de transporte público mais sustentável e eficiente para o estado do ES. No entanto, é necessário reconhecer que a fase de produção dos combustíveis desempenha um papel fundamental no ciclo de vida das emissões, sendo necessário abordar melhorias que considerem todo o ciclo de vida dos combustíveis, desde a produção até a operação, visando alcançar resultados ambientais significativos. O método proposto e resultados encontrados nesta pesquisa podem ser adaptados para outras localidades.

8.1. TRABALHOS FUTUROS

Como considerações finais, sugere-se como trabalhos futuros:

- Realização de um inventário detalhado que leve em consideração todas as variáveis que podem influenciar nas emissões, como as rotas utilizadas, condições de condução e de via, relevo a fim de desenvolver estratégias para reduzir as emissões.

- Avaliar o desempenho dos ônibus elétricos em operação no sistema Transcol ao longo dos próximos anos para entender a verdadeira eficácia na redução das emissões e melhoria da qualidade do ar.
- Investigar a viabilidade técnica, econômica e ambiental de combustíveis alternativos para o transporte público coletivo como o biometano, HVO e célula de hidrogênio, em comparação com os combustíveis convencionais e elétricos.
- Analisar o impacto dos sistemas de pós-tratamento dos gases de escapamento e as reduções das emissões em diferentes modelos de ônibus, como articulados ou convencionais, e investigar como o uso de sistemas de ar-condicionado pode influenciar nas emissões.
- Expandir a fronteira utilizada na pesquisa para considerar as emissões associadas a produção, manutenção e reciclagem dos ônibus, especialmente das baterias elétricas, para realizar uma análise abrangente do ciclo de vida dos ônibus.
- Investigar os outros poluentes atmosféricos associados ao transporte para uma compreensão mais completa dos impactos ambientais.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT - ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7148**: Petróleo e produtos de petróleo – Determinação da massa específica, densidade relativa e ºAPI – Método do densímetro. Rio de Janeiro: ABNT, 2013.

_____. **NBR ISO 14040**: Gestão Ambiental - Avaliação Do Ciclo De Vida - Princípio E Estrutura. Rio de Janeiro: ABNT**,** 2014a.

_____. **NBR ISO 14044**: Gestão Ambiental - Avaliação Do Ciclo De Vida - Princípio E Estrutura. Rio de Janeiro: ABNT**,** 2014b.

ACV BRASIL. **Ecoinvent 3.6 conexões internas**. 2020. Disponível em: acvbrasil.com.br. Acesso em: 28 out. 2023.

_____. **Orientação Global para Indicadores e Métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida**. GLAM, 2021. Disponível em: https://acvbrasil.com.br/artigo/aicv-glam. Acesso em: 28 out. 2023.

ANEEL - AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Programa de pesquisa desenvolvimento e inovação**. Brasil. 2023. Disponível em: https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/programa-de-pesquisa-desenvolvimento-e-inovacao/chamadas-de-projetos-de-pdi-estrategicos. Acesso em: 25 mar. 2023.

ANP - AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO, GÁS NATURAL E BIOCOMBUSTÍVEIS. **Resolução nº 41**, de 5 de novembro de 2013. Diário Oficial da União, Brasil. 2013. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br. Acesso em: 25 out. 2022.

_____. **Biodiesel.** Ministério de Minas e Energias, BRASIL. 2020a. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/producao-e-fornecimento-de-biocombustiveis/biodiesel>. Acesso em: 25 out. 2022.

_____. **RenovaBio**. Ministério de Minas e Energias, Brasil. 2020b. Disponível em: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/renovabio>. Acesso em: 25 out. 2022.

_____. **Anuário estatístico brasileiro de petróleo, gás e biocombustíveis 2023.** 2023. Disponível em: https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-conteudo/publicacoes/anuario-estatistico/arquivos-anuario-estatistico-2023/anuario-2023.pdf. Acesso em: 25 dez. 2022.

ANTP - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS. **Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Público**. 2020. Disponível em: http://www.antp.org.br/. Acesso em: 27 out. 2022.

BAYINDIR, K.Ç.; GÖZÜKÜÇÜK, M. A.; TEKE, A. A comprehensive overview of hybrid electric vehicle: Powertrain configurations, powertrain control techniques and electronic control units. **Energy Conversion and Management**, v. 52, n. 2, p. 1305-1313, 2011.

BERMOND, V.; CALIMAN, R. R.; ROSA, R. DE A.; PEREIRA, E. P.; CARVALHAES, B. B. A method to assess the eco-efficiency of a public bus transportation service. ***International Journal of Sustainable Transportation***, v. 13, n. 8, p. 567–581, 2019.

