

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL: CONSTRUÇÃO E
INFRAESTRUTURA

Michelle Zanettini Leichter

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA TRANSIÇÃO DO TRANSPORTE
PÚBLICO URBANO DE ÔNIBUS CONVENCIONAIS PARA
ELÉTRICOS EM PORTO ALEGRE**

Porto Alegre
2022

Michelle Zanettini Leichter

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA TRANSIÇÃO DO TRANSPORTE
PÚBLICO URBANO DE ÔNIBUS CONVENCIONAIS PARA
ELÉTRICOS EM PORTO ALEGRE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura da Universidade Federal do Rio
Grande do Sul, como parte dos requisitos para
obtenção do título de Mestre em Engenharia

Orientadora: Profa. PhD. Ana Carolina Badalotti
Passuello; Dra. pela Universidade Rovira i Virgili,
Espanha

Porto Alegre
2022

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL

Carlos André Bulhões Mendes (Reitor)

Patricia Pranke (Vice-Reitora)

ESCOLA DE ENGENHARIA

Carla Schwengber ten Caten (Diretora)

Afonso Reguly (Vice-Diretor)

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

Ângela de Moura Ferreira Danilevicz (Coordenadora)

Carlos Torres Formoso (Coordenador-Substituto)

CIP - Catalogação na Publicação

Zanettini Leichter, Michelle
Avaliação do ciclo de vida na transição do
transporte público urbano de ônibus convencionais para
ônibus elétricos em Porto Alegre / Michelle Zanettini
Leichter. -- 2022.
186 f.
Orientador: Ana Carolina Badalotti Passuello.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Escola de Engenharia, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e
Infraestrutura, Porto Alegre, BR-RS, 2022.

1. avaliação do ciclo de vida (acv). 2. transporte.
3. sustentabilidade. 4. urbanismo. 5. políticas
públicas. I. Badalotti Passuello, Ana Carolina,
orient. II. Título.

Michelle Zanettini Leichter

AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA NA TRANSIÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO URBANO DE ÔNIBUS CONVENCIONAIS PARA ÔNIBUS ELÉTRICOS EM PORTO ALEGRE

Esta dissertação de mestrado foi julgada para a obtenção do título de MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, área de pesquisa Sustentabilidade e Gestão de Riscos, e aprovada em sua forma final pelo Professor Orientador e pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura da Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

Porto Alegre, 27 de Setembro de 2022.

Prof.^a Dr.^a. Ângela de Moura Ferreira Danilevicz, Dra.
Coordenadora do PPGCI

Prof.^a. Ana Carolina Badalotti Passuello Dr.
Orientadora

Banca Examinadora:

Prof. José Luis Duarte Ribeiro, Dr.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Prof.^a Cassia Maria Lie Ugaya, Dra.
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Prof.^a Juliana Klas, Dra.
Universidade Federal do Rio Grande do Sul

AGRADECIMENTOS

À minha Família pelo amor incondicional e por toda a compreensão e afeto. Em especial, a minha mãe e dinda, pelo apoio constante e a crença no meu potencial não só como estudante e pesquisadora, mas como ser humano. Sem o suporte de vocês, esse texto não existiria.

À minha orientadora, Ana Passuello, por guiar meu caminho na ciência e acreditar na minha capacidade, sempre incentivando o desenvolvimento dos meus trabalhos. Esta dissertação está permitindo não somente meu avanço como pesquisadora, mas também criando uma jornada de crescimento pessoal. Muito obrigada pela confiança e por se aventurar comigo na interface entre SIG e ACV.

Aos professores do PPGCI por todo o conhecimento e pela disponibilidade em contribuir de maneira direta ou indireta com esse texto. Cabe ainda um agradecimento especial ao Prof. Vinícius Maciel pela troca de conhecimento e as conversas instigantes na disciplina de ACV.

Ao grupo de pesquisa LIFE Sustainability, que com as reuniões de estudo e seminários me propiciaram o compartilhamento de conhecimento e uma partilha mútua para evoluirmos juntos.

Assim, também agradeço aos meus amigos e colaboradores do grupo de pesquisa, que fizeram com que o mestrado fosse muito além de conhecimento acadêmico. Todo meu apreço a vocês. Em especial à Janaine, com quem dividi angústias e sucessos durante o percurso e à Isadora, que esteve presente desde o início da minha pesquisa ainda na graduação, sempre com palavras reconfortantes e de incentivo.

Agradeço também a disponibilidade e atenção dada pela Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC) pelo fornecimento de alguns dados utilizados nessa pesquisa, e pelo apoio nos meus trabalhos desde a graduação.

A todos meus amigos que mesmo no período sombrio de isolamento estavam presentes me propiciando conforto e incentivo.

Aos professores da banca pelo tempo dedicado na leitura e considerações a melhoria do presente trabalho.

À CAPES, pelo apoio financeiro e por contribuir para o desenvolvimento da pesquisa no Brasil.

“The only true wisdom is in knowing you know nothing.”
(Sócrates)

RESUMO

LEICHTER, M. Z. Avaliação do ciclo de vida na transição do transporte público urbano de ônibus convencionais para elétricos em Porto Alegre (Mestrado em Engenharia) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e Infraestrutura, Escola de Engenharia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Atividades urbanas, como o transporte, são responsáveis por grande parte das emissões relacionadas à energia. Nesse cenário, cidades estão gradativamente aderindo a políticas sustentáveis. Tais esforços devem ser apoiados por informações quantitativas confiáveis sobre os impactos ambientais. A técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é capaz de gerar informações direcionadas a atingir esse objetivo. No entanto, deve ser destacada a complexidade inerente de análises em escala urbana, que consideram simultaneamente as características territoriais e os padrões de produção-consumo. Por isso, buscando promover um ambiente de simulação amplo, a ACV pode ser associada a outras ferramentas, como sistema de informações geográficas (SIG). A presente pesquisa visa propor uma estratégia dinâmica de diagnóstico e prognóstico futuro do desempenho ambiental do transporte por ônibus, considerando especificidades territoriais e diferentes cenários de mitigação. Assim, é apresentada uma estrutura metodológica composta por um *framework* visando otimizar a integração territorial junto à avaliação ambiental. O *framework* é proposto e subsequentemente testado em um estudo de caso no transporte coletivo por ônibus na cidade de Porto Alegre considerando transições da frota a partir da sua eletrificação. Os resultados mostram uma diminuição dos impactos ambientais potenciais até 2050 com a introdução de veículos elétricos e a transição para uma matriz nacional mais limpa. Ainda, destaca-se que dentre os cenários analisados, EL1, apresenta o maior potencial de redução (85,5%), uma vez que no mesmo ocorre, a partir de 2029, a substituição total de ônibus convencional por elétrico, demonstrando diminuição considerável dos impactos associados a mudanças climáticas. Finalmente, é perceptível que, para conduzir uma ACV para apoiar a tomada de decisões em sistemas urbanos, é necessária uma abordagem detalhada considerando que as variáveis tecnológicas interagem com o contexto territorial e mudanças de políticas públicas.

Palavras-chave: Avaliação do ciclo de vida territorial; Transporte urbano; Eletrificação da frota; Políticas públicas; Sistemas de informação geográfica.

ABSTRACT

LEICHTER, M. Z. Life cycle assessment in the transition of urban public transport from conventional buses to electric buses in Porto Alegre (Master's in Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, School of Engineering, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2022.

Urban activities, such as transportation, are responsible for many energy-related emissions. In this scenario, cities are gradually adhering to sustainable policies. Such efforts must be supported by reliable quantitative information on environmental impacts. The technique of Life Cycle Assessment (LCA) can generate information aimed at achieving this goal. However, the inherent complexity of urban-scale analyses, which simultaneously consider territorial characteristics and production-consumption patterns, must be highlighted. Therefore, seeking to promote a broad simulation environment, LCA can be associated with other tools, such as geographic information systems (GIS). Thus, the present research aims to propose a dynamic strategy for diagnosis and future prognosis of the environmental performance of bus transportation, considering territorial specificities and different mitigation scenarios. Thus, a methodological structure comprises a framework that optimizes territorial integration with environmental assessment. The proposed framework is subsequently tested in a case study on public bus transportation in Porto Alegre, considering fleet transitions after its electrification. The results show a decrease in impact by 2050 with the introduction of electric vehicles and the transition to a cleaner national matrix. Still, it is noteworthy that among the scenarios analyzed, EL1, presents the most significant potential for reduction (85.5%), since, in this scenario, from 2029 onwards, the total replacement of conventional buses by electric ones demonstrates a considerable reduction of the impacts associated with GWP. Finally, it is perceptible that in order to conduct an LCA to support decision-making in urban systems, a detailed approach is necessary, considering that technological variables interact with the territorial context and public policy changes.

Keywords: Life cycle assessment; Fleet; Urban transport; Electric vehicles; Public policy; Geographic Information Systems; Emission.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Modelo de construção e utilização de conhecimento.....	38
Figura 2 - Delineamento da pesquisa.....	39
Figura 3 - Número de publicações ano	46
Figura 4 - Número de publicações por revista.....	48
Figura 5 - Número de publicações divididas em modais de transporte	49
Figura 6 - Mapa conceitual, revelando quatro temas palavras-chave	51
Figura 7 - Mapa conceitual, revelando quatro temas título e resumo.....	52
Figura 8 - Número de publicações por região	54
Figura 9 - Comparação entre abordagens ACV de produto e frota	57
Figura 10 - Fluxograma de conexão SIG-ACV.....	69
Figura 11 - Identificação de bottlenecks nas fases de ACV.	70
Figura 12 - Construção ACV de um território.	71
Figura 13 - Método de ACV Territorial.....	72
Figura 14 - Fases ACV vs Funcionalidades SIG.	75
Figura 15 - Estrutura da pesquisa.	77
Figura 16 - Diagrama Resumo proposta de método.	79
Figura 17 - Diagnóstico - (a) densidade (hab/km ²); (b) acessibilidade (interpolação).	84
Figura 18 - Diagnóstico - (c) Linhas de ônibus; (d) Bacias de ônibus	85
Figura 19 - Fronteiras do sistema.....	93
Figura 20 - Estimativa do número de passageiros e quilômetros percorridos por linha individual considerando o ano referência.	97
Figura 21 - Trechos transporte (a) combustível, (b) ônibus.....	105
Figura 22 - Impactos ambientais por mistura de combustível segundo a porcentagem de biodiesel no combustível de acordo com os cenários definidos.	110
Figura 23 - Evolução da capacidade instalada (MW) de centrais por tecnologia. ...	113
Figura 24 - Contribuição por região.....	116
Figura 25 - Contribuição de cada fonte por categoria de impacto.	117
Figura 26 - Projeções de impacto de Potencial de Aquecimento Global (GWP) (em kg CO ₂ eq.), Depleção de recursos fósseis (FD) (em kg oil eq.), Toxicidade humana (HT) (em kg 1,4-DCB eq.) e Formação de material particulado (PMFP) (em kg PM ₁₀ eq.) por ano da matriz elétrica brasileira.	119
Figura 27 - Potencial de aquecimento global (GWP), Depleção de recursos fósseis (FD), Toxicidade humana (HT) e Formação de material particulado (PMFP) em percentual considerando o ano de 2020 como base.....	123
Figura 28 - Potencial de aquecimento global (GWP), Depleção de recursos fósseis (FD), Toxicidade humana (HT) e Formação de material particulado (PMFP) em percentual considerando o cenário 2, EL1.	127
Figura 29 - Potencial de aquecimento global (GWP), Depleção de recursos fósseis (FD), Toxicidade humana (HT) e Formação de material particulado (PMFP) em percentual kg/ano) considerando o cenário 3, EL2.	130

Figura 30 - Projeções de impacto de Potencial de Aquecimento Global (GWP) (em kg CO2 eq.), Depleção de recursos fósseis (FD) (em kg oil eq.), Toxicidade humana (HT) (em kg 1,4-DCB eq.) e Formação de material particulado (PMFP) (em kg PM10 eq.) por ano do sistema de transporte público (frota Carris) de Porto Alegre.....	132
Figura 31 - Espacialização dos dados; (a) densidade + raio de alcance linhas; (b) repetição linhas + vias.....	136
Figura 32 - Emissões cenário 2 - EL1.	140

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Presença de <i>databases</i> de <i>background</i> em artigos	60
Tabela 2 - Métodos AICV utilizados em artigos.....	62
Tabela 3 - Categorias de impacto CML utilizadas em artigos	63
Tabela 4 - Categorias de impacto <i>ReCiPe</i> utilizadas em artigos.....	64
Tabela 5 - Quadro resumo dos artigos da RSL quanto ao conteúdo do artigo.....	68
Tabela 6 - Cenários de mudanças ao longo do tempo	90
Tabela 7 – Percentual de contribuição matriz elétrica ao longo dos anos (%).	91
Tabela 8 - Fabricação de veículos na frota da empresa Carris ao longo do tempo e eficiência e modelo do veículo.	97
Tabela 9 - Cenário 1 (BAU) de mudanças na frota ao longo do tempo segundo variáveis de eficiência e modelo do veículo.	98
Tabela 10 - Cenário 2 (EL1) de mudanças na frota ao longo do tempo segundo variáveis de eficiência e modelo do veículo.	99
Tabela 11 - Cenário 3 (EL2) de mudanças na frota ao longo do tempo segundo variáveis de eficiência e modelo do veículo.	100
Tabela 12 - Dados de emissões para combustão dos combustíveis diesel e biodiesel.	102
Tabela 14 - Equivalência do combustível segundo seu poder calorífico.	108
Tabela 13 - Evolução da capacidade instalada (MW).	114
Tabela 15 - Dados gerais das publicações	161
Tabela 16 - Dados específicos os artigos de transporte*	171
Tabela 17 - Relatório de adaptação de ICV: ônibus convencional e elétrico	177
Tabela 18 - Relatório de adaptação de ICV: bateria	180
Tabela 19 - Relatório de adaptação de ICV: transporte	181
Tabela 20 - Relatório de adaptação de ICV: manutenção.....	183
Tabela 21 - Relatório de adaptação de ICV: diesel	185
Tabela 22 - Relatório de adaptação de ICV: biodiesel	188
Tabela 23 - Relatório de adaptação de ICV: eletricidade	189
Tabela 24 - Cenário 1 (BAU)	192
Tabela 25 - Cenário 2 (EL1)	193
Tabela 26 - Cenário 3 (EL2)	194

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

ACV - Avaliação do Ciclo de Vida

ACVT - Avaliação do Ciclo de Vida Territorial

AICV - Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida

ANEEL - Agência Nacional de Energia Elétrica

ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis

ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos

BAU – *Business as usual*

BEN - Balanço Energético Nacional

BYD - *Build Your Dreams*

CCV - Avaliação do Custo do Ciclo Vida

CNPE - Conselho Nacional de Política Energética

EL1 – Elétrico 1

EL2 – Elétrico 2

DSR - Design Science Research

EPTC - Empresa Pública de Transporte e Circulação da cidade

ESRI - Instituto de Pesquisa de Sistemas Ambientais (do inglês, *Environmental Systems Research Institute*)

FE - Fator de emissão

FEt - Fator de emissão territorial

GEE - Gases de Efeito Estufa

GWP - Potencial de aquecimento global (do inglês, *Global Warming Potential*)

HT – Toxicidade Humana (do inglês, *Human toxicity*)

IBGE - Instituto Nacional de Processamento de Dados Estatísticos

ISO – Organização Internacional de Normalização (do inglês, *International Organization for Standardization*)

ICV - Inventário do Ciclo de Vida

NREL - Banco de dados de inventário do ciclo de vida dos Estados Unidos (do inglês, *National Renewable Energy Laboratory*)

OCDE - Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico

OC – Ônibus Convencional

ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

OE – Ônibus Elétrico

ONU - Organização das Nações Unidas

PDDUA - Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental

PMPA - Prefeitura Municipal de Porto Alegre

PNAD - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios

RSL - Revisão Sistemática de Literatura

SGBD - Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados

SIG - Sistema de Informação Geográfica

UF- Unidade Funcional

SUMÁRIO

RESUMO	20
ABSTRACT	21
LISTA DE FIGURAS	22
LISTA DE TABELAS	24
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS	25
SUMÁRIO	27
1 INTRODUÇÃO	30
1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA.....	30
1.2 OBJETIVOS DE PESQUISA.....	34
1.2.1 Objetivo Geral	34
1.2.2 Objetivos Específicos	34
1.3 DELIMITAÇÕES.....	35
1.4 DELINEAMENTO.....	37
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO.....	40
2 REVISÃO DE LITERATURA	42
2.1 ACV APLICADA A SISTEMAS DE TRANSPORTE.....	42
2.1.1 Revisão sistemática de literatura	44
2.1.2 Frequência e cobertura temática das publicações	46
2.1.2.1 Análise de conteúdo.....	50
2.1.3 Concentração Geográfica	53
2.1.4 Visão geral dos Resultados da Ferramenta ACV	54
2.1.4.1 Definição de objetivo em artigos revisados.....	54
2.1.4.2 Definição de unidade funcional em artigos revisados.....	56
2.1.4.3 Fronteiras do sistema de artigos observados.....	57
2.1.4.4 Análise de inventário: uma indicação do uso de <i>databases</i> nos artigos analisados.....	59
2.1.4.5 Métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida usados.....	61

2.1.4.6	Interpretação dos resultados	65
2.1.5	Síntese.....	65
2.2	ABORDAGEM TERRITORIAL.....	67
2.2.1	Visão geral dos Resultados.....	68
3	MÉTODO.....	74
3.1	Desenvolvimento do método de pesquisa	74
3.2	Definição Do Estudo De Caso	80
3.2.1	Diagnóstico	82
3.2.1.1	Análise espacial Porto Alegre.....	82
3.3	Objetivo e Escopo.....	86
3.3.1	Cenários	87
3.3.2	Fronteiras do sistema e unidade funcional.....	92
3.4	Inventário de Ciclo de Vida (ICV).....	94
3.4.1	Dados Primários	94
3.4.1.1	Características da frota.....	94
3.4.1.2	Dados espaciais	101
3.4.2	Dados Secundários	102
3.5	Avaliação dos Impactos do Ciclo De Vida (AICV).....	105
3.6	Interpretação dos resultados	107
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	108
4.1.1.1	Fonte energética.....	108
4.1.1.1.1	<i>Mistura de Diesel e Biodiesel</i>	<i>108</i>
4.1.1.1.2	<i>Matriz elétrica</i>	<i>111</i>
4.1.1.1.2.1	Sistema elétrico brasileiro.....	111
4.1.1.1.2.2	Diferenciação por região	114
4.1.2	Cenários	120
4.1.2.1	Cenário 1 - BAU.....	121
4.1.2.2	Cenário 2 – EL1.....	124

4.1.2.3 Cenário 3 – EL2.....	128
4.1.2.4 Comparação entre os cenários.....	131
4.1.3 Análise espacial.....	135
5 CONCLUSÕES	141
REFERÊNCIAS.....	144
APÊNDICE A – Revisão sistemática	160
APÊNDICE B – Detalhamento inventário.....	176
APÊNDICE C – Impactos ambientais segundo avaliação de cenários	191
APÊNDICE D – Mapeamento linhas Carris.....	195

1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o contexto em que o tema da presente pesquisa está inserido, o problema do mundo real que justifica o estudo, o problema de pesquisa (lacuna do conhecimento), assim como as questões e objetivos propostos. No final do capítulo, as delimitações, o delineamento e, por fim, a estrutura de pesquisa são apresentados.

1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

A edição de 2022 do relatório “Relatório Mundial das Cidades” aponta que 55% da população mundial vive em áreas urbanas (ONU, 2022). No contexto brasileiro, tal projeção é ainda mais marcante com 84,72% dos habitantes do país vivendo em tais zonas (PNAD, 2018). Considerando tais estatísticas, não é surpreendente que as cidades sejam responsáveis por cerca de 71% a 76% das emissões de CO₂ relacionadas com energia (IPCC, 2018).