BRASIL. Senado Federal. **Lei no 8.723**, de 28 de outubro de 1993. Dispõe sobre a redução de emissão de poluentes por veículos automotores e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 1993. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L8723.htm. Acesso em: 22 nov. 2022.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Programa Nacional de Produção e Uso do Biodiesel (PNPB),** 2004. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/biodiesel/pnpb. Acesso em: 16 nov. 2022.

_____. Senado Federal. **Lei nº 11.097**, de 13 de janeiro de 2005. Dispõe sobre a introdução do biodiesel na matriz energética brasileira; altera as Leis nº 9.478, de 6 de agosto de 1997, 9.847, de 26 de outubro de 1999 e 10.636, de 30 de dezembro de 2002; e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2005. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2004-2006/2005/Lei/L11097.htm. Acesso em: 22 nov. 2022.

_____. Ministério do Meio Ambiente. **2o Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por veículos automotores rodoviários**. Brasília, DF, 2014. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2013/01/2014-05-27inventario2013.pdf. Acesso em: 19 out. 2022.

_____. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. **Lei no 13.576**, de 26 de dezembro de 2017. Dispõe sobre a Política Nacional de Biocombustíveis (RenovaBio) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, 2017. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_Ato2015-2018/2017/Lei/L13576.htm. Acesso em: 22 nov. 2022.

_____. Ministério do Meio Ambiente e Mudança do Clima**. Poluentes Atmosféricos**, 2020. Disponível em: https://www.gov.br/mma/pt-br. Acesso em: 19 out. 2022.

_____. Ministério de Minas e Energia. **Resolução Nº 7,** de 20 de abril de 2021.Institui o Programa Combustível do Futuro, cria o Comitê Técnico Combustível do Futuro e dá outras providências. CNPE, 2021. Disponível em: https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/petroleo-gas-natural-e-biocombustiveis/combustivel-do-futuro. Acesso em:

_____. Planalto. **COP28 aprova transição para fim do uso de combustíveis fósseis.** 2023. Disponível em: https://www.gov.br/planalto/pt-br/acompanhe-o-planalto/noticias/2023/12/cop28-aprova-transicao-para-fim-do-uso-de-combustiveis-fosseis. Acesso em: 05 jan. 2024.

_____. Ministério das Relações Exteriores. **COP 28 termina com acordo para transição energética**. Brasília, 2023. Disponível em: https://agenciagov.ebc.com.br/noticias/202312/resultados-da-cop28. Acesso em: 05 jan. 2024.

_____. Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação. **Fator médio - Inventários corporativos.** Brasília, 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/cgcl/paginas/fator-medio-inventarios-corporativos> Acesso em: 10 de mar. 2024.

BARRAZA, O.; ESTRADA, M. Battery electric bus network: Efficient design and cost comparison of different powertrains. **Sustainability** (Switzerland), v. 13, n. 9, p. 4745, 2021.

BRITO, T.; FRAGOSO, R.; MARQUES, P.; FERNANDES-SILVA, A.; ARANHA, J. LCA of Soybean Supply Chain Produced in the State of Pará, Located in the Brazilian Amazon Biome. **Biology and Life Sciences Forum**., v. 3, n.11, 2021.

BRUNETTI, F. **Motores de Combustão Interna: volume 1** / Franco Brunetti. - São Paulo: Blucher, 2012.

KOROL, D, B.; JURSOVA, S.; FOLĘGA, P.; KOROL, J.; PUSTEJOVSKA, P.; BLAUT, A. Environmental life cycle assessment of electric vehicles in Poland and the Czech Republic. ***Journal of Cleaner Production***, v. 202, p. 476–487, 2018.

CARVALHO, C. H. R. **Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros.** IPEA, Brasília, DF, 2011. Disponível em: https://portalantigo.ipea.gov.br/agencia/images/stories/PDFs/TDs/td_1606.pdfAcesso em: 26 jun. 2023.

CAVALETT, O.; ORTEGA, E. Integrated environmental assessment of biodiesel production from soybean in Brazil. J**ournal of Cleaner Production**, v. 18, n. 1, p. 55-70, 2010.

CETESB (Companhia Ambiental do Estado de São Paulo). **Emissão veicular**. São Paulo, SP. 2020. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/veicular/. Acesso em: 17 out. 2022.

_____. **Qualidade do Ar no Estado de São Paulo**. Série Relatórios. São Paulo, SP. 2021. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/publicacoes-relatorios/. Acesso em: 17 out. 2022.

_____. **QUALIDADE DO AR**. São Paulo, SP. 2022. Disponível em: https://cetesb.sp.gov.br/ar/. Acesso em: 17 out. 2022.

CETURB (Companhia de Transportes Urbanos da Grande Vitória). **CETURB-ES.** Vitória, ES. 2018. Disponível em: https://Ceturb.Es.Gov.Br/. Acesso em: 22 out. 2022.

_____. Sistema Transcol Inicia Testes Com Ônibus de 15 Metros. Vitória, ES. 2019. Disponível em: https://ceturb.es.gov.br/Not%C3%ADcia/sistema-transcol-inicia-testes-com-onibus-de-15-metros. Acesso em: 22 out. 2022.

CHAN, S.; MIRANDA-MORENO, L. F.; ALAM, A.; HATZOPOULOU, M. Assessing the impact of bus technology on greenhouse gas emissions along a major corridor: A lifecycle analysis. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 20, p. 7–11, 2013.

CHANG, C. C.; LIAO, Y. T.; CHANG, Y. W. Life cycle assessment of alternative energy types – including hydrogen – for public city buses in Taiwan. **International Journal of Hydrogen Energy,** v. 44, n. 33, p. 18472–18482, 2019.

CHANG, C-C.; HUANG, P. C. Carbon footprint of different fuels used in public transportation in Taiwan: a life cycle assessment. **Environment, Development and Sustainability**, v. 24, p. 5811–5825, 2022.

CLIMATE WATCH. In World Resources Institute. **Historical GHG Emissions**. 2024. Disponível em: https://www.climatewatchdata.org/. Acesso em: 24 jan 2024.

CNPE - CONSELHO NACIONAL DE POLÍTICA ENERGÉTICA. **Resolução nº 16**, de 29 de outubro de 2018. Dispõe sobre a evolução da adição obrigatória de biodiesel ao diesel vendido ao consumidor final, em qualquer parte do território nacional. Brasília, DF, 2018.

CNT - CONSELHO NACIONAL DO TRANSPORTE. **A fase P-7 do Proconve e o impacto no setor de transporte**. 2.ed. – Brasília: CNT: Sest/Senat, 2012.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. **Resolução nº 18**, de 6 de maio de 1986. Dispõe sobre a criação do Programa de Controle de Poluição do Ar por veículos Automotores – Proconve. Diário Oficial da União, Brasília, DF. Seção 1, páginas 8792-8795. 1986.

_____. **Resolução nº 403**, de 11 de novembro de 2008. Dispõe sobre a nova fase de exigência do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores-Proconve para

veículos pesados novos (Fase P-7) e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF. 2008.

_____. **Resolução nº 491**, de 19 de novembro de 2018. Dispõe sobre padrões de qualidade do ar. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 2018.

_____. **Resolução Nº 490,** de 16 de novembro de 2018. Estabelece a Fase Proconve P-8 de exigências do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores – Proconve para o controle das emissões de gases poluentes e de ruído para veículos automotores pesados novos de uso rodoviário e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF. 2018.

COPPOLA, P.; BOCCIOLONE, M.; COLOMBO, E.; FABIIS, F.; SANVITO, F.D. Multi-Criteria Life-Cycle Assessment of bus fleet renewal: A methodology with a case study from Italy. **Case Studies on Transport Policy**, v. 13, n. 101044, 2023.

CORREA, C. **Setor de Transporte é o que causa mais impactos na qualidade do ar. Ministério do Meio Ambiente.** MMA, 2010. Disponível em: https://www.mma.gov.br/informma/item/6191-setor-de-transporte-e-o-que-causa-mais-impactosna-qualidade-do-. Acesso em: 15 abr. 2022.

CORREA, G.; MUNOZ, P.M.; RODRIGUEZ, C. R. A comparative energy and environmental analysis of a diesel, hybrid, hydrogen, and electric urban bus. **Energy**, v. 187, n. 115906, 2019.

CONMETRO - CONSELHO NACIONAL DE METROLOGIA, NORMALIZAÇÃO E QUALIDADE INDUSTRIAL. **Resolução nº 03,** de 22 de abril de 2010. Dispõe sobre a Aprovação do Termo de Referência do Programa Brasileiro de Avaliação do Ciclo de Vida e dá outras providências. Ministério Do Desenvolvimento, Indústria E Comércio Exterior, 2010. Disponível em: https://acv.ibict.br/wp-content/uploads/2016/05/Resolucao_PBACV.pdf. Acesso em: 16 jul. 2023.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. **Transcol Ganha Mais 45 Ônibus Novos Com Ar-Condicionado Para a Grande Vitoria - Es.** 2022. Disponível em: https://diariodotransporte.com.br/2022/08/31/transcol-ganha-mais-45-onibus-novos-com-ar-condicionado-para-a-grande-vitoria-es/. Acesso em: 22 abr. 2023.

_____. **Exclusivo: Byd, Eletra, Marcopolo ou Volvo: quem se deu melhor nos testes de ônibus eletrico em curitiba**. 2023. Disponível em: https://diariodotransporte.com.br/2023/12/12/exclusivo-byd-eletra-marcopolo-ou-volvo-quem-se-deu-melhor-nos-testes-de-onibus-eletrico-em-curitiba/. Acesso em: 18 nov. 2023.