Com o crescimento contínuo da população mundial e a expansão urbana, há uma elevação no número de deslocamentos populacionais dentro do perímetro metropolitano e, também, um protagonismo do setor de transportes nas emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE). Em especial, considerando que modais de transporte são responsáveis por mais da metade do consumo global de petróleo (IPCC, 2014). A majoritária dependência do campo a recursos fósseis e a resistência do mesmo a aderir a novas tecnologias dificultam a problemática (BONGARDT et al., 2014)

No Brasil, essa realidade é mais significativa, devido ao predomínio do transporte rodoviário no país, propulsor de um baixo desempenho econômico e energético (SANTOS; MARQUES, 2020), e da difícil implementação de práticas sustentáveis em cidades em desenvolvimento (ZHANG et al., 2019). Ainda em nível nacional, dentro do setor de energia, a maior atividade emissora é o transporte. Somente em 2019, pelo menos 196,5 milhões de toneladas de CO₂eq foram emitidas pelo transporte - 47% de todas as emissões de energia. Esses poluentes são gerados principalmente pela utilização de veículos movidos a combustíveis fósseis, sendo caminhões e automóveis os dois principais emissores, responsáveis por,

respectivamente, 40% e 31% dos gases de efeito estufa emitidos em 2019 no Brasil (SEEG, 2021).

Nesse cenário, devido à grande parcela de emissões no setor de transportes, inúmeras estratégias visam mitigar impactos em zonas urbanas a partir de mudanças vinculadas à mobilidade, como melhorias na economia de combustível do veículo, dispositivos de controle de emissão e troca de fonte energética (CHESTER; CANO, 2016). Em nível nacional, legislação recente estimula os investimentos em transporte urbano sustentável e decreta a obrigatoriedade na elaboração de planos de mobilidade a partir de 20 mil habitantes (BRASIL, 2012).

Apesar de tal compulsoriedade, nota-se a falta de uma aplicação prática das iniciativas, sendo que menos de 10% das cidades brasileiras elaboraram planos (MOBILIZE, 2018). Ademais, a falta de articulação dos planos de mobilidade com políticas de desenvolvimento urbano e iniciativas do governo local inibem a implementação de políticas com caráter sustentável (KUNZ et al., 2017; FONTOURA et al., 2018).

Atualmente, o cenário da mobilidade brasileira revela um enfoque no transporte por automóvel individual que vem há décadas recebendo estímulos governamentais (ANTP, 2016). Tal cenário, favorece o aumento da frota de veículos no país que congestionam infraestruturas urbanas deficientes, aumentam o nível de poluição na atmosfera urbana proporcionam riscos à saúde pública e contribuem substancialmente para a mudança climática regional e global (HADDAD et al., 2015; JIANG et al., 2017). A perceptível insistência por este modelo antiquado, e a contínua falta de investimentos em opções de mobilidade ativa e transporte público e, o incremento em seu custo, só amplificam as disfunções nas cidades brasileiras.

O transporte coletivo possui caráter universal e fundamental, cujo objetivo é atender à população de qualquer faixa de renda em qualquer local da cidade (BRASIL, 1988). Ele garante a vida em sociedade, trazendo várias vantagens em relação a outros modais, especialmente os automóveis individuais. A primeira vantagem é sua capacidade de transporte, podendo alcançar duzentos passageiros em um ônibus biarticulado. Outros benefícios são o menor consumo de espaço viário por pessoa transportada, a redução no uso de energia, nas emissões de GEE e no risco de

acidentes fatais por quilômetro rodado, tornando-se o meio motorizado mais sustentável de todos os disponíveis atualmente (ANTP, 2020).

Apesar disso, ainda há falta de investimento nessa tipologia de transporte, em especial quando realizado por ônibus urbanos. Conseqüentemente, o sistema de transporte público brasileiro é majoritariamente caracterizado pelos usuários como um serviço de má qualidade, comumente envolvendo superlotação e falta de infraestrutura (SILVA; SILVA, 2018). Outros estudos também apontam uma tendência de crescimento reverso, ocorrendo uma evasão direcionada ao transporte motorizado individual a partir da insatisfação dos usuários com o meio de transporte coletivo (FURTADO, 2017). Tal perspectiva se torna preocupante, uma vez que atualmente o transporte público compreende em média 28% das viagens realizadas nas cidades brasileiras, tendo papel primordial na diminuição da emissão de poluentes, com taxas estimadas oito vezes menores que um automóvel particular (NTU, 2021).

Neste contexto, o transporte público surge como alternativa para a redução de impactos ambientais e a melhoria social e econômica na mobilidade urbana de uma cidade. Dessa maneira, visando um planejamento coerente, reconhecendo a imprescindibilidade por mudanças para sustentabilidade, avanço tecnológico e operacional do transporte público; informações quantitativas confiáveis sobre impactos ambientais, sociais e econômicos devem ser produzidas para apoiar a consecução de estratégias mitigadoras.

A ferramenta avaliação do ciclo de vida (ACV) permite identificar melhorias em várias fases do ciclo de vida de um produto, ou sistema, bem como facilita o processo de tomada de decisão. A ACV é considerada uma técnica adequada, sendo cada vez mais utilizada na análise de impactos associados a sistemas de transporte (CHESTER et al., 2013b; VEDRENNE et al., 2014, LEICHTER et al., 2022). O próprio grau de descarbonização dos veículos, como indica MORO; HELMERS (2017), pode ser estimado por meio dessa técnica. Ademais, a ACV vem sendo utilizada para subsidiar a formulação de políticas públicas, com estudos desenvolvidos em diferentes contextos, sendo frequentemente aplicada para comparar tecnologias de veículos no transporte motorizado (GARCÍA SÁNCHEZ et al., 2013). Todavia, é necessário salientar a complexidade inerente às análises realizadas em uma escala urbana.

Normas internacionais já regulam a técnica de ACV, de uma abordagem mais ampla - ISO 14040 ISO, 2009a) – a uma abordagem mais específica a edificações - série EN 15978 (CEN, 2011). Apesar desse crescente desenvolvimento na escala da edificação, ainda não há um padrão para ACV urbana. Além disso, a multifuncionalidade e complexidade de contextos territoriais, demandam uma contextualização mais aprofundada das especificidades do local onde a ACV está inserida (LOISEAU et al., 2014), o que impacta diretamente nas escolhas metodológicas atreladas à avaliação.

A ACV territorial (LOISEAU et al., 2018) vem sendo desenvolvida em resposta a essa necessidade de adaptação da ACV orientada ao produto para avaliar os impactos ambientais de planos ou programas a nível territorial. Ademais, a pluralidade de avaliações na escala urbana demanda um ambiente de simulação mais amplo, associando ACV a outras metodologias, como o sistema de informações geográficas (SIG), que localiza geograficamente os fluxos de entrada e saída e as áreas sob impacto ambiental (LIU et al., 2014).

A integração de SIG e ACV possibilita o desenvolvimento de um modelo de caracterização urbana, que pode melhorar a acurácia de análise, tornando possível avaliar o acúmulo de materiais no espaço e no tempo, possibilitando melhor entendimento dos resultados trazidos pela inclusão de informação espacial. Pesquisas usam essa combinação de métodos (GEYER et al., 2010; MASTRUCCI et al., 2015), porém ainda falta uma estratégia clara para análises executadas com ambas as ferramentas.

O desenvolvimento de um procedimento metodológico por meio da ACV Territorial conectividade entre as ferramentas, pode auxiliar os processos de tomada de decisão sobre as ações em diferentes fases do ciclo de vida do sistema ou organismo. Além de proporcionar resultados gráficos e numéricos de uma determinada avaliação de impacto para dada situação, a comparação conjunta pode facilitar o entendimento dos gestores e dar mais ênfase ao incremento de práticas de sustentabilidade em cenários urbanos.

Especificamente no transporte coletivo, onde muitas vezes o processo de tomada de decisão é realizado por gestores públicos, sem conhecimento técnico

sobre ACV, a criação de um método para auxiliar na análise e a comparação de resultados de impactos pode servir como diferencial importante para determinar mudanças de ações nas fases de uso e operação dos veículos, nas quais estão concentrados os maiores potenciais impactos ambientais (CHESTER; CANO, 2016). Complementarmente, pode facilitar a expressão gráfica de quais parâmetros possuem maior influência sobre os resultados, auxiliando a interpretação do tomador de decisão e tornando mais acessível a aplicação da ferramenta.

Por conseguinte, a justificativa da escolha do tema desta pesquisa está relacionada à necessidade de desenvolvimento de métodos e aplicações práticas de sustentabilidade no planejamento urbano, com o objetivo de mitigar os impactos ambientais associados ao ciclo de vida. Especificamente para o transporte público, o argumento foca no problema real, explícito pela pouca efetividade das políticas públicas sustentáveis na mobilidade, a baixa concentração de investimentos dada a esse setor pelos governantes brasileiros e o alto potencial de mudança proporcionado por ele.

1.2 OBJETIVOS DE PESQUISA

1.2.1 Objetivo Geral

O objetivo geral desta pesquisa é propor uma estratégia dinâmica de diagnóstico e prognóstico do transporte por ônibus, considerando especificidades territoriais e diferentes cenários de mitigação demonstrados a partir da técnica de ACV.

1.2.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta pesquisa são:

- a) Definir a abordagem de avaliação de ciclo de vida mais apropriada para diagnosticar o impacto causado por ônibus urbanos;
- b) Investigar, através da técnica de ACV, potenciais mudanças no perfil de emissões em cenários futuros, considerando alterações na

composição de combustíveis bem como a introdução de ônibus elétricos na frota de ônibus na cidade de Porto Alegre;

- c) Avaliar as emissões da frota ao longo do tempo para cada cenário, estimando a influência de diferentes parâmetros do modelo nos resultados;
- d) Identificar possíveis contribuições do SIG para ACV territorial, visando contribuir para estratégias de gestão ambiental que otimizam a integração territorial junto à avaliação ambiental por meio do georreferenciamento.

1.3 DELIMITAÇÕES

Para elaboração desta dissertação, foram disponibilizados dados de lotes de ônibus existentes, tipo de veículo, eficiência e informações de operação fornecidos pela operadora de ônibus local, a Empresa Pública Transporte e Circulação (EPTC). Dessa forma, a pesquisa adota a abordagem de estudo de caso, aplicado à cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, Brasil. O escopo é limitado a uma única empresa licenciada para prestar o serviço de transporte público, a Carris.

O presente estudo tem como base estruturadora a pesquisa de outras publicações para se chegar a um método padronizado e adequado à temática. Ademais, se limita a seguir normativas nacionais e internacionais para a Avaliação do Ciclo de Vida no âmbito territorial. Outros documentos, normativas locais e nacionais foram consideradas, buscando criar cenários realísticos, como a Resolução CNPE nº 16 (ANP, 2018) e o Edital de Concurso Público Nº 01/2015 (PMPA, 2015). Foge ao escopo desta pesquisa propor mudanças que não estejam previstas pelo poder público em curto prazo, seja por razões culturais ou financeiras.

Ainda, vale ressaltar que não foi considerada a possível necessidade de aumento do número de veículos em função de demanda inesperada. Tal decisão levou em consideração a complexidade da análise somada a tal projeção e a falta de dados no momento da execução deste trabalho, mantendo, por conseguinte o número de veículos do lote constante.

Tendo em vista os impactos da etapa de uso dos ônibus, o escopo é limitado do berço ao túmulo, e os limites do sistema são definidos com foco principal na fase de produção e operação do veículo, considerando a substituição dos ônibus e fonte energética.

Também foi assumido que independente da fonte energética de operação, os veículos são construídos utilizando a mesma estrutura externa, acessórios internos e demais componentes, considerando improvável que essas diferenças alterassem significativamente os resultados do estudo de ACV (COONEY; HAWKINS; MARRIOTT, 2013). Conseqüentemente, dados de produção não foram coletados *in loco*, e sendo o inventário apoiado em base de dados *background* e literatura. A etapa de infraestrutura, bem como o fim da vida útil dos veículos foram desconsideradas, conforme especificado por CHESTER et al. (2013b), uma vez que a ausência de dados coletados localmente pode aumentar as incertezas de resultados (DA SILVA; SOBRINHO; DE SOUZA, 2018).

Ainda, vale ressaltar que o descarte de baterias também foi desconsiderado devido a suas incertezas. Todavia, é importante enfatizar que o descarte pode levar a cargas ambientais significativas, mas ainda há muito poucos estudos sobre os impactos correspondentes (ZHAO; YOU, 2019). Embora veículos elétricos e híbridos tenham emissões locais muito baixas, a produção de eletricidade para carregamento de bateria é bastante intensiva e possui emissões associadas, assim como a produção e descarte do equipamento (LOMBARDI et al., 2017).

Outro aspecto limitante foi a utilização de dados prognósticos da matriz elétrica elaborados no ano de 2018. Tal escolha se deve ao fato que, no momento da elaboração da pesquisa, não foram encontrados valores até 2050 de outra fonte na literatura. Todavia, é indispensável salientar que os dados do Centro Clima (2018) apresentam variações desatualizadas, já que diferentemente da previsão apresentada, em 2021 é perceptível que houve um aumento mais significativo do que o mapeado em relação a fontes de energia renovável, sendo responsáveis por mais de 84% na matriz elétrica brasileira (MME, 2022).

Análise de incerteza para avaliar mais variabilidades temporais e territoriais, especialmente considerando a precificação da energia e sua disponibilidade tampouco foram consideradas. Todavia destaca-se a possibilidade de estudo da

temática com Avaliação do Custo do Ciclo Vida (CCV) e ACV consequential referente as evoluções da matriz e frota de veículos.

Por fim, como a dissertação está baseada em um estudo de caso, a efetividade do método se limita à temática escolhida e às características específicas atreladas a ela. O uso de SIG está diretamente relacionado às fases de coleta de dados de inventário e interpretação dos resultados. Porém, para futuros trabalhos, sugere-se que se aplique o mesmo método para a adaptação das informações para diferentes sistemas de transporte, territórios e tipos de veículo e as demais fases da ACV, visto que serão demonstradas formas de aplicação do artefato.

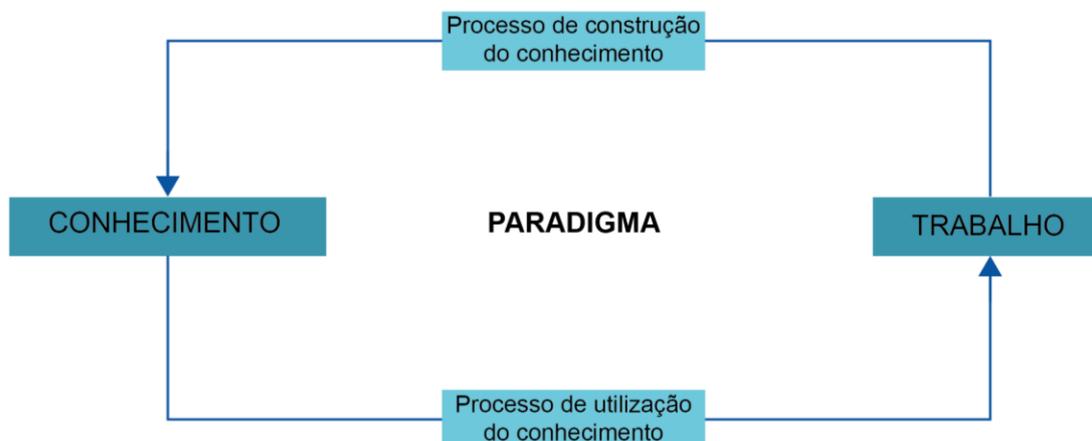
Sendo assim, apesar da importância destes temas, optou-se por não os focar para não expandir demasiadamente o tema desta dissertação. E propõe-se, para futuras pesquisas, a inserção destes no contexto SIG de fluxo de trabalho, com a inserção da técnica de avaliação do ciclo de vida em metabolismos urbanos.

1.4 DELINEAMENTO

Para o projeto de pesquisa em questão, após análise dos objetivos a serem alcançados, estabeleceu-se que o modo de produção de conhecimento mais apropriado é a abordagem *Design Science Research*. Essa abordagem possui relação direta com os objetivos estabelecidos, visando realizar uma pesquisa prescritiva e propor um artefato que solucione problemas do mundo real e contribua com o avanço teórico (LUKKA, 2003).

VAISHNAVI (2007) salienta que o *Design Science Research* é também denominado pesquisa de melhoramento, considerando sua natureza voltada à resolução de problemas. O conhecimento é gerado e acumulado por meio da ação, fazer algo e julgar os resultados é o modelo geral. O processo é representado por um ciclo em que o conhecimento é utilizado para criar um produto, e esse resultado avaliado para construir conhecimento (OWEN, 1998). A Figura 1 ilustra essa especificidade.

Figura 1 - Modelo de construção e utilização de conhecimento



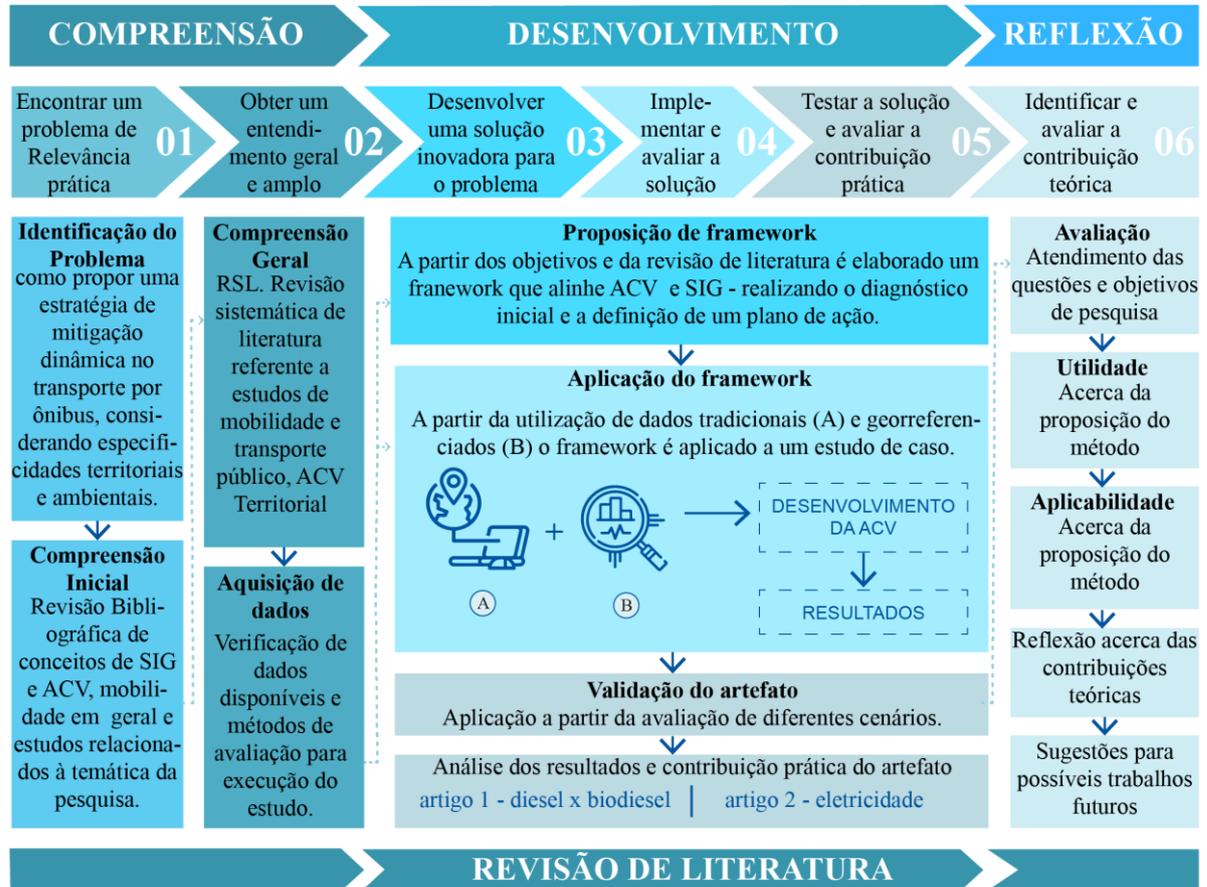
Fonte: adaptado de (VAISHNAVI, 2007).