D'AGOSTO, M. A. **Transporte, uso de energia e impactos ambientais: Uma abordagem introdutória.** Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SIMONI, W.; SANT'ANNA, A.; ALENCAR, A.; PINHEIRO, B.; ARAÚJO, C.; VORMITTAG, E.; WICHER, H.; BORGES, K.; FARIA, M.; ANDRADE, M. F.; PORTO, P.; ARTAXO, P.; ROCHA, R.; ESTURBA, T. **O Estado da Qualidade do Ar no Brasil**. 2021. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/o-estado-da-qualidade-do-ar-no-brasil. Acesso em: 22 set. 2022.

DREIER, D.; SILVEIRA, S.; KHATIWADA, D.; FONSECA, K. V. O.; NIEWEGLOWSKI, R.; SCHEPANSKI, R. Well-to-Wheel analysis of fossil energy use and greenhouse gas emissions for conventional, hybrid-electric, and plug-in hybrid-electric city buses in the BRT system in Curitiba, Brazil. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 58, p. 122–138, 2018.

NERYS, I. **Grande Vitória (ES) recebe o primeiro ônibus elétrico 100% brasileiro da Eletra. Eletra**, 2022. Disponível em: https://www.eletrabus.com.br/grande-vitoria-es-recebe-o-primeiro-onibus-eletrico-100-brasileiro/. Acesso em: 12 abr. 2023

EPA - U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. **Overview of Greenhouse Gases**. 2024. Disponível em: https://www.epa.gov/ghgemissions/overview-greenhouse-gases. Acesso em: 22 abr. 2024.

EPE - EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Panorama da Indústria de Gás Natural na Bolívia**. 2017. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-250/topico-307/EPE%202017%20-%20Panorama%20da%20Ind%C3%BAstria%20de%20G%C3%A1s%20Natural%20na%20Bol%C3%ADvia%2022jun17.pdf. Acesso em: 18 out. 2022.

_____. **Matriz Energética e Elétrica**. 2020a. Disponível em: Https://Www.Epe.Gov.Br/Pt/Abcdenergia/Matriz-Energetica-e-Eletrica. Acesso em: 18 out. 2022.

_____. **Balanço Energético Nacional**. 2020b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-479/topico-528/BEN2020_sp.pdf. Acesso em: 18 out. 2022.

_____. **Anuário estatístico de energia elétrica 2022 (ano base 2021).** 2022a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-68/Fact%20Sheet%20-20Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202022.pdf. Acesso em: 18 out. 2022.

_____. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2031**. Brasília: MME/EPE, 2022b. Disponível em: www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Documents/PDE%202031_RevisaoPosCP_rvFinal_v2.pdf. Acesso em: 04 jan. 2024.

_____. **Anuário estatístico de energia elétrica 2023 (ano base 2022).** 2023. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/anuario-factsheet.pdf. Acesso em: 04 jan. 2024.

ERCAN, T.; TATARI, O. A hybrid life cycle assessment of public transportation buses with alternative fuel options. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 9, p. 1213–1231, 2015.

ES - ESPÍRITO SANTO. **Lei Estadual Nº 3.693**, de 06 de dezembro de 1984. Disponível em: https://ceturb.es.gov.br/Media/ceturb/Importacao/Arquivos/Generico/Lei%20Estadual%203693.pdf. Acesso em: 04 jan. 2024.

GABRIEL, N. R.; MARTIN, K. K.; HASLAM, S. J.; FAILE, J. C.; KAMENS, R. M.; GHEEWALA, S. H. A comparative life cycle assessment of electric, compressed natural gas, and diesel buses in Thailand. **Journal of Cleaner Production**, v. 314, n. 128013, 2021.

GARCÍA-AFONSO, O. Impact of powertrain electrification on the overall CO2 emissions of intercity public bus transport: Tenerife Island test case. **Journal of Cleaner Production**, v. 412, 2023.

GIL, A. C. **Como Elaborar Projetos de Pesquisa**. 4.ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GUSTAFSSON, M.; SVENSSON, N.; EKLUND, M.; ÖBERG, J. D.; VEHABOVIC, A. Well-to-wheel greenhouse gas emissions of heavy-duty transports: Influence of electricity carbon intensity. **Transportation Research Part D: Transport and Environment,** v. 93, n. 102757, 2021.

GVBus - SINDICATO DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE METROPOLITANO DA GRANDE VITÓRIA. **Inovação e sustentabilidade: Transcol recebe 1° ônibus elétrico**. 2022. Disponível em: https://www.gvbus.org.br/inovacao-e-sustentabilidade-transcol-recebe-1-onibus-eletrico/. Acesso em: 28 jun 2023.