Para a elaboração da presente pesquisa, se utilizou como estudo de caso o transporte público urbano de Porto Alegre. Foram quantificados os impactos do serviço por ônibus seguindo uma ACV territorial. Os resultados dessa avaliação são utilizados como teste de efetividade do artefato criado nesta dissertação.

O delineamento deste estudo é apresentado na Figura 2. Todavia, se salienta a importância de visualizá-lo de forma cíclica, visto que as fases interagem entre si e o artefato final da pesquisa é passível a evoluções e entendimentos constantes provenientes das etapas a ele circundantes.

Nesse contexto, o estudo é delimitado por três fases principais: compreensão, desenvolvimento e reflexão, sendo que a revisão de literatura permeia todo o processo, buscando obter um entendimento geral e amplo a partir de estudos relacionados. Segundo LUKKA (2003), uma pesquisa pode ser mais bem caracterizada quando observado um processo que compreende as seguintes etapas: (1) encontrar um problema de relevância prática e teórica; (2) obter um entendimento geral e amplo; (3) desenvolver uma solução inovadora para o problema; (4) implementar e avaliar a solução; (5) testar a solução e avaliar a sua contribuição prática; e (6) identificar e avaliar a contribuição teórica. Tais etapas foram consideradas para a formulação do delineamento desta pesquisa.

Figura 2 - Delineamento da pesquisa



Fonte: Autor (2022)

A fase de compreensão inicia com a identificação do problema, e aqui se apresenta resumido em de que forma avaliar uma transição de fontes energéticas no transporte, tendo em vista cenários de mitigação de uma frota de veículos. Com base em referências atualizadas e de alta relevância da área, também acontece a compreensão inicial da temática com entendimento de conceitos de ACV e mobilidade, normas e legislações aplicáveis ao contexto local e do processo de tomada de decisão. Nessa fase ainda ocorre a compreensão inicial através da revisão de estudos de ACV Territorial, verificando estratégias já reconhecidas na literatura.

A segunda fase do delineamento é o desenvolvimento e compõe a análise de dados e parâmetros que devem ser considerados para a elaboração do método proposto. No caso desse estudo, estão incluídas a verificação das avaliações de impacto mais utilizadas, qualidade dos dados e as variáveis que interferem e

contribuem para com a temática. Tudo isso ocorre concomitantemente a uma ampla coleta de dados.

A partir das informações coletadas, é possível moldar o artefato, buscando desenvolver a avaliação de impactos ambientais do ciclo de vida visando apoiar a tomada de decisão em escala urbana. O framework é executado a partir da integração de informação territorial e tradicional visando o desenvolvimento da ACV, composta pelas quatro fases descritas no Capítulo 3. Ainda, no desenvolvimento ocorre a validação do artefato por meio da aplicação de um estudo de caso.

A terceira fase é a reflexão, onde são verificados se os objetivos e questões de pesquisa formulados foram atendidos. Também ocorre a análise da utilidade acerca da proposição do método, verificando os benefícios que ele traz e as dificuldades de aplicação. Por fim, há a verificação da aplicabilidade do artefato proposto, tentando entender em especial as suas limitações.

Superada esta etapa, o método é finalizado e deve ser conduzida uma avaliação sobre as suas contribuições teóricas, ao encontro do conceito de DSR. Por fim, na etapa de reflexão final, é apresentada a síntese dos resultados obtidos no estudo e possíveis contribuições para trabalhos futuros.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O texto está dividido em cinco capítulos, apresentados abaixo.

O Capítulo 1 tem o objetivo de identificar e contextualizar a temática, assim como justificar a escolha da mesma. A abordagem do problema de pesquisa se desdobra na apresentação de objetivos, delineamento e delimitações. Por fim, apresenta-se a estrutura empregada para atingir os objetivos propostos.

O Capítulo 2 apresenta os dados coletados na revisão bibliográfica para compreensão do problema e aproximação ao tema. São abordados os conceitos relativos à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e transporte, seu processo de abordagem, as vantagens e barreiras existentes para sua implementação, além dos estudos mais recorrentes na área. Nos tópicos subsequentes, investiga-se conceitos relacionados a Sistemas de Informação Geográfica (SIG) e sua aplicação na ACV Territorial. Ademais, é executada uma breve discussão a respeito dos achados.

O Capítulo 3 aborda a proposta metodológica desta pesquisa, as fases para o seu desenvolvimento e a descrição das ferramentas empregadas neste estudo, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) e o Sistema de Informações Geográficas (SIG). A escolha do estudo de caso é justificada e o contexto da cidade é exibido. Na sequência são apresentadas e desenvolvidas as etapas do ciclo de vida do estudo de caso.

A partir de tais delimitações, são expostos os resultados no Capítulo 4 considerando (1) matriz energética, (2) cenários propostos, (3) análise espacial. No primeiro uma discussão ampla acerca da fase de operação e das variáveis atreladas a ela é elaborada. Subsequentemente, três cenários são definidos e discutidos em detalhe, verificando a evolução da frota ao longo de 30 anos. A terceira parte do capítulo é composta por uma análise espacial e executada, considerando mudanças em um dos cenários propostos.

Por último, o Capítulo 5 expressa as conclusões obtidas e as sugestões de trabalhos futuros.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo revisa estudos relevantes aos dois principais tópicos que esta pesquisa visa contribuir. A seção 2.1 analisa publicações onde a avaliação de ciclo de vida (ACV) é aplicada à mobilidade, incluindo uma visão geral da abordagem de modelagem e suas principais aplicações, com foco na avaliação de caminhos de evolução na aplicação de ACV em sistema de transporte e identificação de lacunas de pesquisa. Por outro lado, a Seção 2.2 analisa a aplicação da ACV aos sistemas urbanos conjuntamente a utilização de ferramentas de geolocalização, na abordagem territorial.

2.1 ACV APLICADA A SISTEMAS DE TRANSPORTE

O setor de transportes tem papel fundamental no desenvolvimento do território, estando intrinsecamente ligado ao crescimento econômico e à estabilidade social de uma nação. Apesar da pandemia do COVID-19, seu tamanho de mercado global foi estimado em US\$ 6,2 trilhões no ano de 2020, com previsão de chegar a US\$ 7,8 trilhões até 2027 (GTSI, 2021).

O setor também possui influência considerável no alcance dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), contribuindo diretamente para cinco metas e influenciando o alcance de outras sete (SLOCAT, 2015). No entanto, é também no transporte onde se encontra um desafio crucial, já que o setor representa mais de um quarto das emissões globais de GEE.

Após o forte crescimento urbano da América Latina, o transporte na região contribui com aproximadamente 35% das emissões de GEE relacionados à combustão - muito mais do que a média global de 22% (TOLEDO, et al., 2018; WORLD BANK, 2021). Ademais, TOLEDO et al. (2018) destacam que o setor possui a maior taxa de crescimento de emissão entre todos os setores da economia atrelada a significativas dificuldades na implementação de políticas de redução de poluentes no campo.

De acordo com o WRI Brasil (2019), 72% das emissões do setor no país são provenientes de veículos rodoviários de passageiros - carros e ônibus - que contribuem com 45,1% das viagens rodoviárias (OWID, 2020). Nas áreas urbanas,

tais viagens são muitas vezes a principal fonte de poluição do ar (FESTY, 1997), não restrita a GEE. Por exemplo, na região de Paris (França), o transporte rodoviário foi a principal fonte de CO, NOx e PM10 em 2000, com 76,9% das emissões de CO, 52,2% das emissões de NOx e 36,2% das emissões de material particulado (PM10) (PÉNARD-MORAND; ANNESI-MAESANO, 2004).

Considerando este contexto desfavorável, tecnologias alternativas de veículos como o hidrogênio (WULF; ZAPP, 2020) e eletricidade (KUBAŃSKI, 2020) são caminhos viáveis na redução do consumo de recursos fósseis e impactos ambientais do setor.

Entretanto, antes de decidir sobre as opções de melhoria, estudos aprofundados avaliando o sistema em sua totalidade e considerando diferentes cenários de redução de impacto devem ser executados. Nesse contexto, a avaliação do ciclo de vida (ACV) é geralmente utilizada (MORO; HELMERS, 2017). Na verdade, esta técnica já provou apoiar com sucesso a tomada de decisão no contexto urbano, especialmente considerando que a ACV é cada vez mais aplicada para análise de impacto associada a sistemas de transporte (CHESTER et al., 2013b).

HAWKINS et al. (2012) destacam as vantagens de tal abordagem, em especial, ao analisar tecnologias alternativas. Tal metodologia, evita, por exemplo, que tecnologias sem emissões de escapamento, como os veículos elétricos (VE), sejam generalizadas como não impactantes. Nesse sentido, surge a necessidade de uma análise de sensibilidade na avaliação da benignidade ambiental de diferentes matrizes de eletricidade, já que uma geração de energia baseada em fósseis, pode muitas vezes ter impactos mais altos que veículos convencionais (VC) (NORDELÖF et al., 2013). Além disso, excluir a produção de veículos e o fim da vida útil da avaliação ignora importantes fontes de impactos (NORDELÖF et al., 2013).

Os processos relacionados ao transporte não são isolados, a produção de veículos, uso e fim de vida afetam o desempenho do sistema como um todo e desta forma recomenda-se avaliar os processos em sua totalidade. Por conseguinte, a técnica ACV vem sendo amplamente usada para subsidiar a formulação de políticas públicas, comparando tecnologias de veículos motorizados de transporte (GARCÍA

SÁNCHEZ et al., 2013), fontes de energia (NANAKI; KORONEOS, 2012) e planejamento ou gestão de infraestrutura de transporte (SAXE; KASRAIAN, 2020).

Todavia, o aumento de publicações de ACV relacionados ao transporte impulsiona vários questionamentos a respeito das escolhas de modelagem mais adequadas em tal temática, como: definição de base de dados, limites do sistema, unidade funcional, métodos e categorias de impacto. A falta de um consenso prático frente a tantas variáveis que afetam os resultados dificulta a replicabilidade e comparação dos mesmos, além de representar empecilhos na utilização da ferramenta em processos de tomada de decisão no setor de transporte. Frente a tantas incógnitas, uma discussão aprofundada e uma visão geral crítica da ACV em sistemas de transporte é necessária, abordando os desafios mencionados acima.

Este capítulo visa realizar uma revisão crítica de literatura recente de abordagens de ACV no transporte, fornecendo: (1) uma visão geral dos temas abordados; (2) resultados frente a escolhas metodológicas.

2.1.1 Revisão sistemática de literatura

Focada na criação de uma contribuição significativa para os principais tópicos da presente pesquisa e buscando caracterizar de forma mais clara o problema de pesquisa estudado, é conduzida uma revisão sistemática sobre a aplicação da ferramenta de ACV no transporte.

A base de dados utilizada para identificar esses estudos foi a Scopus por ser reconhecidamente um dos principais sistemas de indexação de artigos, em função de sua abrangência em vastos campos acadêmicos e da qualidade dos artigos revisados em pares. As palavras-chave e os operadores booleanos utilizados foram em inglês, e selecionados com intuito de não restringir tanto a busca e obter resultados com clareza de enfoque.

Entre os critérios de análise foram selecionados: a limitação temporal de 2010 a 2021, disponibilidade em acesso aberto e consideração apenas de periódicos. Tal decisão foi tomada levando em conta o número considerável de artigos oriundos da configuração. Além disso, salienta-se que para a gestão dos dados e resultados foi utilizado o software de gestão bibliográfica Mendeley versão 1.19.8, buscando organizar as informações de forma sistemática.

A definição das equações de pesquisa, expressões a serem pesquisadas nas bases dados, foi feita pela sua correlação direta com os objetivos e questões de pesquisa do presente estudo. As palavras-chave e operadores booleanos selecionados constam abaixo:

"mobility" OR "transport" OR "transit" AND "lca" OR "life cycle assessment" OR "life cycle analysis" OR "lca" AND "urban" OR "territor*" OR "region" OR "city" OR "district" OR "neighborhood" OR "block" OR "area"*

O processo de busca foi realizado na data de 10/04/2021, e a plataforma retornou 375 resultados. Como critério de análise preliminar, foram verificados os títulos e palavras-chave. Em momentos em que houvesse dúvida sobre a relevância do estudo junto à temática da presente pesquisa, o próximo passo seria proceder para leitura do resumo.

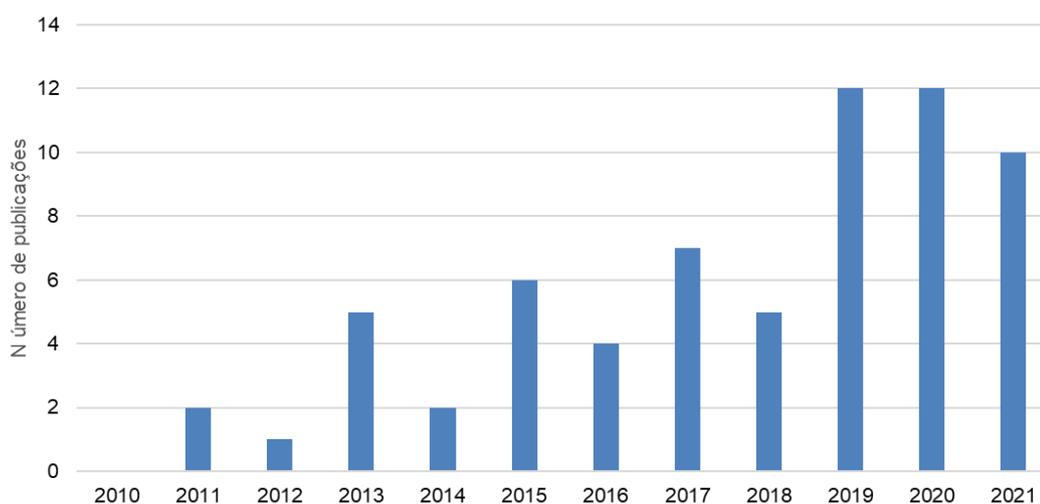
Foram também identificados uma série de temas abordados, nessa lógica, com o intuito organizacional os mesmos foram classificados por tópicos de pesquisa como: aéreo, cicloviário, energia (fonte energética, como combustíveis), ferroviário, infraestrutura, marítimo e rodoviário. Entretanto alguns artigos analisaram os serviços de mobilidade e a infraestrutura de forma conjunta, avaliando vários tópicos em simultâneo (CHESTER et al., 2013). Como critério de exclusão, visando alinhamento com objetivo de pesquisa foi considerado que apenas artigos que discutissem transporte terrestre em seu texto seriam examinados.

É destacável também que foram excluídos da configuração estudos que referenciavam apenas a análise de fabricação de uma peça veicular ou tivessem como local de investigação zonas rurais, considerando o escopo da presente pesquisa na avaliação do ciclo de vida em uma área urbana. Além disso, durante a busca, artigos com abordagem metodológica, com ênfase em transporte público sustentável e processamento de dados foram suscetíveis a predileção, dando-se preferência às publicações que contemplassem a fase de uso. Após esta etapa, foram selecionados 58 artigos analisados nos tópicos subsequentes. Uma vez selecionados, os artigos científicos ainda foram submetidos à técnica *"bola de neve"* para a otimização e recuperação de estudos relevantes que não foram previamente identificados. Ao final, 8 artigos de relevância foram adicionados à compilação.

2.1.2 Frequência e cobertura temática das publicações

Conforme ilustrado na Figura 3, ocorre um aumento de publicações, considerando avaliação do ciclo de vida e transporte, especialmente entre 2019 e 2021, onde 34 trabalhos dentro do referido tema foram publicados. A elevação de interesse pelo campo de pesquisa pode ser correlacionada com estratégias sustentáveis e acordos em nível global propostos nos últimos anos, como o Acordo de Paris, que promete a redução de emissões de CO₂ até 2050, e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável. Os achados são convergentes a apontamentos de ZHAO et al. (2020) que identificam uma tendência no aumento de publicações visando a sustentabilidade no transporte e prevê que esse crescimento continue nos próximos anos.

Figura 3 - Número de publicações relacionadas a ACV e mobilidade por ano



Fonte: Autor.

Na Figura 4 é apresentada uma análise quanto a natureza e local de publicação dos artigos, ou seja, plataforma ou revista. Como já discutido, todos os artigos analisados foram publicados em revistas. Dentre elas, é perceptível que a revista *Sustainability* foi a mais escolhida pelos autores, totalizando doze estudos. Ela é seguida pela revista *Journal of Cleaner Production* com sete artigos e *Applied Energy* com cinco. Como esperado, a maioria das publicações escolhidas pelos autores tem relação direta com a temática de sustentabilidade, transporte, energia e políticas públicas. A predileção por estudos de caso a respeito de temáticas específicas relacionadas ao impacto ambiental no

transporte também permitiu que uma variedade de publicações com enfoques diferentes fosse selecionada pelos autores.

A respeito dos modais mais recorrentes nos estudos analisados, é possível visualizar tendências nesse sentido, uma clara predileção por publicações com abordagem no tema de eletrificação de transporte público seja focando na bateria como ACCARDO et al. (2021) ou mesmo em políticas públicas (DE BORTOLI; CHRISTOFOROU, 2020), ou a própria eletrificação da frota de ônibus e avaliação de custos conforme estudo de na Suécia (BORÉN, 2020).

Destaca-se que dos 58 estudos, 32 citam ou avaliam tecnologias elétricas, número superior aos 27 que estimam impactos de combustíveis fósseis e 13 com biocombustíveis. Todavia, deve-se salientar que a produção de biocombustíveis e a adição do mesmo como fonte energética na fase de uso dos veículos também é item habitual (DRESEN; JANDEWERTH, 2012; GASOL et al., 2011).

Figura 5. No diagrama é observável que avaliações de veículos de passageiros são as mais corriqueiras, ao todo são 34 publicações. ZHENG et al. (2020) avaliam a implantação de veículos elétricos na China através de um limite poço-a-roda (em inglês *well-to-wheels – WTW*) que considera a extração do combustível (poço) e sua operação (roda). Em contrapartida LANG et al. (2013) estudam os impactos energéticos e ambientais de veículos híbridos durante 2010–2020.

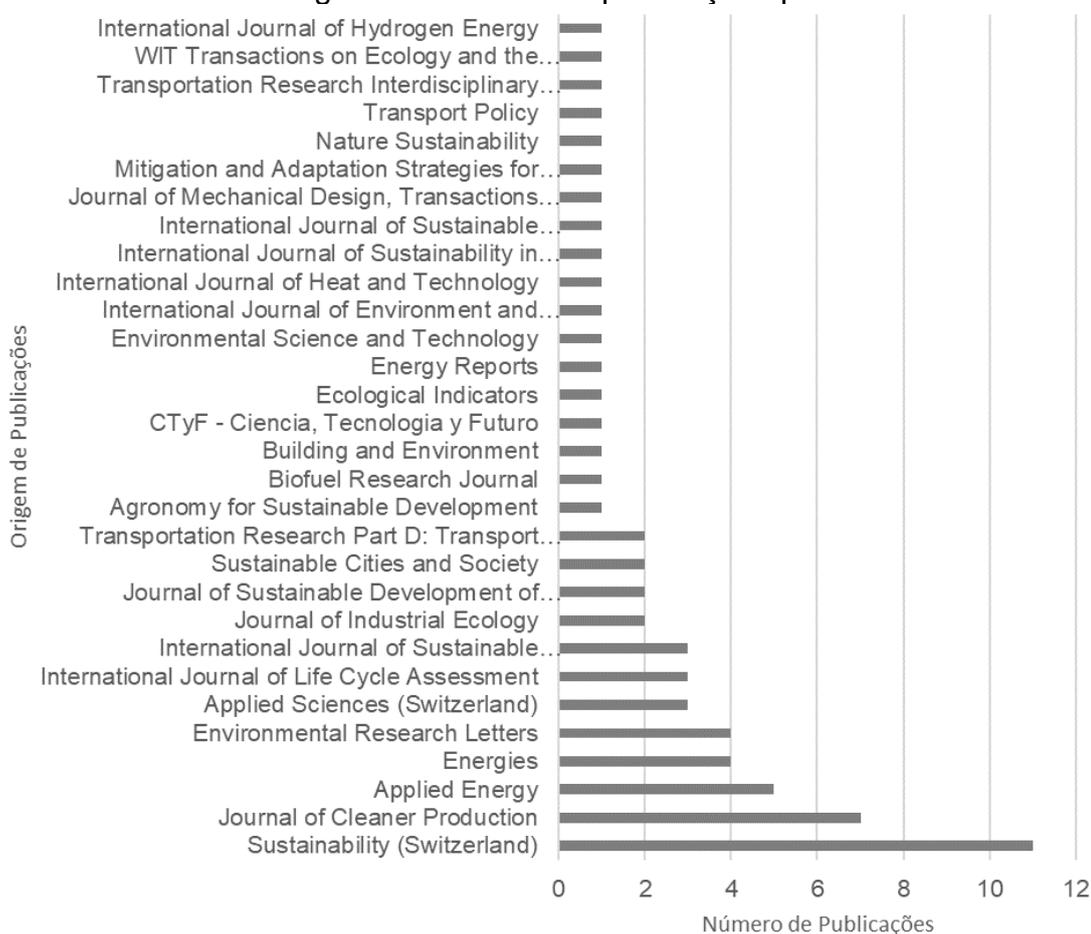
Além disso, SYRÉ; HEINING; GÖHLICH (2020) buscam demonstrar as influências de diferentes tecnologias e estratégias para sistemas de transporte em várias categorias de impacto, apresentando uma proposta metodológica combinada de simulações de rotas e ACV. Na Bélgica três artigos da seleção executam estudos de caso sobre a introdução de novas tecnologias, MESSAGIE et al. (2013) avaliam carros a gasolina, diesel, híbridos e elétricos; HOOFTMAN et al. (2016) estudam a contribuição de veículos elétricos para a melhoria da qualidade do ar no país, já em 2018 o autor aumenta o escopo da análise agora avaliando veículos convencionais, híbridos e elétricos e seus impactos em relação a saúde humana e mudanças climáticas.

Quatro artigos abordam a ACV focando na redução de impactos por meio do estímulo à mobilidade ativa em especial o uso de bicicletas. Entre eles, BONILLA et al.

(2020) analisam como melhorias nos sistemas de compartilhamento de bicicletas pode ser uma estratégia coerente para redução do uso de veículos privados. Dois estudos avaliam modais de transporte de carga, com realce para ACCARDO et al. (2021) que avaliam a inserção de três diferentes baterias na fase de uso de caminhões, verificando também alternativas para a fase de reciclagem. Outros autores comparam a interação entre diferentes modais, como NEMATCHOUA et al. (2019), que aplicam ACV na escala de vizinhança e verifica diferentes modos de transporte (ônibus, carro, motocicleta).

Ainda, destaca-se o número significativo de artigos com enfoque em meios de transporte coletivos, 31, sendo dez avaliando transporte sobre trilhos. SAXE; KASRAIAN, (2020) avaliam uma linha no Reino Unido e DEL PERO et al. (2015) estuda uma rota de trem no sul da Itália. Todavia é no transporte coletivo de ônibus onde se encontram a maioria das publicações na área. Um estudo na Suécia trata da avaliação do ciclo de vida de transporte público por ônibus com ênfase na eletrificação da frota, essa abordagem se repete com o trabalho de COONEY; HAWKINS; MARRIOTT (2013) nos Estados Unidos.

Figura 4 - Número de publicações por revista

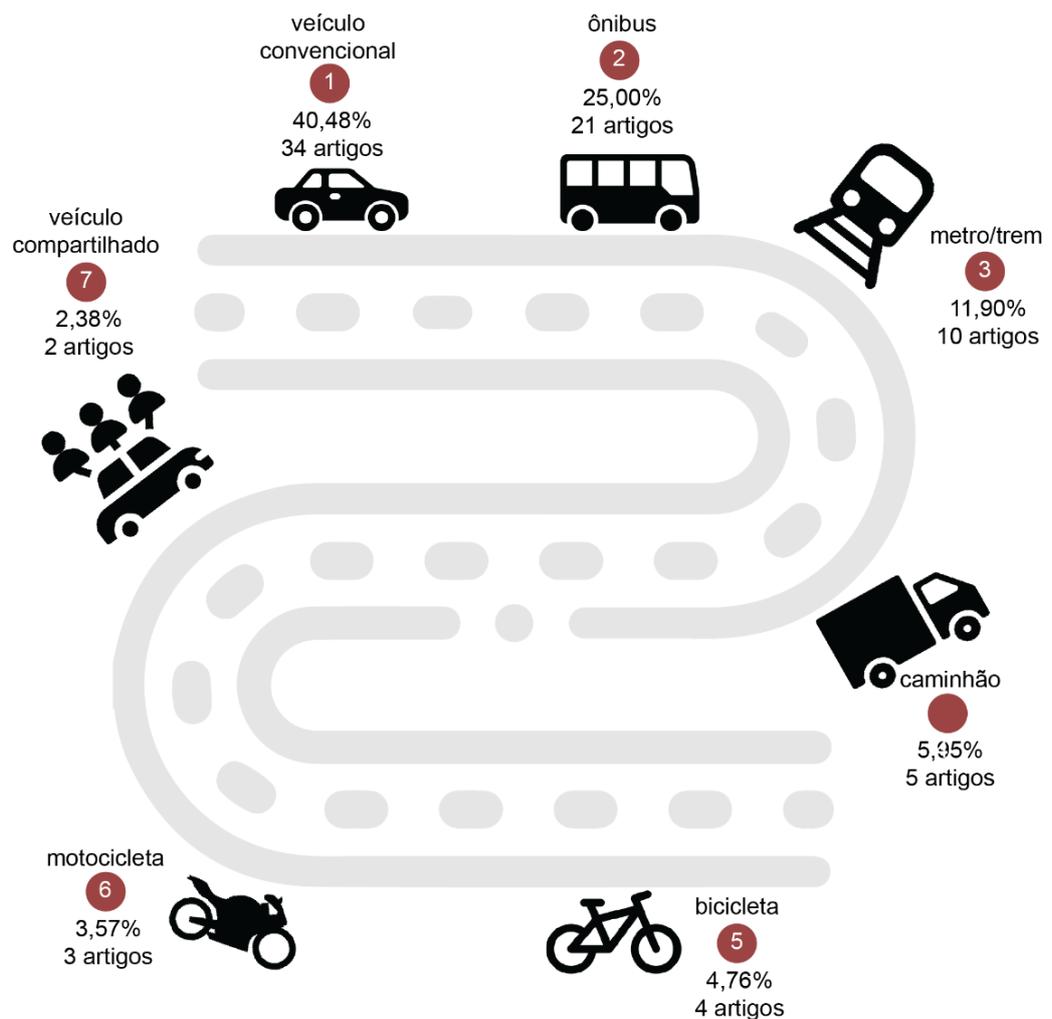


Fonte: Autor.

Nesse sentido, uma clara predileção por publicações com abordagem no tema de eletrificação de transporte público seja focando na bateria como ACCARDO et al. (2021) ou mesmo em políticas públicas (DE BORTOLI; CHRISTOFOROU, 2020), ou a própria eletrificação da frota de ônibus e avaliação de custos conforme estudo de na Suécia (BORÉN, 2020).

Destaca-se que dos 58 estudos, 32 citam ou avaliam tecnologias elétricas, número superior aos 27 que estimam impactos de combustíveis fósseis e 13 com biocombustíveis. Todavia, deve-se salientar que a produção de biocombustíveis e a adição do mesmo como fonte energética na fase de uso dos veículos também é item habitual (DRESEN; JANDEWERTH, 2012; GASOL et al., 2011).

Figura 5 - Número de publicações divididas em modais de transporte



Fonte: Autor.

Por fim, se destaca a recorrência de estudos com a abordagem *WTW*, e a fase de uso com prevalência desconsiderando a produção e o fim de vida de veículos. Ademais, a predominância de avaliações do tipo “estudo de caso” deve ser destacada com mais da metade dos estudos com esse objetivo central. Artigos de revisão e proposições metodológicas foram os menos comuns.

2.1.2.1 Análise de conteúdo

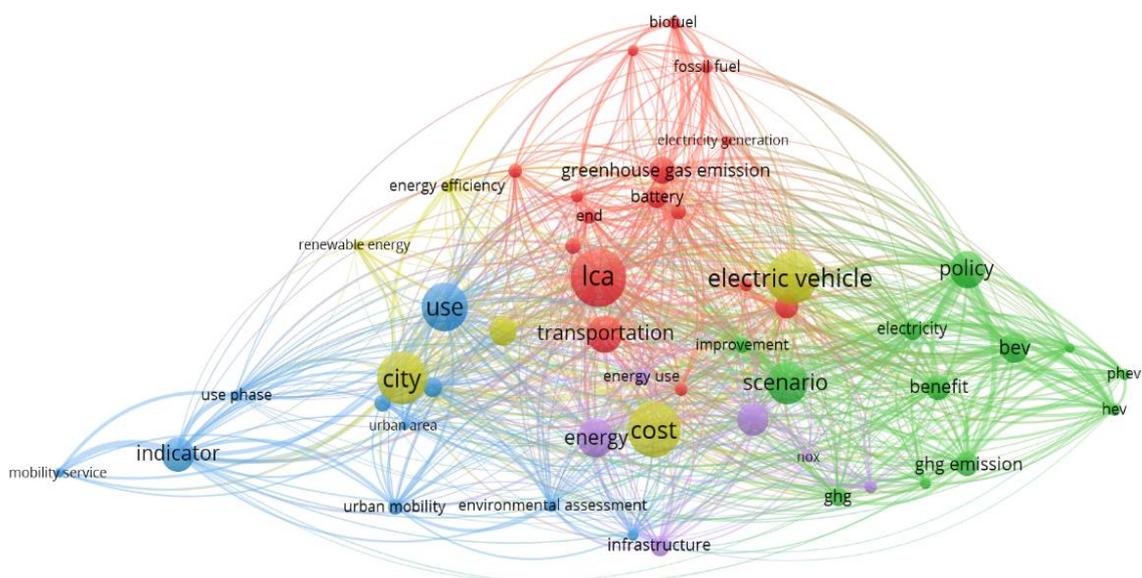
Procurando obter uma verificação mais significativa a respeito do conteúdo das publicações, uma análise de palavras-chave foi executada por meio do software *VOS Viewer*, os resultados são ilustrados na Figura 6. Palavras semanticamente semelhantes, por exemplo, “*life cycle analysis-life cycle assessment-life cycle*”, “*greenhouse gas-greenhouse gas*”, “*electric vehicle- electrical vehicle*”, “*urban transport- urban transportation-transport*” foram mescladas, na tentativa de aumentar a clareza dos mapas conceituais.

Os termos (pontos) identificados foram então reunidos ao redor das palavras de maior recorrência, seu conteúdo fortemente ligado com o aglomerado (cor) em que se insere. Os aglomerados foram criados com base em quatro temas predominantes: “*life cycle analysis (LCA)*”, “*enviromental impact*”, “*urban transport*” e “*greenhouse gas*”. As palavras com maior repetição foram: “*life cycle assessment*” (58), “*greenhouse gas*” (35), “*enviromental impact*” (21), “*transport*” (27). Na verificação da força entre os links os que apresentaram maior ligação entre si foram: “*life cycle analysis*” conectada a “*electric vehicles*” e “*greenhouse gas*” seguido por “*enviromental impact*”, ligado a “*transport*” e “*sustainability*”.

De forma geral, todos os autores discutem os impactos ambientais no escopo de uma ACV, levando em consideração algum produto ou serviço conectado à mobilidade. Um exemplo claro pode ser visto em ALBERS et al. (2019), onde os autores comparam fontes energéticas e avaliam cenários com políticas públicas favoráveis à introdução de biocombustíveis ao sistema. Outro tema dominante é o dos transportes com foco na produção e fase de uso de veículos, onde se destacam termos como de “*energy*”, “*emissions*” e “*electric vehicles*”, representando a produção e utilização de veículos e recursos como agente primário dos processos de transporte, seja no nível de produção de veículos inovadores (híbridos, elétricos), seja por meio

de emissões, com os principais conceitos, como “GHG”, “greenhouse gas”, “emission”, “CO₂” mostrando uma correlação direta com a energia utilizada e GEE. Observou-se que 67,24% dos artigos mencionam gases de efeito estufa em seu título ou resumos pelo menos uma vez. Outro termo bastante citado foi o “emission”, fortemente relacionado a “CO₂ emissions” e “climate change”, “global warming”, “impact category”. A principal razão, possivelmente, é um forte foco dos autores na categoria de impacto de Potencial de Aquecimento. Global

.Figura 7 - Mapa conceitual, revelando quatro temas título e resumo



Fonte: Autor.

Por fim, destaca-se a temática de “city”, “urban area” “region” e sua conexão a diversos termos em especial a “strategy”, “cost”, “policy” e “scenario”. Essa característica de diversos artigos aponta uma conexão direta de pesquisas de ACV com a tomada de decisão no âmbito de políticas públicas. CHOI et al. (2020) por exemplo, avaliam como diferentes políticas no setor energético afetariam o transporte com a possível eletrificação da frota.

2.1.3 Concentração Geográfica

A Figura 8 apresenta a intensidade geográfica dos artigos selecionados. Os estudos no continente Europeu são maioria, totalizando 63,63% das publicações analisadas, com destaque para Alemanha, com 8 publicações, 12,12% do total.

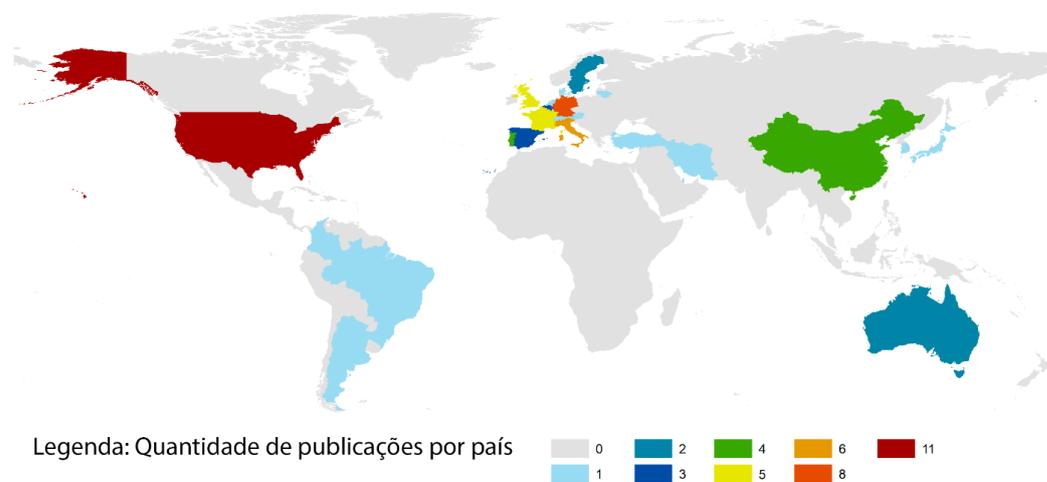
Os mesmos são seguidos pelos norte-americanos e asiáticos, com 16,66% e 12,12% respectivamente. No entanto se destaca que os estudos norte-americanos são compostos exclusivamente por publicações dos Estados Unidos. A figura também mostra a inexistência de estudos no território africano e poucas publicações na Oceania e América do Sul, com apenas duas e três respectivamente.

Como esperado, pela concentração geográfica e a predileção por estudos de caso, muitos artigos têm foco em cidades e regiões europeias e americanas. No entanto, as avaliações dessa natureza não se restringem a cidades e tem abordagem ampla em diferentes escalas: continental, país, região, áreas metropolitanas, cidades ou bairros.

CHESTER; HORVATH (2012) focam sua avaliação na área metropolitana de Los Angeles, seguido por trabalhos posteriores de CHESTER et al. (2013) e NAHLIK et al. (2014) na metrópole californiana, abordando linhas de ônibus e veículo sob trilhos (VLT). BILGILI et al. (2019) estudam a região de uma linha de trem e tendências de circulação entre duas cidades na península da Anatólia (Ásia Menor). FRANÇOIS et al. (2017) avaliam o ciclo de vida completo de diferentes tecnologias veiculares em Lyon (França). Mola et al. (2020) observam o comportamento de usuários de transporte público da França e Finlândia, suas preferências e possíveis relações com impactos ambientais. Por outro lado, bairros e zonas de menor dimensão também foram avaliados, buscando a obtenção de uma mobilidade mais limpa e sustentável (NEMATCHOUA, 2020; WANG et al., 2021).

Dentre os estudos na América Latina, CHOMA et al. (2017) buscam identificar os impactos ambientais de veículos elétricos leves a bateria na frota brasileira. CUELLAR et al. (2016) executam um estudo de caso avaliando ônibus a diesel e biodiesel em Bogotá e comparando com outros modais de transporte. Por outro lado, IANUZZI et al. (2021) focam em um comparativo tecnológico entre ônibus com motor de combustão e alternativas com foco em ônibus com um motor elétrico movido a hidrogênio.

Figura 8 - Número de publicações por região



Fonte: Autor.

2.1.4 Visão geral dos Resultados da Ferramenta ACV

Esta seção representa os resultados obtidos pela revisão sistemática de artigos selecionados por meio da plataforma de busca Scopus, enfatizando sua conformidade com as normas NBR 14040 e NBR 14044 (ABNT, 2009).

2.1.4.1 Definição de objetivo em artigos revisados

Em vários conjuntos de diretrizes de ACV, incluindo as normativas ISO e o texto contido no guia “Diretrizes para Avaliação do Ciclo de Vida: Um Código de Prática” (SETAC, 1994), há um reconhecimento geral da importância nas escolhas feitas em relação ao objetivo e escopo do estudo. Os mesmos devem ser consistentes com a aplicação pretendida e precisam ser claramente definidos para facilitar as fases subsequentes (ABNT, 2009). No objetivo deve-se declarar a aplicação pretendida, as razões para conduzir o estudo e o público-alvo a quem se pretende comunicar os resultados do estudo. Já na definição de escopo são estabelecidos os principais procedimentos característicos do estudo de ACV, em uma descrição temporal, geográfica e tecnológica, além do tipo de análise e do nível de sofisticação do estudo (GUINÉE et al., 2001).

Os artigos científicos da presente pesquisa cobriram vários meios de transporte terrestre, conseqüentemente, uma variedade de objetivos diferentes e

escopos foram identificados, bem como semelhanças foram percebidas. Por exemplo, 55,17% dos estudos lidos tiveram objetivos principais semelhantes, que estavam comparando diferentes produtos ou processos e seus impactos ambientais associados. Em contrapartida, WANG et al. (2021) comparam dois modais: transporte público e bicicletas compartilhadas, e os impactos ambientais relacionados a eles. Por outro ângulo, TONG; AZEVEDO (2020) contrastam o desempenho de combustíveis diversos e tecnologias veiculares nos Estados Unidos, usando um método de modelagem ligando ACV e qualidade do ar.