HAFDAOUI, H. E.; JELTI, F.; KHALLAAYOUN, A.; OUAZZANI, K. Energy and Environmental National Assessment of Alternative Fuel Buses in Morocco. **World Electric Vehicle Journal**, v.14, n. 4, 2023.

HE, X.; ZHANG, S.; KE, W.; ZHENG, Y.; ZHOU, B.; LIANG, X.; WU, Y. Energy consumption and well-to-wheels air pollutant emissions of battery electric buses under complex operating conditions and implications on fleet electrification. **Journal of Cleaner Production**, v. 171, p. 714-722, 2018.

HENRIQUES, R. S.; SALDANHA, R. R.; COELHO, L. M. G. An Air Pollutant Emission Analysis of Brazilian Electricity Production Projections and Other Countries. **Energies**, v. 12, n. 15, p. 2851, 2019.

HUNT, R.; FRANKLIN, E. LCA - How it Came About. Personal Reflections on the Origin and the Development of LCA in the USA. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v.1, n.1, p. 4-7, 1996.

IAP - INSTITUTO AMBIENTAL DO PARANÁ. **Fontes de Poluição Atmosférica**. 2020. Disponível em: http://www.iap.pr.gov.br/pagina-1415.html. Acesso em: 13 abr. 2023.

IBAMA - INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Instrução Normativa nº 23/2009**. Estabelecer para o agente redutor líquido de NOx automotivo, a ser utilizado em veículos com motorização do ciclo Diesel, a denominação de Arla 32, MMA, Brasil, 2009. Disponível em: https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&force=1&legislacao=115136. Acesso em: 20 jun. 2023.

_____. Programa de controle de emissões veiculares (Proconve). 2022. Disponível em: https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve. Acesso em: 20 jun. 2023.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Vitória, Espírito Santo**, 2022. Disponível em: https://cidades.ibge.gov.br/brasil/es/vitoria/panorama. Acesso em: 20 mar. 2024.

ICCT - INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. **Proconve P-8**. 2019 Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/P-8_emission_Brazil_policyupdate_20190227.pdf>. Acesso em: 8 dez. 2022.

_____. **Brazil.** 2020. Disponível em: https://theicct.Org/Region/Brazil/. Acesso em: 8 dez. 2022.

IEA - INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Transport**. IEA, 2021. Disponível em: https://www.Iea.Org/Reports/Transport. Acesso em: 20 nov. 2022.

_____. **Energy Perspective** 2022; IEA: Paris, França, 2022. Disponível em: https://www.iea.org/energy-system/fossil-fuels. Acesso em: 20 mar. 2024.

_____. **How much CO2 does Brazil emit?** IEA, 2024 Disponível em: https://www.iea.org/countries/brazil/emissions. Acesso em: 20 mar. 2024.

IEMA - INSTITUTO ESTADUAL DE MEIO AMBIENTE E RECURSOS HÍDRICOS. **1º Diagnóstico da rede de monitoramento da qualidade do ar no Brasil**, 2014. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2014/01/1-diagnostico-da-rede-de-monitoramento-da-qualidade-do-ar-no-brasil.pdf. Acesso em: 5 dez. 2022.

_____. **Qualidade do Ar**. 2021. Disponível em: https://iema.es.gov.br/qualidadedoar. Acesso em: 20 nov. 2022

_____. **Plataforma da Qualidade do Ar**, 2024 Disponível em: http://energiaeambiente.org.br/qualidadedoar#secao-4. Acesso em: 20 mar. 2024.

IPCC - INTERGOVERNAMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANCE. **Sixth Assessment Report**. 2022. Disponível em: https://www.Ipcc.Ch/. Acesso em: 22 nov. 2022.

JAKUB, S.; ADRIAN, L.; MIECZYSŁAW, B.; EWELINA, B.; KATARZYNA, Z. Life cycle assessment study on the public transport bus fleet electrification in the context of sustainable urban development strategy. **Science of the Total Environment**, v. 824, 2022.

JELTI, F.; ALLOUHI, A.; AL-GHAMDI, S. G.; SAADANI, R.; JAMIL, A.; RAHMOUNE, M. Environmental life cycle assessment of alternative fuels for city buses: A case study in Oujda city, Morocco. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 46, n. 49, p. 25308–25319, 2021.

JOLLIET, O.; MARGNI, M.; CHARLES, R.; HUMBERT, S.; PAYET, J.; REBITZER, G.; ROSENBAUM, R. IMPACT 2002+: a new life cycle impact assessment methodology., **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 8, n. 6, p. 324-330, 2003.