Análise adicional das metas de ACV nos artigos selecionados revela que 72,72% das publicações explicam sucintamente a razão da execução da ACV e compreendem os requisitos sugeridos pelas normas NBR 14040 e 14044 (ISO, 2009). NORDELÖF et al. (2019) afirmam que o objetivo do estudo foi explorar os impactos ambientais do ciclo de vida dos ônibus urbanos, dependendo de variabilidade de escolhas de tipologia de veículos e fonte energética, sendo o principal público-alvo composto por agências e empresas de transporte público local e regional. CHESTER et al. (2013) focam a pesquisa na avaliação ambiental da dois trajetos de transporte público e viagens de automóvel concorrentes, visando que os resultados apoiassem organização de planejamento metropolitano. AL-THAWADI et al. (2019) também definem um objetivo claro de desenvolver modelos comparativos de avaliação do ciclo de vida para quantificar a produção de energia e as emissões de duas principais alternativas de transporte no Catar – automóveis e metrô – buscando oferecer novas informações para e possibilidades de políticas atualizadas de mitigação de emissões.

No entanto, é notável que 31,03% dos estudos afirmaram apenas a meta, que foi, em alguns casos, descrita de forma genérica ou superficial, a exemplo de: o objetivo era realizar uma ACV completa. Alguns autores nem ao menos citam a norma ISO. Ademais, a maioria estudos não define seu público-alvo nem especifica os motivos para a realização da ACV, apenas 30,30% dos artigos citam uma audiência específica. Resumindo, muitos dos trabalhos analisados definem metas de forma vaga, dificultando a leitura das publicações caso fosse verificado os pré-requisitos estabelecidos pelas normas ISO.

2.1.4.2 Definição de unidade funcional em artigos revisados

A NBR 14040 (ABNT, 2009) determina a unidade funcional (UF) como uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema de produto, fornecendo uma referência para a qual as entradas e saídas são relacionadas.

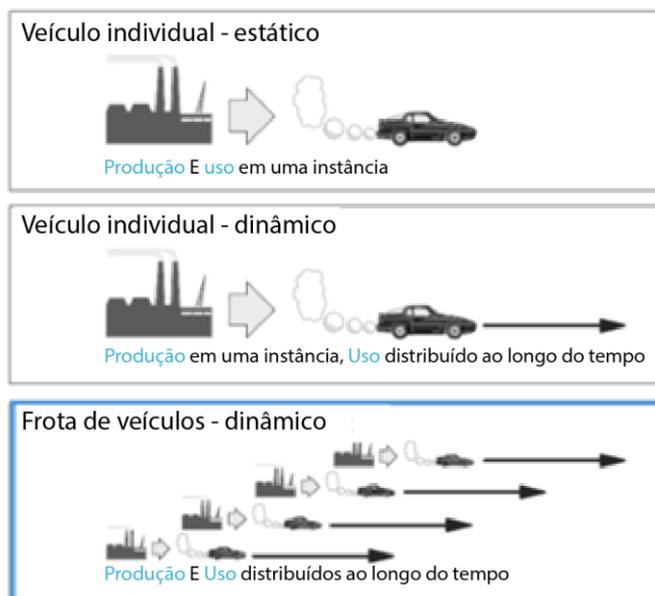
Considerando os estudos analisados, 78,79% citam ou definem a unidade funcional de forma clara e objetiva. Tal valor é bastante alto se considerarmos que alguns estudos são estritamente exploratórios. A UF mais recorrente considera as distâncias percorridas pelos veículos, geralmente descritas por quilômetros rodados (km). COONEY et al. (2013) descrevem a UF como km percorridos por um veículo ao longo de 12 anos de vida útil; CRUZ et al. (2017) definem como 100 km rodados; HOOFTMAN et al. (2016) definem como 1 km percorrido, enquanto NEMATCHOUA (2020) delimita a distância percorrida diariamente. Outras unidades funcionais percebidas foram: passageiro distância percorrida (CHESTER et al., 2013); unidade de massa distância (SHIAU; MICHALEK, 2010); kWh consumido por uma bateria (ACCARDO et al., 2021); litro consumido por quilômetro (OSORIO-TEJADA et al., 2018). Em contrapartida, LAUSSELET et al., (2021) definem que a função é “atender às necessidades de moradia, escola, jardim de infância e mobilidade dos 2.500 habitantes de Ydalir ao longo de 60 anos”.

Alternativamente, GARCIA et al. (2015) propõem uma abordagem baseada na frota, a qual leva em conta a “frota de produtos” (ou seja, o conjunto dinâmico de produtos em uso, incluindo os efeitos transitórios à medida que novos produtos substituem os que alcançam seu fim de vida). Ao invés de uma única UF, se introduz explicitamente a noção de tempo, integrando no modelo de ciclo de vida à dinâmica associada à substituição de produtos antigos por novos produtos na frota. CHOMA et al. (2017) similarmente investigam o potencial de eletrificação de veículos leves no contexto brasileiro a partir de uma abordagem de frota. A proposição utilizada pelos autores é exemplificada na Figura 9 a partir de metodologia proposta por FIELD; KIRCHAIN; CLARK (2000).

Por fim, é fundamental afirmar que apenas 2 estudos, excluindo os de revisão ou estritamente teóricos, não definiram UF, conforme exigido pelas normas.

Uma lista completa de unidades funcionais é representada no APÊNDICE A – Revisão sistemática

Figura 9 - Comparação entre abordagens ACV de produto e frota



Fonte: (GARCIA et al., 2015).

2.1.4.3 Fronteiras do sistema de artigos observados

Vários fatores determinam as fronteiras do sistema, inclusive a aplicação pretendida do estudo, suposições feitas, critérios de corte, restrições de dados, custo, e público-alvo pretendido (ABNT, 2009). KLÖPPFER et al. (2014) afirmam que a especificação das fronteiras do sistema é uma das etapas mais críticas da ACV e depende do problema investigado. Nesse sentido, os critérios usados no estabelecimento das fronteiras devem ser identificados e justificados no escopo do estudo.

Os processos de transporte analisados pelos estudos estão altamente ligados a fronteiras do sistema. Os artigos observados usaram várias fronteiras diferentes, o que afetou significativamente os resultados de cada um. Ao todo 18 artigos empregaram fronteiras do sistema do “berço-ao-túmulo”, como PATELLA et al. (2019) que consideram todas as etapas do ciclo de vida da aquisição de matéria-prima ao fim de vida de um veículo de porte médio. COONEY et al. (2013) exploram todo o ciclo de vida de ônibus elétricos, considerando 12 anos de uso. Fronteiras do sistema “não

tradicionais” também foram encontradas, BI et al. (2015) consideram “bateria-a-roda”; KNOBLOCH et al. (2020) e NEMATCHOUA (2020) levam em consideração apenas a fase de uso tendo como base o tráfego diário. Outra abordagem percebida foi do “poço-ao-tanque” (*WTW*), por exemplo RÜDISÜLI; TESKE; ELBER, (2019) incluem todo o ciclo de vida da fonte energética, incluindo todas as etapas e tecnologias associadas (por exemplo, produção, conversão, transporte etc.) desde sua origem (“poço”) até que esteja em um “tanque” (em um veículo).

A abordagem “berço-ao-portão” incluindo o reuso e fases de fim de vida, está presente em poucas publicações. Tal realidade, pode estar relacionada à dificuldade na obtenção de dados de inventário para todas as fases do ciclo de vida, em especial considerando um modelo circular. Por exemplo, RAJAEIFAR et al. (2017) avaliam as principais etapas envolvidas no ciclo de vida do biodiesel, incluindo coleta de matéria-prima, produção e combustão de biodiesel como combustível veicular. SHIAU; MICHALEK (2010) consideram apenas o transporte ferroviário da mina de carvão até a usina (distribuição). É vital mencionar que oito artigos não especificam explicitamente a fronteira e, portanto, foi extraído indiretamente deles o contexto. Ainda, em onze, as fronteiras do sistema não foram definidas ou não estavam disponíveis, veja APÊNDICE A – Revisão sistemática.

É importante destacar que 23 publicações citam do “poço-à-roda” como sua fronteira. Comparada a uma análise do “berço-ao-túmulo” uma análise do “poço-à-roda” pode ter os mesmos processos, mas não considerar a energia ou emissões envolvidas na construção de instalações, veículos, consumo de materiais de manutenção (água, óleo) e o descarte no fim de vida. TONG et al. (2020) incluem extração de energia primária, produção e transporte de combustível e uso de veículos, além da fabricação de baterias de íons de lítio para veículos elétricos e híbridos. BORÉN, (2020) e CHOI et al. (2020) utilizam do “poço- à -roda” para avaliar o ciclo de vida de diferentes combustíveis veiculares, retirando a produção do veículo em si do escopo. KHAN et al. (2019) tem uma perspectiva similar analisando do “poço-à-roda” o uso de energia e emissões de GEE na produção de combustível e seu uso no veículo.

Ao considerar uma definição das fronteiras do sistema e sua justificativa, 81,03% citam diretamente as fronteiras escolhidas ou aludem gráfica ou textualmente às fases abordadas pelo estudo. No entanto, poucas publicações, justificam com

profundidade as escolhas, SUH et al. (2004) argumentam que na prática é bastante difícil, antes da coleta de dados reais, determinar se uma entrada ou uma saída irá ou não alterar significativamente a conclusão geral do trabalho. Assim, segundo o autor uma justificativa para um corte conforme exigido pela normativa é difícil de ser feita.

2.1.4.4 Análise de inventário: uma indicação do uso de *databases* nos artigos analisados

A ACV depende muito de dados e o desenvolvimento do inventário de ciclo de vida (ICV) desempenha um papel crucial em qualquer estudo (PRADHAN; MBOHWA, 2017). No entanto o processo e a coleta de dados, bem como a elaboração de inventário pode ser considerada a parte mais difícil e demorada de um estudo (ADEDEJI et al., 2020). Pela complexidade atrelada a processos dentro de um contexto urbano, a obtenção de dados de qualidade no setor de transportes apresenta um desafio.

Nos artigos selecionados, bases de dados secundárias, primárias e fontes de literatura foram indicadas na elaboração do ICV. A maioria das publicações indica uma combinação dessas três fontes, utilizando bases de dados secundárias e fazendo alterações nos *datasets* para o maior realismo dos estudos. Ao todo 70,69% das publicações utilizam uma base de dados secundária, sendo que seu uso e recorrência pode ser percebido na Tabela 1.

É perceptível que a *database* mais utilizada pelos autores é a *Ecoinvent*, com 41,38% dos estudos a utilizando. LAUSSELET et al. (2021) além dos conjuntos de dado da versão *Ecoinvent 2.2*, utilizam a Pesquisa Nacional de deslocamentos e os hábitos de viagem dos residentes de Ydalir como fonte primária. ACCARDO et al. (2021) utilizam um tratamento semelhante, usando a versão 3.6 e coleta primária de empresas produtoras de baterias veiculares. Por outro lado, COONEY et al. (2013) usam duas bases diferentes nos seus estudos, novamente a *Ecoinvent*, o banco de dados de inventário do ciclo de vida dos Estados Unidos (NREL) e dados de literatura. CHESTER et al. (2013) também utiliza em combinação dados primários de autoridades de trânsito da área metropolitana de Washington, e secundários do

Laboratório Nacional de Energias Renováveis (NREL) e da base de dados contida no software *SimaPro* v7.3.3.

Tabela 1 - Presença de *databases* de *background* em artigos

Database	Número (n)*	Porcentagem (%)
Ecoinvent	22	33,33
Gabi <i>database</i>	5	3,03
NREL	2	3,03
Simapro <i>database</i> +NREL	2	3,03
GREET +JRC	2	3,03
GREET	2	3,03
COPERT IV	1	1,52
DOE	1	1,52
EIO-LCA	1	1,52
JRC	1	1,52
NEI	1	1,52
GREET + EPA	1	1,52
Ecoinvent + GREET	1	1,52
Ecoinvent + ADEME	1	1,52
Ecoinvent + EPA +USGS	1	1,52
Ecoinvent + NREL	1	1,52
YPF S.A.	1	1,52
Não definida	20	30,30
Total:	66	100,00

Fonte: Autor. *artigos de revisão e diretrizes também foram considerados nessa análise.

A utilização de bases nacionais por autores também foi verificada como escolha habitual. Por exemplo, DE BORTOLI et al. (2020) coletam dados da Agência Francesa para Transição Ecológica (ADEME); HOOFTMAN et al. (2016) utilizam dados do Departamento de Energia dos Estados Unidos (DOE); LANG et al. (2013) citam que os fatores de emissão foram calculados pelo modelo COPERT IV da União Europeia; ALBERS et al. (2019) e KHAN et al. (2019) utilizam o catálogo de dados do Centro de Pesquisa Conjunto da União Européia (JRC); TONG; AZEVEDO (2020) usa o Inventário Nacional de Emissões dos Estados Unidos conjuntamente a dados agregados da NREL; SHIAU; MICHALEK (2010) usa a Pesquisa Geológica Nacional dos Estados Unidos (USGS) juntamente com EPA e Ecoinvent.

Ademais, alguns autores utilizam bases e softwares de modelagem mais específicos a temática de transporte, como NAHLIK et al. (2014) que estimam os impactos de geração de eletricidade, produção de gás natural e combustão a partir de modelagem com o Modelo de Gases de Efeito Estufa, Emissões Regulamentadas e Uso de Energia em Tecnologias (GREET); RAHMAN; CHIN; HAQUE (2014) executam avaliação econômica do ciclo de vida de insumo-produto (EIO-LCA) envolvendo o uso

de dados agregados em nível de setor para subsequentemente quantificar os impactos.

Ainda, salienta-se que a segunda base de dados mais empregada pelos autores foi a GaBi database; BASTOS et al. (2019), por exemplo, a utilizam em uma pesquisa focada na estimativa de impactos respiratórios de veículos em Lisboa e Al-Thawadi et al. (2019) em um comparativo entre viagens de automóvel e trem em Catar.

Por último, percebe-se que 18,97% dos estudos utilizam bancos de dados combinados e que a utilização de dados secundários é amplamente adotada, seja como base para adaptações, seja de forma original. Consoante a esse amplo uso, bancos de dados de ACV contribuem para o desenvolvimento e uso mais amplo de métricas de qualidade de dados (CIROTH, 2021). Todavia, KLÖPFFER et al. (2014) citam a necessidade de uma revisão crítica abordando a qualidade dos dados em estudos de caso em ACV, já que a qualidade de um determinado modelo de ICV, de conjuntos de dados ou de um banco de dados depende totalmente, de acordo com a ABNT 14044 (ABNT, 2009), dos “requisitos declarados”. Isso, por sua vez, significa que os requisitos precisam ser especificados (declarados) e as informações precisam ser fornecidas para entender até que ponto esses requisitos são de fato atendidos e para que a modelagem seja feita com convicção buscando atender o objetivo e escopo em sua totalidade (CIROTH, 2021).

2.1.4.5 Métodos de avaliação de impacto do ciclo de vida usados

A fase de avaliação de impacto do ciclo de vida (AICV) é a terceira fase da ACV. O objetivo da AICV é prover informações adicionais para ajudar na avaliação dos resultados do ICV de um sistema de produto, visando o melhor entendimento de sua significância ambiental. Para tanto, devem ser determinadas quais categorias de impacto, indicadores das categorias e modelos de caracterização serão incluídos no estudo de ACV (ABNT, 2009).

Os métodos de AICV mais frequentemente empregados a partir da revisão do presente estudo foram: ReCiPe (15,52%), CML (10,34%) e IPCC (12,07%). Os métodos menos utilizados foram: ILCD, TRACI, Eco-indicador 99 (EI99), Usetox, BM4

(Balancing Method 4: oils and fats) e IMPACT 2002+. Alguns autores também usaram uma agregação de dois ou mais métodos, como DEL PERO et al. (2015) que utilizam CML, Eco-indicador e IMPACT 2002+. É importante destacar que 26 artigos não mencionaram nenhum método utilizado, mas dentre esses onze não aplicam ACV e tem um escopo teórico. A Tabela 2 demonstra essa distribuição e combinação usada nas publicações.

Tabela 2 - Métodos AICV utilizados em artigos

Método AICV	Número (n)*	Porcentagem (%)
<i>Métodos midpoint</i>		
TRACI	4	6,06
ILCD	2	3,03
CML	2	3,03
<i>Combinação mid e endpoint</i>		
RECIPE	8	12,12
		4,55
IMPACT 2002+	3	
<i>Outros AICV</i>		
IPCC	7	10,61
BM4	1	1,52
<i>Métodos combinados</i>		
CML + CED	1	1,52
CML + IPCC	1	1,52
CML + EI99	1	1,52
CML + EI99 + IMPACT 2002+	1	1,52
CML + ILCD	1	1,52
CML + TRACI	1	1,52
RECIPE + EI99 + USEtox		
Não definido	26	50,00
Total:	66	100,00

Fonte: Autor. *artigos de revisão e diretrizes também foram considerados nessa análise.

Considerando que os autores usam vários métodos de AICV, diferentes categorias de impacto são também selecionadas. De forma geral, a maioria dos artigos alude à investigação de uma categoria em particular, com 81,81% dos autores ao menos citando uma. A exemplo de (AMATUNI et al., 2020) que apesar de não definirem um método de cálculo, citam quantificar emissões de GEE na mobilidade urbana, expressas em massa equivalente de dióxido de carbono (CO₂-eq). Similarmente, LAUSSELET et al. (2021) e diversos outros autores apresentam essa definição menos implícita de categoria, no entanto é perceptível que a quantificação de GEE é enfoque de diversos artigos. Dos 54 citando categorias de impacto, apenas um não cita os termos: “emissões de GHG” ou “mudanças climáticas” ou “potencial de aquecimento global” ou “CO₂” ou “dióxido de carbono” ou “CO₂ equivalente”. Com

objetivo de analisar a qualidade do ar, HOOFTMAN et al. (2016) são os únicos autores que desconsideram impactos relacionados a GEE e fixa em sua avaliação as categorias: Formação de oxidantes fotoquímicos (POF), Toxicidade Humana (HT) e Formação de Material Particulado (PM).

Para fins de entendimento mais específico, os métodos com maior recorrência, *ReCiPe* e CML, foram escolhidos para execução de uma análise crítica. A Tabela 3 apresenta as categorias de impacto consideradas pelos autores, utilizando apenas o método CML. As categorias de impacto comumente usadas foram acidificação, eutrofização, potencial de aquecimento global e toxicidade humana. Esses foram seguidos por depleção abiótica, ecotoxicidade terrestre e formação de ozônio fotoquímico. Apenas ACCARDO et al. (2021) e DEL PERO et al. (2015) consideram todo o conjunto de categorias de impacto. Em contrapartida, DE BORTOLI; CHRISTOFOROU (2020) e RÜDISÜLI; TESKE; ELBER (2019) levam em conta apenas Potencial de Aquecimento Global.

Tabela 3 - Categorias de impacto CML utilizadas em artigos

Categorias de impacto	Número (n)	Porcentagem (%)
Potencial de aquecimento global	7	13,46
Acidificação	6	11,54
Eutrofização	6	11,54
Toxicidade humana	6	11,54
Depleção de recursos abióticos	5	9,62
Ecotoxicidade terrestre	5	9,62
Depleção de ozônio estratosférico	4	7,69
Formação de ozônio fotoquímico	4	7,69
Ecotoxicidade de água doce	3	5,77
Ecotoxicidade marinha	3	5,77
Formação de foto-oxidantes	3	5,77
Total:	52	100,00

Fonte: Autor. *número é equivalente as vezes que a categoria é utilizada por artigo

A Tabela 4 mostra as categorias impactos mais utilizadas em artigos que empregam o método *ReCiPe*. As categorias mais comumente usadas foram mudanças climáticas, formação de material particulado e toxicidade humana, seguido pelo e acidificação e formação de oxidantes fotoquímicos. As categorias menos usadas foram ocupação de solo agrícola ou urbano e transformação de solo natural.

MESSAGIE et al. (2013) usam todas as categorias de impacto de ponto médio. Nenhum dos autores, usando o método *ReCiPe*, incluiu todo o conjunto de categorias de impacto (*midpoint* e *endpoint*), apenas HOOFTMAN et al. (2016) e BONILLA et al. (2020) consideram categorias de impacto *endpoint*. Outros métodos de AICV, como o IPCC, foram empregados por 7 autores, todos considerando Potencial de aquecimento global.

Tabela 4 - Categorias de impacto *ReCiPe* utilizadas em artigos

Categorias de impacto	Número (n)	Porcentagem (%)
<i>midpoint</i>		
Mudanças climáticas	7	11,67
Formação de material particulado	7	11,48
Toxicidade humana	6	10,00
Acidificação	4	6,67
Formação de foto-oxidantes	4	6,67
Depleção da camada de ozônio	3	5,00
Depleção de combustíveis fósseis	3	5,00
Depleção de recursos minerais	3	5,00
Depleção de água	2	3,33
Ecotoxicidade de água doce	2	3,33
Ecotoxicidade marinha	2	3,33
Ecotoxicidade terrestre	2	3,33
Ocupação de solo agrícola	1	1,67
Ocupação de solo urbano	1	1,67
Radiação ionizante	2	3,33
Transformação de solo natural	1	1,67
<i>endpoint</i>		
Danos à saúde humana	2	3,33
Danos à diversidade dos ecossistemas	2	3,33
Danos à disponibilidades de recursos	2	3,33
Total:	60	100,00

Fonte: Autor. *número é equivalente as vezes que a categoria é utilizada por artigo

As normativas que regem a aplicação de ACV solicitam uma explanação da seleção de categorias de impacto, bem como da caracterização dos modelos de acordo com o objetivo e escopo definidos previamente. No entanto, poucas publicações oferecem uma explicação ou justificativa. Excepcionalmente, HOOFTMAN et al. (2016) argumentam que a seleção das categorias de impacto foi baseada nos mais impactos mais adequados para avaliar malefícios a saúde humana considerando à má qualidade do ar urbano. Por outro lado, DEL PERO et al. (2015) apesar de selecionarem todo o conjunto de categorias de impacto não explicam tal escolha, apenas listando as categorias sem justificativa.

2.1.4.6 Interpretação dos resultados

Segundo a ABNT 14044 (ABNT, 2009), a fase da avaliação do ciclo de vida é onde as constatações da análise de inventário ou da avaliação de impacto, ou de ambas, são avaliadas com relação ao objetivo e escopo definidos, a fim de se chegar a conclusões e recomendações. A etapa ainda pode incluir uma avaliação dos resultados por meio de análise de incertezas e sensibilidade.

Todos os trabalhos que aplicam ACV incluem a interpretação dos resultados, onde os autores determinam os impactos mais significativos e fazem uma discussão com literatura complementar. Todavia, apenas dois artigos executam análise de incerteza, 18 análise de sensibilidade e dois efetuam ambas. Embora esses elementos não sejam obrigatórios, eles aumentam a confiança nos resultados da AICV e os resultados gerais do estudo.

2.1.5 Síntese

Os processos de transporte representam um dos grandes desafios na redução dos impactos ambientais e a consecução dos ODS. Apesar do crescimento da temática nos últimos anos, pouca atenção é dada a pesquisas no setor de transportes com uma ótica do ciclo de vida, pois apenas 58 artigos científicos foram identificados em revistas a partir da plataforma Scopus.

Análises de conteúdo, identificadas e especificadas por meio de mapas de palavras e diagramas efetuam a representação visual da rede de conceitos relacionados à ACV, revelando quatro temas mais frequentes: “avaliação do ciclo de vida”, “impactos ambientais”, “transporte urbano” e “gases de efeito estufa”. Tais tópicos principais e os subtemas atrelados a eles refletem tendências atuais de pesquisa.

Na revisão crítica acerca das escolhas metodológicas presentes nos artigos selecionados foi perceptível, muitas vezes, a falta de uma clareza dos autores e alinhamento com as normativas correntes. Ademais, uma quantidade significativa de publicações se limita a avaliar emissões de GEE, em especial na fase de uso dos

veículos (poço-à-roda). Essas restrições dificultam não só um entendimento mais amplo na cadeia, mas também de categorias de impacto de relevância, como as relacionadas a toxicidade humana e qualidade do ar. Curiosamente, outra categoria de impacto em particular, depleção abiótica-fósseis, ligada diretamente a produção de combustíveis fósseis, também não foi enfatizada pelos autores.

Além disso, a revisão sistemática dos artigos selecionados, nas sessões de metodologia de ACV, revelou incoerência com a normativa em vários casos, faltando diversos tópicos dados como obrigatórios pela norma vigente. Entretanto, por ser ainda um campo relativamente novo a aplicação de ACV em sistemas urbanos, como é o caso do transporte, cria tanto desafios quanto oportunidades, por exemplo a definição das UF, fronteiras do sistema, AICV, são etapas ainda em aberto quanto às escolhas dos autores.

Apesar disso, uma formulação padronizada traria inúmeros benefícios como a maior comparabilidade dos estudos e simplificação das escolhas na etapa de modelagem. Simultaneamente, é compreensível pela diferenciação não só de temáticas como da própria contextualização territorial que exista essa diferenciação entre os estudos, coerente em seu objetivo e escopo específicos.

Outro aspecto que se conecta com o contexto urbano das análises é a possibilidade de aplicação de avaliação de sustentabilidade do ciclo de vida (ASCV), abrangendo não só questões ambientais como também temas relacionados ao consumo, incluindo variáveis sociais e econômicas. Nenhum dos artigos lidos apresenta esta abordagem, o que indica uma clara lacuna no contexto do estudo em locais urbanizados com muitas dinâmicas sociais e econômicas ocorrendo em simultâneo e criando oportunidades ou fraquezas em cenários futuros mais sustentáveis.

Uma discussão sobre estudos atuais de ACV publicados no setor de transporte auxilia a comunidade, pesquisadores e profissionais de ACV, na compreensão de desafios a serem vencidos visando o alcance de um pensamento mais crítico no momento das definições metodológicas. Ademais, a complexidade atrelada a estudos de ACV exigem reflexão no momento de decisões metodológicas durante as etapas propostas pela normativa e somente com estratégias claras e transparentes, bem como análise e validação de dados, podemos obter resultados coerentes, que no caso do transporte, possam servir de base para que tomadores de

decisão no setor apliquem medidas mais sustentáveis em suas políticas públicas. Nesse sentido, estudos adicionais são essenciais para melhorar e determinar métodos científicos e evitar a subjetividade.

2.2 ABORDAGEM TERRITORIAL

A complexidade da ACV em escala urbana citada por diversos autores (CHESTER; CANO, 2016; LOISEAU et al., 2018) evidencia a necessidade de um entendimento mais amplo sobre o território e meios de possível conexão da ferramenta de ACV em estudos dessa escala. Para tanto, foram revisados artigos com esse escopo, com ênfase metodológica ou prática na aplicação de SIG.

Tal decisão foi tomada tendo como base a complementação entre SIG e ACV. O primeiro é projetado especificamente para organizar e analisar dados espaciais, enquanto o último cria inventários e analisa dados em sistemas de produtos e tipicamente não opera com informações georreferenciadas (GEYER et al., 2010). Portanto, a configuração de pesquisa é delimitada pelas seguintes palavras-chave e operadores booleanos:

"geographic information system" OR "gis" AND "lca" OR "life cycle assessment" OR "life cycle analysis" OR "lca"

Os resultados encontrados em 10/04/2021 estão compilados na Tabela 5. Das doze publicações encontradas na configuração: quatro aplicam a ferramenta de ACV e utilizam sistemas de informação geográfica em uma das etapas; cinco aplicam a SIG-ACV dentro de um contexto relacionado a sistemas de transporte; três fazem proposições metodológicas quanto à integração de SIG e ACV; outros oito abordam estudos de caso em seu escopo; três debatem e/ou citam apenas as metodologias; e, por fim, três publicações fazem referências a ACV e SIG em seu texto, mas não os aplicam.

Tabela 5 - Quadro resumo dos artigos da RSL quanto ao conteúdo do artigo.

Autor, ano	Aplica ACV e cita SIG	Aplica ACV e SIG	Cita ACV e SIG	Aborda Transportes	Proposição metodológica
Sherwood et al., 2020		x		x	
Kylili et al., 2018		x		x	
Loiseau et al., 2018			x		x
Ghimire et al., 2017	x				
García-Pérez et al., 2016					
Vadoudi et al., 2015		x		x	
Hendrickson et al., 2015		x		x	
Yoo et al., 2014			x		
Richards-Rissetto et al., 2013		x		x	
Loiseau et al., 2013		x			x
Zhuang et al., 2011			x		
Geyer et al., 2010		x			x

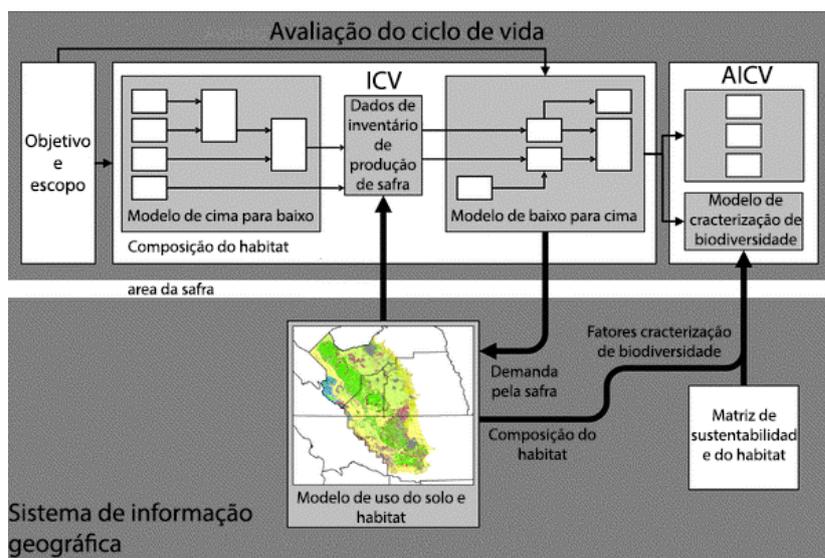
Fonte: Autor.

2.2.1 Visão geral dos Resultados

De forma geral, os autores citam a falta de diferenciação espacial na ACV como uma debilidade em análises territoriais. No entanto, apesar dessa concordância, não há um consenso sobre como deve ocorrer essa caracterização. Todavia, nessa breve síntese dos estudos analisados, verifica-se que apesar dos diferentes enfoques, há referências comuns quanto à aplicação conjunta de SIG e ACV (GEYER et al., 2010; LOISEAU et al., 2018).

O primeiro artigo detectado é originário do final do século XX, onde BENGTTSSON et al. (1998) sugerem a integração entre SIG e ACV. Concordante, AZAPAGIC; PETTIT; SINCLAIR (2007) descrevem um *framework* de vinculação baseado em modelos ambientais, no entanto com o uso de SIG restrito ao fornecimento de informações de localização sobre fontes de poluição.

Figura 10 - Fluxograma de conexão SIG-ACV.



Fonte: (GEYER et al., 2010)

Anos depois, GEYER et al. (2010) publicam um estudo com o propósito de demonstrar o acoplamento entre as ferramentas na avaliação de impactos de biodiversidade. Na Figura 10 é possível visualizar o fluxograma demonstrando tal integração, o modelo converte a demanda de etanol em demanda de safra no ICV retornando a ferramenta SIG, que por sua vez formula cenários de usos do solo. Por conseguinte, o autor explora os dados de uso do solo para gerar dados de inventário. Portanto, de acordo com o modelo de GEYER et al. (2010), duas etapas do ciclo de vida são diretamente correlacionadas ao SIG: ICV e AICV.

Em anos subsequentes a partir da proposta de GEYER et al. (2010) e o advento da temática, houve certo crescimento no número de publicações com o uso de SIG e ACV (DRESEN; JANDEWERTH, 2012; GASOL et al., 2011; HILOIDHARI et al., 2017). Todavia se salienta que tais análises de forma geral partem de um estudo de caso sem uma abordagem metodológica, para interligação das ferramentas.

Subsequentemente, LOISEAU et al. (2014) propõem uma nova abordagem metodológica, introduzindo quatro *bottlenecks* representados na Figura 11: (1) definição da unidade funcional, (2) seleção de fronteira de sistema, (3) coleta de dados e (4) o refinamento da fase de avaliação do impacto do ciclo de vida, a fim de fornecer

indicadores úteis para o planejamento territorial. Para cada um de esses desafios, recomendações foram feitas para se adaptar à estrutura da ACV.

Figura 11 - Identificação de *bottlenecks* nas fases de ACV.



Fonte: (LOISEAU et al., 2014)

Em relação à unidade funcional, LOISEAU et al. (2014) destacam a tipologia territorial da avaliação e como o sistema estudado é por definição multifuncional. Consequentemente, é necessária uma adaptação da estrutura da ACV para dar conta de tal especificidade. Em tal abordagem revisada, se propõe substituir a definição da unidade funcional pela identificação e seleção de funções relacionadas a um fluxo de referência pré-determinado. De forma simplificada, os limites do sistema serão as fronteiras geográficas do território em si. A fim de propor indicadores relevantes para a tomada de decisão processo, o artigo sugere classificar os impactos ambientais de acordo com dois critérios anteriores: (1) impactos direto ou indiretos e (2) impactos globais ou regionais / locais. A visão geral do método pode ser visualizada na

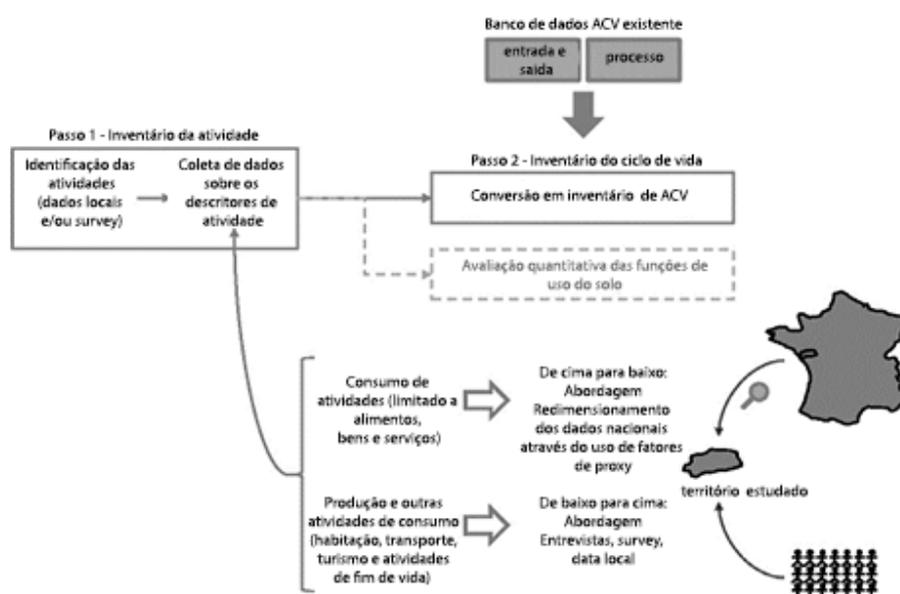
Figura 12.

Formalizando pela primeira vez a proposta de definição em ACV territorial, LOISEAU et al. (2018) identifica como primordial a inclusão do SIG no escopo da avaliação para melhorar a representação dos resultados trazido pela inclusão da informação espacial. No entanto, é destacado que a inclusão de SIG em um ACVt (Avaliação do ciclo de vida territorial) requer mais harmonização de prática e orientação (LOISEAU et al., 2018). Como exemplo, no quadro atual de ACVt, o inventário é construído a partir da coleta de dados de diferentes atividades (tipos e quantitativos) de uso do solo conectados ao ICV, para quantificar as entradas e saídas no território.

Entretanto, é evidenciado que essa fase ainda é um desafio, já que para rodar um ACVt é crítico que os dados de ICV, usados para ligar a atividade identificada e quantificar seus impactos, sejam geograficamente representativos para com o território e suas características particulares (YANG, 2015). Nesse sentido, há uma constante interligação das fases da ACV, com objetivo e o escopo definidos de acordo com uma análise consistente do histórico do território a partir do uso de SIG. Os resultados dessa análise orientam a definição da atividade a ser avaliada e após serem georreferenciados e quantificados são usados para criação de indicadores de função. Tais indicadores retroalimentam as etapas subsequentes de ICV e AICV.

LOISEAU et al. (2018) também salientam que dimensões organizacionais e de contexto são parcialmente consideradas na definição de objetivo e escopo, e na fase de ICV têm grande importância no manuseio da multifuncionalidade do sistema, que é uma diferença central desta abordagem à ACV convencional. Os autores comentam que, em algum momento, a AICV também deve conter informações específicas dos locais para caracterizar impactos ambientais locais ou regionais, com demonstração dos resultados a partir de forma gráfica facilitando a leitura do tomador de decisão. O diagrama da Figura 13 representa o método proposto pelos autores.

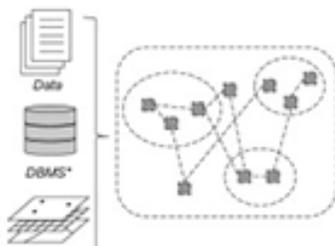
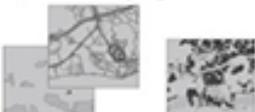
Figura 12 - Construção ACV de um território.



Fonte: (LOISEAU et al., 2018)

Outro artigo que merece destaque é o estudo de DING; BOURRELLY; ACHTEN (2020) que pretende contribuir para a operacionalização de ACVt agrícola em fase de inventário, através da proposta de utilização de um fator de emissão territorial (*FEt*) para vincular ACVt com SIG. O termo “Fator de emissão” (FE) representa a quantidade de emissão por unidade área de uso do solo (por exemplo, a unidade pode ser kg / ha). Os autores destacam que conhecendo a emissão por unidade de área de cada tipo de uso do solo (ou seja, o fator de emissão, do inglês *emission factor - EF*) é uma maneira conveniente e direta de calcular as emissões diretamente focadas para o planejamento urbano, uma vez que esses FEs devem ser geograficamente representativos capturando as características do território, e discriminando diferenças territoriais e ambientais do espaço.

Figura 13 - Método de ACV Territorial

a. Análise territorial	b. Projeto do sistema	c. Links com ACV
 <p>SGBD: Sistema de gerenciamento de banco de dados GIS: Sistema de informação geográfica</p> <p>→ Limite e localização do sistema dentro de seu ambiente → Modelagem dos principais itens e suas interações</p>	<p>i) Indicadores de função</p> 	<p>Priorização das funções desempenhadas pelo sistema</p> <p>Definição da unidade funcional</p>
	<p>ii) Cenários indicadores</p> 	<p>Modelagem de sistemas</p> <p>Dados sobre as opções técnicas</p> <p>Inventário do ciclo de vida</p>
	<p>iii) Indicadores geográficos</p> 	<p>Modelagem de sistemas</p> <p>Dados sobre o ambiente do entorno</p> <p>Inventário do ciclo de vida</p>
	<p>→ Otimização funcional, técnica e espacial do sistema</p>	<p>→ Contextualização da definição da meta e do escopo e das fases de ICV</p>

Fonte: (LOISEAU et al., 2018)

Por fim, a respeito da abordagem de ACVt, (LOISEAU et al., 2018) sugere que ainda há uma necessidade de aprofundamento metodológico, e que essa ampliação pode se dar através da integração com outras ferramentas e métodos existentes, como o uso de SIG citado no texto. Além disso, sendo a ACVt um método horizontal os autores sugerem a execução de entrevistas e levantamento de cenários de uso do

solo, seja com a população residente do local, seja com os próprios tomadores de decisão. No entanto, as informações que devem ser fornecidas por tais stakeholders e em qual momento isso deve ocorrer não foram esclarecidas no estudo.

3 MÉTODO

O presente capítulo tem como objetivo expor a proposição do método utilizado para a presente dissertação. Ademais, é exposta a escolha do estudo de caso e a abordagem metodológica a partir dele.