JRC - JOINT RESEARCH CENTRE. **Analysis of existing environmental impact assessment methodologies for use in life cycle assessment: background document**. ILCD Handbook, 2010.

JUNIOR, H. R. A. S.; DANTAS, T. E. T.; CHERUBINI, E.; ZANGHELINI, GUILHERME M., SOARES S. R. Environmental Impacts of the Brazilian Energy Mix—An LCA Approach to Past, Present, and Future Scenarios. In book: Water, Energy and Food Nexus in the Context of Strategies for Climate Change Mitigation. **Climate Change Management**, v.15, p. 183–195, 2019.

KANG, S. C.; QUEZADA, D. Exploring Low-Carbon Bus Options for Urban BRT Systems: The Case of Amman. **Journal of Public Transportation**, v. 22, n. 1, p. 57-75, 2020.

KUCUKVAR, M.; ONAT, N. C.; KUTTY, A. A.; ABDELLA, G. M.; BULAK, M. E.; ANSARI, F.; KUMBAROGLU, G. Environmental efficiency of electric vehicles in Europe under various electricity production mix scenarios. **Journal of Cleaner Production**, v. 335, n. 13029, 2022.

LEE, D. Y.; ELGOWAINY, A.; VIJAYAGOPAL, R. Well-to-wheel environmental implications of fuel economy targets for hydrogen fuel cell electric buses in the United States. **Energy Policy**, v. 128, p. 565-583, 2019.

LEICHTER, M.; HACKENHAAR, I.; PASSUELLO, A. Public Bus Transportation System Environmental Impact Projections Regarding Different Policy Scenarios—A LCA. **Infrastructures**, v. 6, n. 12, p. 169, 2021.

LEONE, C.; STURARO, L.; GEROLI, G.; LONGO, M.; YAICI, W. Design and Implementation of an Electric Skibus Line in North Italy. **Energies,** v. 14, n. 23, p. 7925, 2021.

LUU, L. Q.; SANSEVERINO, E. R.; CELLURA, M.; NGUYEN, H.-N.; TRAN, H.-P.; NGUYEN, H.A. Life Cycle Energy Consumption and Air Emissions Comparison of Alternative and Conventional Bus Fleets in Vietnam. **Energies**, v. 15, p. 7059, 2022.

LIU, D.; XU, L.; SADIA, U. H.; WANG, H. Evaluating the CO2 emission reduction effect of China's battery electric vehicle promotion efforts. **Atmospheric Pollution Research**, v. 12, n. 7, p. 101115, 2021.

LUU, L. Q.; RIVA SANSEVERINO, E.; CELLURA, M.; NGUYEN, H.-N.; NGUYEN, T. M.; NGUYEN, H. A. Comparative life cycle impact assessment of electric and conventional bus in Vietnam. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 54, p. 102873, 2022.

MAALEJ, K.; KELOUWANI, S.; AGBOSSOU, K.; DUBÉ, Y. Enhanced fuel cell hybrid electric vehicle power sharing method based on fuel cost and mass estimation. **Journal of Power Source**, v. 248, p. 668-678, 2014.

MAHMOUD, M.; GARNETT, R.; FERGUSON, M.; KANAROGLOU, P. Electric buses: A review of alternative powertrains. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 62, p. 673-684, 2016.

MANUGUERRA, L.; CAPPELLETTI, F.; GERMANI, M. A machine learning based method for parametric environmental impact model for electric vehicles. **Journal of Cleaner Production**, v. 454, p. 142308, 2024.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, n. 1, p.160-175, 2016.

MILLER, J.; FAÇANHA, C. **Relatório Técnico Análise de Custo-Benefício da Norma P-8 de Emissões de Veículos Pesados no Brasil**. ICCT, 2016. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/P-8%20Portuguese%20White%20Paper%20vFinal.pdf. Acesso em: 10 out. 2023.

MILLER, J.; POSADA, F. **Norma Proconve P-8 de Emissões no Brasil**. ICCT, FEVEREIRO, 2019. Disponível em: https://theicct.org/sites/default/files/publications/P8_emission_Brazil_policyupdate_20190227.pdf. Acesso em: 10 out. 2023

MIRAFTABZADEH, S. M.; ALESSANDRO SALDARINI, A.; CATTANEO, L.; AJAMI, S. E.; LONGO, M.; FOIADELLI, F. Comparative analysis of decarbonization of local public transportation: A real case study. **Heliyon**, v. 10, n. 3, p. 25778, 2024.

MOLINA, P. B.; PÉREZ, E. H.; LÓPEZ, E. P.; GÓMEZ, M. C. M. Assessing transport emissions reduction while increasing electric vehicles and renewable generation levels. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 88, p. 102560, 2020.