3.1 Desenvolvimento do método de pesquisa

O método proposto tem como objetivo otimizar a integração territorial junto à avaliação ambiental a partir da aplicação da técnica de ciclo de vida no transporte urbano, considerando uma abordagem de frota. Por conseguinte, o framework é estruturado a partir de uma integração entre SIG e ACV que ocorrem paralelamente para a posterior validação do método.

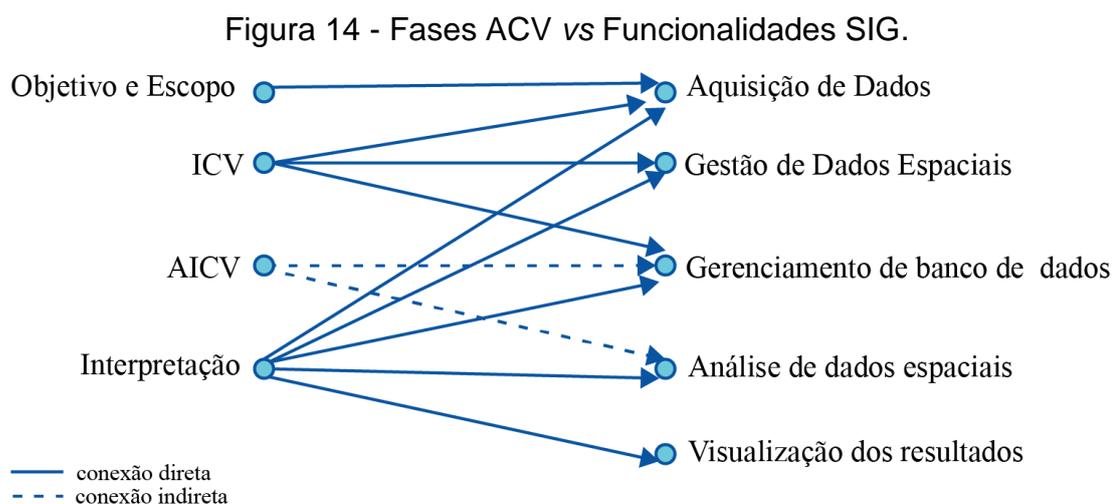
Buscando uma contextualização territorial, as fases da ACV convencional são correlacionadas com as funcionalidades da ferramenta SIG. Tal tentativa de ligação é demonstrada na Figura 14. Assim como GEYER et al. (2010) e LOISEAU et al. (2018), propõem-se a aplicação de uma “ACV Territorial” para avaliar os impactos ambientais considerando as condições específicas de um local. Nesse sentido, ao SIG se atribui a função de contextualização territorial das fases da ACV.

Por exemplo, as fases de ACV de objetivo e escopo e ICV estão intrinsecamente ligadas ao entendimento e delimitação não só dos limites do sistema, mas também dos espaciais. Ademais, ambas as fases são alimentadas por dados georreferenciados, preponderantes na caracterização do impacto localizado. Outro aspecto de importância, é a conexão indireta da fase de AICV a funcionalidades do SIG, já que os valores obtidos por meio do software de ACV necessitam ser tratados e interpretados antes de serem especializados. Por fim, salienta-se a relevância da fase de interpretação, concomitante a todas as fases da ACV e funcionalidades SIG e diretamente relacionada a tomada de decisão a partir da análise e visualização dos resultados.

Conseqüentemente, o framework é baseado nas normas internacionais ISO 14040 e ISO 14044 (ISO, 2006) seguindo portanto, a estrutura de uma ACV convencional de quatro fases distintas: (1) definição de objetivo e escopo, (2) análise de inventário, (3) avaliação de impacto e (4) interpretação, esta última usada para

revisar e refinar todas as fases à medida que o estudo se desenvolve. Todavia, a diferenciação se encontra na utilização de informação tradicional (A) e georreferenciada (B) em um processo de retroalimentação, como demonstrado na Figura 15. A partir da aplicação do framework, os resultados são divididos em três grandes grupos: (1) matriz energética, (2) avaliação de cenários e (3) análise espacial. No primeiro são avaliadas diferentes fontes energéticas dos veículos e diagnósticos e prognósticos relacionados a fase de uso do veículo; na segunda três cenários são avaliados entre 2020 e 2050 seguindo uma abordagem de frota; no terceiro a partir de dados espaciais de densidade populacional, um cenário proposto é analisado tendo em vista mudanças a curto e longo prazo.

A completude de todas as fases do framework possibilita um entendimento amplo de diferentes fatores relacionados a mobilidade e estimula a reflexão por parte dos stakeholders.



Fonte: Autor.

A Figura 16 detalha o framework a partir da ligação entre as ferramentas. Inicialmente, há a identificação de fenômenos geográficos, e características estruturais da mobilidade local. Ao determinar tais particularidades, utiliza-se de ferramentas de expressão gráfica para traduzir e examinar as informações coletadas, delimitando a atividade de pesquisa, no caso do presente estudo: o transporte público. Nesse momento para validação da escolha da temática ocorre: (1) identificação

atividades (dados linhas de transporte uso do solo etc.); (2) coleta de dados com os gestores e entendimento da problemática do transporte público (nº de passageiros, rodagem de km etc.). Com tal aquisição de dados cartográficos e consulta junto aos gestores se dá a primeira organização de uma base de dados geográfica e quantitativa necessária para definir do estudo de caso.

Portanto, a primeira fase é a definição do estudo de caso, no caso do presente estudo preliminar as características do sistema de transporte público por ônibus. Tal definição é executada por meio de contato e entrevista com a gestora de transporte público municipal e dados fornecidos a partir de planilhas. Além disso, dados abertos disponíveis também foram utilizados para determinação da área de análise e a execução de um diagnóstico. Os resultados dessa compilação de informação fornecem base para as definições da sequência: unidade funcional, limites do sistema e as fases da ACV a serem avaliadas, limitação geográfica do estudo, definição de critérios de corte e itens a serem excluídos da análise, criação de cenários de avaliação e estabelecimento do objetivo da pesquisa. Todas as definições seguem indicações do referencial teórico explanado no Capítulo 2.

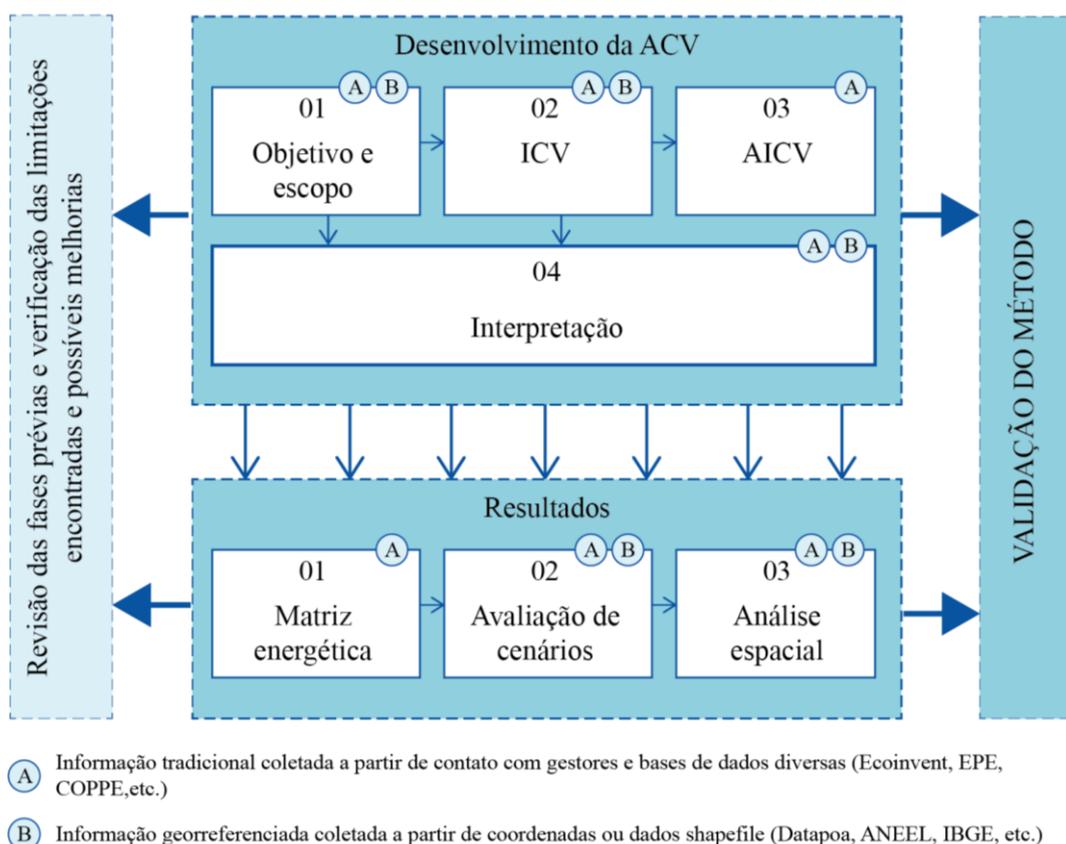
A segunda fase Inventário do Ciclo de Vida (ICV) é composta pela coleta de dados primários, feita junto ao banco de dados da gestora do transporte público da cidade (EPTC, 2018). Além disso, também ocorre a coleta de dados secundários, executada segundo a partir de diferentes fontes técnicas e científicas, a exemplo da base de dados *Ecoinvent* v.3.6 (ECOINVENT, 2018). Posteriormente ocorre: (1) conversão dos dados territoriais em fluxos de input/output a partir da unidade funcional definida anteriormente; (2) gestão do banco territorial convertendo coordenadas e unificando as informações obtidas; (3) gerenciamento do banco de dados em uma *GEODATABASE*; (4) definição de Software SIG (ex: ArcGIS, QGIS etc.); (5) organização dos dados disponíveis em processos; (6) definição dos processos da base de dados ACV (ex: *Ecoinvent*) a serem utilizados; (7) conversão de quantitativos de cada processo e correlação com a unidade funcional definida na etapa anterior; e (8) correlação dos dados geográficos e da gestão pública com os provenientes de um software de ACV (ex: Simapro, OpenLCA, etc.).

Na terceira fase, Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida (AICV), ocorre o gerenciamento do banco de dados criado na etapa anterior e sua a modelagem. Ademais, são definidos os métodos de avaliação mais condizentes com a temática do

estudo (ex: *Recipe*, CML etc.) e as categorias de impacto mais relevantes para a análise. A criação dos processos e sistemas de produto dentro do software de ACV escolhido são executadas a partir das informações cartográficas e dos dados secundários obtidos no ICV. Posteriormente, os impactos são calculados dentro do software de acordo com método pré-definido.

Saindo do software de ACV acontece a exportação dos resultados para interpretação e comparação com dados territoriais existentes, nesse momento também podem ocorrer ajustes para consideração dos impactos dentro dos cenários construídos na primeira fase. Finalmente são modelados os cenários a partir da plataforma SIG pela sua fácil correlação de planilhas dentro de todos os softwares utilizados (*OpenLCA – Excel – ArcGIS*).

Figura 15 - Estrutura da pesquisa.



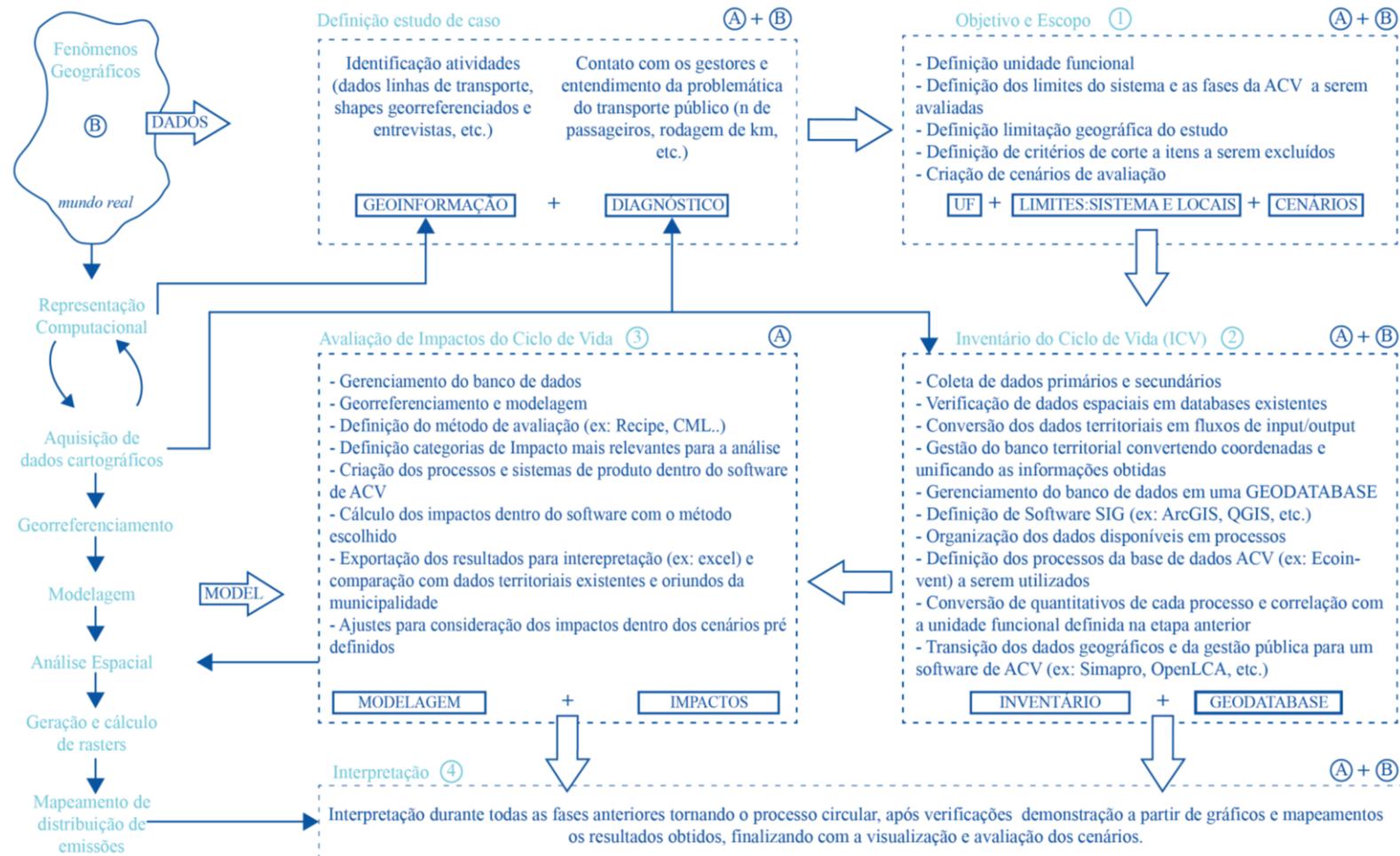
Fonte: Autor.

Na fase final de Interpretação, os resultados da avaliação são apresentados segundo análise crítica de cada variável descrita anteriormente. Tal fato é possível já

que essa fase permeia todas as demais tornando o processo circular. Nesta etapa, como sugerido por LOISEAU et al. (2018) visando a facilitação da visualização dos cenários propostos pelos tomadores de decisão além dos resultados do estudo serem demonstrados por gráficos, se utiliza o SIG como ferramenta auxiliar. O mapeamento é utilizado para fins de verificação da distribuição espacial das linhas de ônibus e dos impactos atrelados na circulação delas pelo território. A representação final é uma *rasterização* da soma dos impactos agregados no entorno das linhas considerando o raio de dispersão das emissões. As etapas e fases descritas e suas ligações podem ser visualizadas na Figura 16.

Por fim, salienta-se que, conjuntamente a todas as etapas, há uma constante revisão e verificação das limitações encontradas e possíveis melhorias a serem feitas no estudo. Ainda, é importante frisar que as definições do método objetivam trazer uma contribuição na ACV territorial, mais especificamente facilitar sua aplicação através da utilização conjunta entre SIG e ACV, tanto na construção do inventário, quanto na de interpretação.

Figura 16 - Diagrama Resumo do método.



Fonte: Autor.

3.2 Definição Do Estudo De Caso

O estudo de caso é desenvolvido na cidade de Porto Alegre, Brasil. A capital do estado do Rio Grande do Sul é a décima cidade mais populosa do país, com população estimada de 1,41 milhão de habitantes contida em uma área de 496,83 km². Considerando sua área e população, de acordo com regulamentos nacionais (BRASIL, 2012), a cidade deve ter uma Plano Diretor (PDDUA) e um Plano de Mobilidade Urbana (PM). Novas versões de ambos PDDUA e PM, levando em conta as transformações socioeconômicas e espaciais da cidade, estão em elaboração pelo poder público.

De acordo com a Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA), a próxima versão do PD incluirá todos os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), alinhando a estrutura e princípios do plano atual com o viés sustentável e metas dos ODS. Dentro da temática “Mobilidade e acessibilidade”, a inclusão do ODS número 3 (Saúde e bem-estar), 11 (Cidades e comunidades sustentáveis) e 13 (Ação Climática) se destacam (PMPA, 2018).

Ainda, destaca-se que apesar de o PM ainda não ter sido publicado, um diagnóstico de mobilidade foi disponibilizado em 2019 para o grande público. O documento utiliza de método desenvolvido pela WRI Brasil como referência, tendo como objetivo investigar a realidade atual do transporte e executar um prognóstico para cenários futuros (PMPA, 2018). Segundo o relatório, os meios de transporte atuais na cidade são bicicleta, ônibus, micro-ônibus e balsa, bem como transporte individual (incluindo carros de passeio, táxis, e automóveis de aplicativos de carona) e transporte de carga, todos os modais conectados por meio da circulação peatonal (PMPA, 2019b). De acordo com o mesmo estudo, o transporte público de ônibus e micro-ônibus é o mais utilizado para deslocamento (40% das viagens), seguido pelo transporte individual (aproximadamente 36%). No entanto, é importante notar que os resultados representam tendências para 2003 (as últimas pesquisas sobre a mobilidade comportamental da WRI) e podem não demonstrar adequadamente as tendências atuais dado o aumento da frota de automóveis individuais e a oferta do serviço de transporte por aplicativos móveis.

O documento ainda aponta um cenário prospectivo preocupante, em que com a falta de investimentos, públicos ou privados, a infraestrutura dedicada à mobilidade

ficaria cada vez mais deteriorada. Tal realidade ocasionaria a piora de modos não motorizados e coletivos, resultando na opção de cada vez mais pessoas realizarem seus deslocamentos pelos modos motorizados individuais, o que levaria ao aumento dos congestionamentos, da poluição e da tarifa do transporte público (PMPA, 2019b).

Em relação ao transporte coletivo em específico, as paradas, estações e terminais de ônibus estariam cada dia mais sucateadas. Ademais, a informação sobre o serviço de transporte seria inadequada em relação às necessidades dos passageiros (PMPA, 2019b). Como consequência, o número de passageiros transportados pelos modos coletivos seria cada vez menor. Isso alimentaria o ciclo vicioso do transporte, com novas reduções de passageiros transportados pelos modos coletivos, haveria a redução da oferta de viagens e aumento na tarifa, que contribuiriam para o aumento do número dos deslocamentos por modos de transporte motorizados individuais.

Verifica-se a efetivação contínua das prospecções apontadas no diagnóstico, a exemplo da diminuição de 10% do número de passageiros entre 2003 e 2017 (PMPA, 2018), bem como, a solução encontrada pelas empresas de diminuir a frota e aumentar o preço da passagem, ações geradoras de insatisfação dos usuários e diversos protestos (GOMES, 2019). Nesse sentido GOMES (2019) aponta que o transporte coletivo por ônibus em Porto Alegre apresenta sinais de colapso.