MOURAD, A. L.; WALTER, A. The energy balance of soybean biodiesel in Brazil: a case study. **Biofuels, Bioproducts and Biorefining**, v. 5, p. 185–197, 2011.

MURARO, M. A. Efeito do uso de recirculação de gases de exaustão (egr) na contaminação do lubrificante e no desgaste de anel e camisa de motor de combustão interna com ciclo Diesel. Dissertação, UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ, câmpus de Curitiba departamento de pesquisa e pós-graduação programa de pós-graduação em engenharia mecânica e de materiais – ppgem, 2016.

NIKZAD, M.; KHALILZADEHB, R.; RABIEIC, A. Well-to-wheel Energy Consumption and CO2 Emission Comparison of Electric and Fossil Fuel Buses: Tehran Case Study. **International Journal of Engineering**, v, 37, n. 03, p. 567-578, 2024.

NTU - ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTES URBANOS. **Anuário NTU: 2020-2021**. Brasília: NTU, 62, 2021. Disponível em: https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub637677328510412847.pdf. Acesso em: 10 mar. 2024.

_____. **Anuário NTU: 2022-2023**. Brasília: NTU, 76, 2023. Disponível em: //ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638272765778419772.pdf. Acesso em: 10 de mar. 2024.

NORDELOF, A.; ROMARE, M.; TIVANDER, J. Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 75, p. 211–222, 2019.

YLUND, N. O.; KOPONEN, K. Fuel and technology alternatives for buses: Overall energy efficiency and emission performance. **International Journal of Commercial Vehicles,** v. 5, n. 2, p.515-533, 2012.

OFFER, G. J.; HOWEY, D.; CONTESTABILE, M.; CLAGUE, R.; BRANDON, N. P. Comparative analysis of battery electric, hydrogen fuel cell and hybrid vehicles in a future sustainable road transport system. **Energy Policy**, v. 38, p. 24-29, 2010.

OpenLCA **A free software for everything you need in sustainability modeling.** Versão 11.1.0. GreenDelta, Alemanha, 2022. Disponível em: https://www.openlca.org/. Acesso em: 10 dez. 2022.

OPAS - ORGANIZAÇÃO PAN-AMERICANA DA SAÚDE. **Não polua o meu futuro! O impacto do ambiente na saúde das crianças.** Licença: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. Brasília, DF, 2018. Disponível em: https://iris.paho.org/ handle/10665.2/49123. Acesso em: 20 out. 2022.

ORSI, F.; MURATORI, M.; ROCCO, M.; COLOMBO, E.; RIZZONI, G. A multi-dimensional well-to-wheel analysis of passenger vehicles in different regions: Primary energy consumption, CO2 emissions, and economic cost. **Applied Energy**, v. 169, p. 197–209, 2016.

OUR WORLD IN DATA. **CO2 and greenhouse gas emissions**. 2019. Disponível em: https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions 2019. Acesso em: 22 out. 2023.

PATHAK, A.; SETHURAMAN, G.; ONGEL, A.; LIENKAMP, M. Impacts of electrification & automation of public bus transportation on sustainability—A case study in Singapore. **Forschung im Ingenieurwesen**, v. 85, p. 431–442, 2021.

PETROBRÁS. **Manual Técnico Diesel S-10**. 2023. Disponível em: https://cmsdespoluir.cnt.org.br/Documents/PDFs/manual-tecnico-diesel-s-10.pdf. Acesso em: 20 jan. 2024.

PDUI - PLANO DE DESENVOLVIMENTO URBANO INTEGRADO. **COMDEVIT**, PDUI. 2017. Disponível em: https://planometropolitano.es.gov.br/comdevit. Acesso em: 17 set. 2023.

POURAHMADIYAN, A.; AHMADI, P.; KJEANG, E. Dynamic simulation and life cycle greenhouse gas impact assessment of CNG, LNG, and diesel-powered transit buses in British Columbia, Canada. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 92, p. 102724, 2021.

REGULSKI P. Assessment of the life cycle of city buses with diesel and electric drive in the operation phase. **Combustion Engines**, v. 193, n. 2, p. 117-1212, 2023.

RIBEIRO, S. K. **Estudo das Vantagens Ambientais do Gás Natural Veicular: o caso do Rio de Janeiro.** Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

RITCHIE, H.; ROSADO, P.; ROSER, M. "**CO_2 and Greenhouse Gas Emissions**", OurWorldInData.org. 2023. Disponível em: https://ourworldindata.org/co2-and-greenhouse-gas-emissions. Acesso em: 20 jan. 2024.

ROMEIRO, V.; GENIN, C.; FELIN, B. **Nova NDC do Brasil**. WRI Brasil, 2021. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/noticias/nova-ndc-do-brasil-entenda-por-que-meta-climatica-foi-considerada-pouco-ambiciosa. Acesso em: 19 set. 2022.

SÁNCHEZ, J. A. C.; MARTÍNEZ, J. M. L.; MARTÍN, J. L.; HOLGADO M. N. F.; MORALES, H. A. Impact of Spanish electricity mix, over the period 2008–2030, on the Life Cycle energy consumption and GHG emissions of Electric, Hybrid Diesel-Electric, Fuel Cell Hybrid and Diesel Bus of the Madrid Transportation System. **Energy Conversion and Management**, v. 74, p. 332-343, 2013.

SCHWERTNER, M.; WEIDMANN, U. Comparison of Well-to-Wheel Efficiencies for Different Drivetrain Configurations of Transit Buses Zurich. 2016, **Journal of the Transportation Research Board**, v. 2539, p. 55–64, 2016.

SHINDE, A. M.; DIKSHIT, A. K.; SINGH, R. K. Comparison of life cycle environmental performance of public road transport modes in metropolitan regions. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 21, n. 3, p. 605–624, 2019.

SPOOF-TUOM, K.; ARVIDSSON, H.; NILSSON, O.; NIEMI, S. Real-Driving Emissions of an Aging Biogas-Fueled City Bus. **Clean Technology**, v. 4, n. 4, p. 954-971, 2022.

SONG, Q.; WANG, Z.; WU, Y.; LI, J.; YU, D.; DUAN, H.; YUAN, W. Could urban electric public bus really reduce the GHG emissions: A case study in Macau? **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 2133–2142, 2018.

TEOH, L. E.; KHOO, H. L.; GOH, S. Y.; CHONG, L. M. Scenario-based electric bus operation: A case study of Putrajaya, Malaysia. 2018, **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 7, p.10–25, 2018.

TOPAL, O.; NAKIR, I. Total Cost of Ownership Based Economic Analysis of Diesel, CNG and Electric Bus Concepts for the Public Transport in Istanbul City. **Energies**, v. 11, n. 9, p. 2369, 2018.

TOMIC, M. V.; JOVANOVIĆ, Z.; MIŠANOVIĆ, S.; ŽIVANOVIĆ, Z.; MASONIČIĆ, Z. Some Energetic and Ecological Aspects of Different City Bus Drive Systems. **Thermal Science**, v. 22, n. 3, p. 1493-1504, 2018.

UFES - UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO. **Plano de Neutralização de Emissões de GEE**. Vitória, ES. 2022. Disponível em: https://qualidadedoar.ufes.br/conteudo/plano-de-neutralizacao-de-emissoes-de-gee. Acesso em: 20 out. 2022.

UN - UNITED NATIONS. **COP28: O que é e por que importa?** ONU News. Perspectiva Global Reportagens Humanas. 2023. Disponível em: https://news.un.org/pt/story/2023/11/1824032. Acesso em: 19 jan. 2024.

UNFCCC - UNITED NATIONS FRAMEWORK CONVENTION ON CLIMATE CHANGE. **Race to Zero Campaign**. 2022. Disponível em: https://Unfccc.Int/Climate-Action/Race-to-Zero-Campaign. Acesso em: 20 out. 2022.

_____. **Acordo de Paris**. Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC), 2022. Disponível em: www4.unfccc.int/sites/NDCStaging/Pages/Party.aspx?party=BRA. Acesso em: 23 nov. 2022.

VARELLA, C. A. A.; SANTOS, G. S. **Noções Básicas de motores Diesel**. 1 ed. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro – UFRRJ, Seropédica, RJ. 2010. Disponível em: Noes_Bsicas_de_Motores_Diesel.pdf. Acesso em: 22 dez. 2023.

VILELA, L.O. Aplicação do PROKNOW-C para seleção de um portifólio bibliográfico e análise bibliométrica sobre avaliação de desempenho da gestão do conhecimento. **Revista Gestão Industrial.** v.8, n.1, p. 76–92, 2012.

VERGARA, S. C. **Métodos pesquisa em administração**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2010.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Air quality guidelines: Global Update 2005**. 2006. Disponível em: https://www.who.int/phe/health_topics/outdoorair/outdoorair_aqg/en/. Acesso em: Acesso em: 19 mar. 2022.

WHO - WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO global air quality guidelines: particulate matter (PM2.5 and PM10), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** 2021. Disponível em: https://www.who.int/publications/i/item/9789240034228. Acesso em: 19 mar. 2022.

WRI - WORLD RESOURCES INSTITUTE. **As barreiras a serem superadas para que os ônibus elétricos transformem as cidades**. WRI Brasil, 2019. Disponível em: https://www.wribrasil.org.br/noticias/barreiras-serem-superadas-para-que-os-onibus-eletricos-transformem-cidades. Acesso em: 19 nov. 2023.