Já inserido em um contexto econômico desfavorável antes da pandemia, o sistema de transporte público de Porto Alegre deixou ainda mais evidente seus sinais de desgaste nos últimos anos. Por efeito da crise empresas concessionárias, deixaram dezenas de ônibus parados na garagem alegando falta de recursos para compra de óleo diesel (GZH, 2021). Ainda em 2022, a Carris anuncia, pela primeira vez em sua história, o parcelamento no salário dos funcionários.

Essa realidade também se manifesta na qualidade do serviço, com a diminuição de tráfego de linhas, aumento no tempo de espera e baixa de funcionários. Ainda, devido à escassez de recursos financeiros e a situação adversa criada pela pandemia, houve baixa renovação de veículos no período pandêmico, ocasionando o envelhecimento da frota em sua totalidade. Segundo dados da EPTC, atualmente 54% dos veículos de Porto Alegre têm mais de 10 anos (GZH, 2022). Considerando a vida

útil máximo dos veículos de 14 anos, mais da metade do sistema teria que ser renovado em até cinco anos.

Infelizmente, apesar da situação adversa, a maioria das iniciativas de mobilidade ainda não foram colocadas em prática, já que como descrito o transporte tem se mostrado um território particularmente difícil para o avanço de políticas ou propostas visando a qualidade do sistema e o desenvolvimento sustentável. Particularmente em cidades brasileiras, esse contexto é exacerbado, uma vez que o transporte de passageiros é alimentado por recursos majoritariamente fósseis (COMUNELLO, 2022). Além disso, o fato de Porto Alegre ainda não ter publicado um plano de sustentabilidade ou mobilidade concreto, limita as escolhas de cenários a políticas nacionais, editais de concorrência pública, informações do município e planos ainda não implementado localmente.

Dada a essencialidade do transporte público e a sua frágil situação em Porto Alegre, propõe-se avaliar, com base na ferramenta ACV, cenários de eletrificação da frota do transporte coletivo por ônibus da Companhia Carris Porto-Alegrense (Carris), buscando alternativas de melhoria para essa complexa problemática.

3.2.1 Diagnóstico

Como parte inicial da Etapa B, foram identificados padrões e premissas a respeito da capital gaúcha. Os dados foram coletados em três fontes principais: EPTC (2018), IBGE (2010) e Datapoa (2020). Ainda, destaca-se que os itens escolhidos se relacionam diretamente a atividade delimitada na presente pesquisa pertencendo a dois grandes eixos: mobilidade e dinâmicas relacionadas a ela. A fim de examinar e expressar as particularidades de ambas, foi utilizada como a ferramenta a georreferenciação de dados por meio da plataforma SIG.

3.2.1.1 Análise espacial Porto Alegre

Acessibilidade é uma área crucial do transporte e planejamento urbano, além de ser a base fundamental de um sistema de integrado (WU; HINE, 2003). Acessibilidade pode ser medida pela distância ou proximidade entre um destino e

paradas de transporte ou pela facilidade de acesso a esse local pela infraestrutura existente (WEBER, 2003).

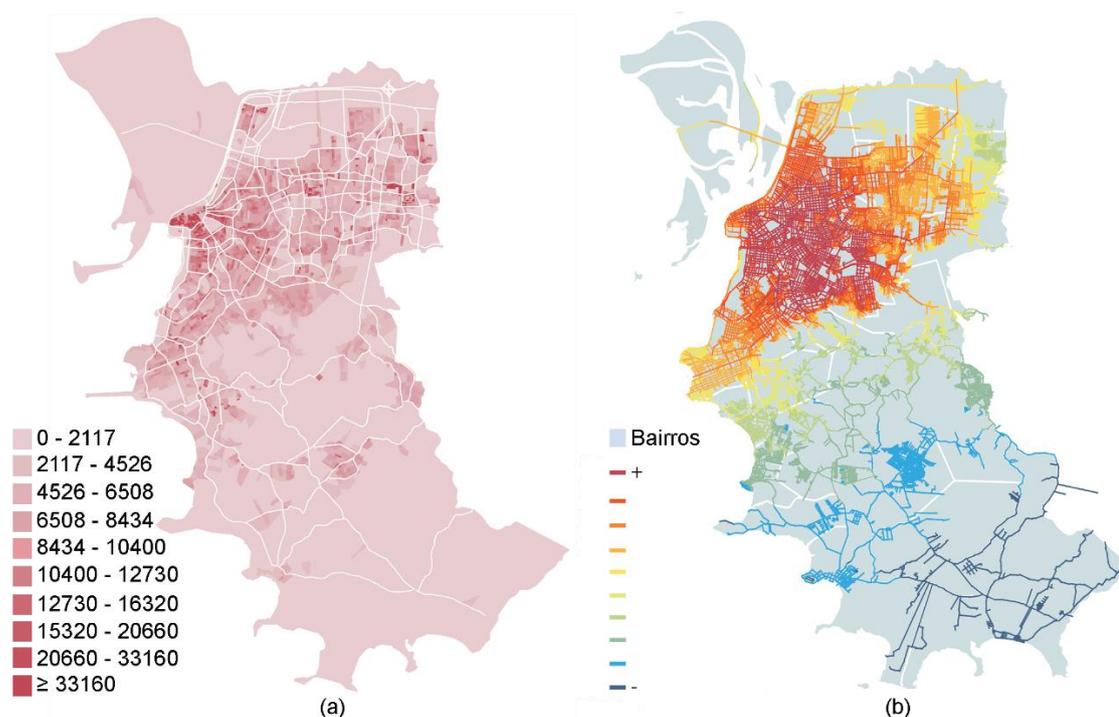
Por conseguinte, buscando compreender mais sobre a importância das vias da capital, e seu nível de acessibilidade perante a escala da cidade foi utilizada a ferramenta *interpolation* do software ArcGIS, para criar pontos médio ao longo dos trechos de via da cidade, atribuindo valores de conectividade aos pixels. A Figura 17 ilustra essa avaliação por meio da simbologia em 10 classes para melhor visualização dos locais que apresentam menor ou maior acessibilidade dentro dos limites da cidade de Porto Alegre, tendo em vista também o perímetro a nível de vizinhança. De acordo com o mapa, é perceptível que a zona do centro apresenta destaque, além disso percebe-se uma convergência entre as zonas com maior número de arteriais e a acessibilidade, sendo notável uma separação do eixo zona sul.

Além disso, para apoiar o desenvolvimento de políticas que reduzam as emissões negativas do transporte, por meio de incentivo a redução de viagens individuais e promoção do uso de transporte público, é necessário entender melhor a densidade populacional. Identificar áreas com alta densidade permite identificar os locais para enfoque de políticas de redução de emissões a curto prazo e focar estratégias de incentivo ao uso de transporte coletivo para usuários que precisam viajar distâncias mais curtas, levando a menores emissões de CO₂ per capita (MISHALANI et al., 2014)

Nesse sentido, uma especulação a respeito da densidade em Porto Alegre é feita a partir de dados do Censo Demográfico de 2010. Analisando a

Figura 17 é possível perceber uma maior densificação nas áreas no entorno dos eixos estruturais da cidade. Além disso, como esperado, há um maior acúmulo populacional na zona central, além de uma elevada alocação na zona norte e leste, com fragmentação de ocupação perceptível na zona sul. Ainda, em referência às arteriais, é factível afirmar a existência de uma ocupação concentrada e que vai diminuindo a partir das perimetrais.

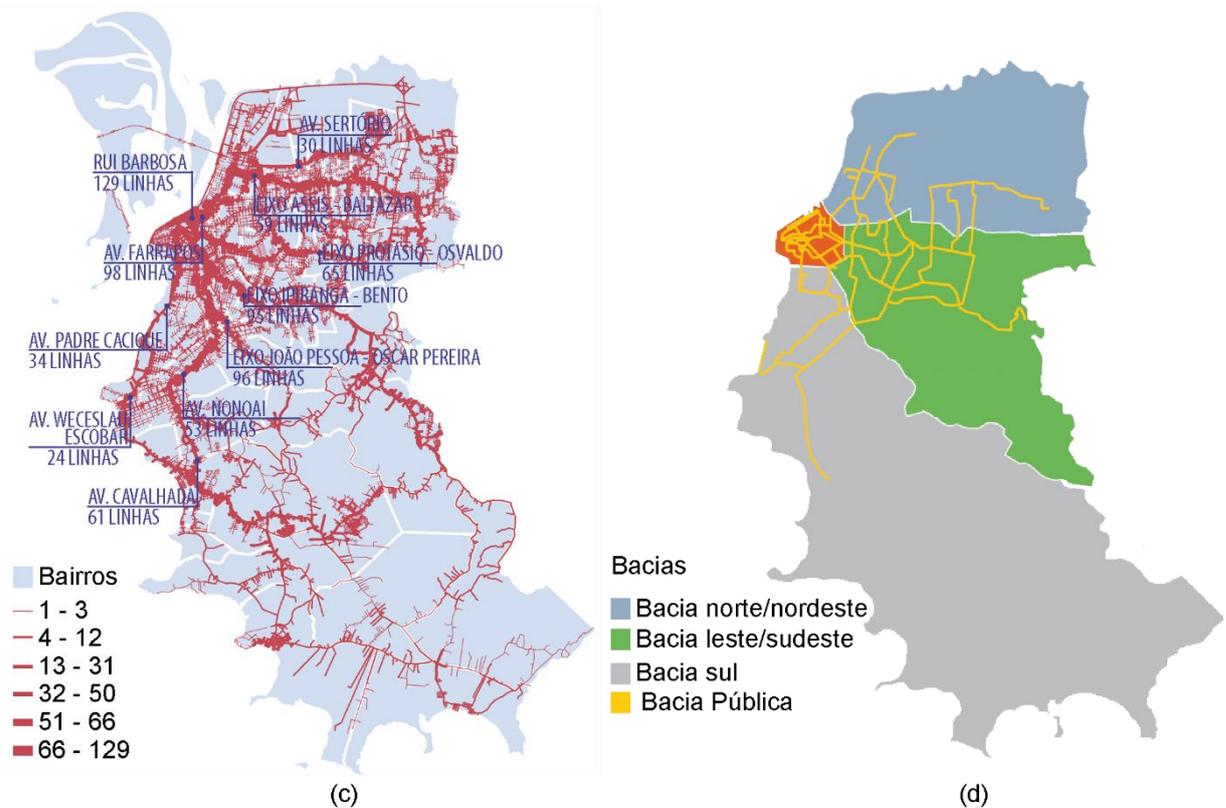
Figura 17 – Mapeamento Porto alegre a partir da delimitação por bairro: Diagnóstico
 - (a) densidade (hab/km²); (b) acessibilidade (interpolação).



Fonte: Autor.

Ainda, buscando compreensão sobre a correlação com a infraestrutura viária e o transporte coletivo municipal, foi feita uma análise com o programa ArcGis, utilizando a ferramenta *Spatial Join*. Com dados fornecidos pela EPTC foi possível obter uma noção das linhas municipais que circulam na capital, ao todo foi considerado na análise os trajetos de ida de 385 linhas de ônibus. As mesmas, foram agregadas a dados das vias de Porto Alegre obtidos pelo DATAPOA. Subsequentemente, foi dado um valor de 10 m de alcance para identificação entre os eixos e linhas de ônibus considerando a leve divergência entre as coordenadas dos entre as fontes: EPTC (linhas) e SMAM (vias). A Figura 18 demonstra os resultados obtidas.

Figura 18 - Diagnóstico - (c) Linhas de ônibus; (d) Bacias de ônibus



Fonte: Autor.

Por fim, salienta-se que a assinatura do contrato de licitações do transporte público em 2015 criou um *status quo* com o sistema sendo agora dividido em 6 lotes de operação, além da Carris. Os lotes 1 e 2, da região Norte/Nordeste, administrados pelo consórcio Mob Mobilidade; os lotes 3 e 4, da Bacia Sul, pelo consórcio Sul; e os lotes 5 e 6, da parte Leste/Sul controlados pelo consórcio Vialeste e Mobilidade da Área Integrada Sudeste. O consórcio Mob Mobilidade em Transportes é composto pelas empresas Sopal, Nortran e Navegantes, que compunham o antigo consórcio Conorte; o consórcio Sul, por sua vez, é composto pelas empresas Trevo, VTC, Belém Novo e Restinga, que pertenciam anteriormente ao consórcio STS (PMPA, 2015). Na Figura 18 é possível visualizar essas distribuições no território Porto-alegrense e as relações entre si. Aqui se destaca uma das motivações na escolha da Carris como objeto do estudo de caso, já que sua relação com todas as regiões da cidade, caráter

público, acessibilidade pela grande maioria dos habitantes e posição estratégica em eixos estruturais com alta densificação foram fortes motivadores na escolha.

3.3 Objetivo e Escopo

Na abordagem de ACV territorial, o fluxo de referência é pré-definido pela associação do território estudado dentro de suas fronteiras geográficas com cenários de transição de atividades dentro desse mesmo espaço (LOISEAU et al., 2014).

Por conseguinte, com base no valor e necessidade do sistema de transporte público, esta ACV visa comparar os potenciais impactos ambientais relacionados a cenários de substituição de ônibus convencionais (OC) por elétricos (OE) dentro das fronteiras da cidade de Porto Alegre. O escopo da análise inclui a produção de veículos, combustíveis, eletricidade, baterias e manutenção ao longo da vida útil. Ainda, salienta-se que com a introdução dos OE, o dinamismo do sistema é levado em conta, já que a substituição de uma tecnologia antiga por uma nova não ocorre imediatamente, mas é distribuído ao longo do tempo.

O estudo é baseado em dados de um lote de ônibus existente (nº 7), com tipo de veículo, eficiência e dados de operação fornecidos pela operadora de ônibus local, Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC). A Carris, entidade pública licenciada para prestar serviço de transporte municipal, foi escolhida por sua influência quantitativa na frota de Porto Alegre. Ao todo, são 342 veículos divididos em 37 linhas diferentes que, em um mês base, outubro de 2018, realizam 88.202 viagens e transportam 5.085.869 passageiros (PMPA, 2018).

Outra razão pela qual a Carris foi selecionada deveu-se à estreita relação do fornecedor com os veículos elétricos, tendo sido o principal local de testes da empresa chinesa BYD (*Build Your Dreams*) em 2016, que opera e implementa tais tecnologias em várias cidades do mundo (COMUNELLO, 2022). Assim, uma transição gradual do atual OC para OE é avaliada. Além disso, considera-se o aumento gradual do teor de biodiesel misturado ao óleo diesel conforme previsto na Resolução CNPE nº 16 (ANP, 2018) e variações na participação por fonte a partir de mudanças na matriz brasileira como ilustrado nas Tabela 7 e Tabela 8.

3.3.1 Cenários

Para o desenvolvimento da ACV, foram criados três cenários buscando verificar os impactos operacionais no transporte público. Tais cenários foram escolhidos por contribuírem na implementação de estratégias verdes e trazerem à tona a possibilidade de transição para uma frota mais sustentável. Tal realidade ocorre principalmente porque há uma mensuração dos impactos da mudança de frota ao longo dos anos.

Os ônibus examinados correspondem a 20,72% da frota total de veículos em circulação dentro de Porto Alegre. Além do número total de veículos em operação, e sua gradual substituição ao longo do tempo, outras variáveis atreladas aos cenários são consideradas, as mesmas são descritas detalhadamente abaixo e especificadas na Tabela 6 e 7. Por último, salienta-se que todas as variáveis são dependentes a substituição de ônibus ao longo do tempo.

- Substituição de veículos da frota (n°): Considera-se a vida útil dos veículos, 14 anos (EPTC, 2018) nos cenários 1 e 2. Em contrapartida, no cenário 3, são levados em conta critérios presentes no Edital nº 01/2015 - SMT (PMPA, 2015) que define a substituição de 10% da frota anualmente;
- Aquisição de baterias(n°): Assume-se que as peças são adquiridas no ano correspondente que novos OE são introduzidos à frota. Ainda, destaca-se que as baterias são substituídas a cada quatro anos de acordo com dados de literatura e de rodagem junto à empresa licenciada (GARCÍA SÁNCHEZ et al., 2013);
- Transporte (ton.km) : (1) Veículos: Considera-se a distância da origem (Volvo) até a garagem da Carris, levando em conta dados de massa provenientes da fabricante; (2) Combustível: Distância da refinaria mais próxima (Refap) até a garagem da empresa Carris e massa específica do combustível. A descrição completa dos trajetos consta no subcapítulo 3.4.2.

- Manutenção(n°): Tendo em vista a vida útil dos veículos, foi considerada uma manutenção total como valor de referência para 14 anos. O valor está de acordo com dados secundários provenientes da versão Ecoinvent 3.6, “*maintenance bus, RoW*”, levando em conta a energia elétrica média utilizada e uso de insumos e componentes durante o período de vida avaliado.
- Fonte energética: Variação dos quantitativos de biodiesel na mistura de acordo com a Resolução CNPE nº 16 (ANP, 2018) que define o aumento de 1% de biodiesel ao ano (B10 – 10% em 2018 a B15 - 15% em 2023). Assim como define a normativa, na Tabela 6, o valor é estagnado em 2023, quando as previsões da resolução cessam. Outro aspecto a ser considerado são as mudanças anuais de contribuição por fonte na matriz elétrica brasileira. A Tabela 7 demonstra as mudanças entre 2020 e 2050 a partir de dados provenientes do Centro Clima (2018).

Tendo como base as variáveis descritas acima, os cenários analisados estão expostos ao abaixo e representados na Tabela 6 que mostra mudanças na frota de ônibus de 2020 a 2050 a partir das variáveis anteriormente descritas.

- 1) BAU (Business as usual): Análise dos impactos no uso de OC considerando diesel S10 misturado com teor de biodiesel como combustível, conforme Resolução CNPE nº 16 (ANP, 2018). Substituição de OC por OE são consideradas levando em conta o fim de vida do veículo, 14 anos (GZH, 2019).
- 2) EL1 (Elétrico 1): Cenário em que o aumento do biodiesel na mistura e a substituição gradual de OC para OE ocorre paralelamente, de acordo com o fim de vida do veículo, 14 anos (GZH, 2019). Como resultado, uma substituição total da frota para OE ocorre em 2029.
- 3) EL2 (Elétrico 2): Cenário em que ocorre o aumento do biodiesel e a substituição de 10% ao ano de OC para OE, conforme Edital nº 01/2015 -

SMT (PMPA, 2015) que delimita dois critérios: (i) renovação de pelo menos 10% da frota a cada ano; (ii) idade média máxima da frota de 5 anos.

Ademais, os impactos operacionais são verificados por meio de mudanças na fonte de energia do veículo ao longo do período analisado. Concomitante, acontece a apuração de mudanças na geração de energia elétrica ao longo dos anos, cuja contribuição se torna mais significativa com o aumento de OE na frota. Nesse sentido, salienta-se que as variáveis dos cenários EL1 e EL2 são transitórias e nenhuma condição de estado estacionário existe, uma vez que o número de veículos fabricados, em uso e sendo descartados muda ano a ano. Assim, utiliza-se abordagem similar a FIELD et al. (2000) em que a partir de uma análise dinâmica de frota, considera-se que os produtos de linha de base (OC, Mistura B12) em uso são gradualmente substituídos por um novo lote de produtos (OE, Eletricidade).

A escolha por uma abordagem de frota se deu pela aderência a políticas públicas em vigor. Ademais, buscou-se coerência na avaliação dos impactos ambientais de cenários alternativos, com o dinamismo atrelado às variáveis estudadas, como consumo de combustível, substituição de veículos e contribuição de fontes energéticas no contexto brasileiro.

Por fim, vale ressaltar que o estudo não leva em consideração a possível necessidade de crescimento do número de veículos devido à demanda inesperada. Tal decisão foi tomada considerando a complexa análise que precisaria ser agregada a tal projeção e a falta de dados disponíveis no momento da execução desta análise. Também é essencial acrescentar que a vida útil do ônibus e suas substituições, tal como a de baterias no OE foram incluídas nos cenários (COONEY; HAWKINS; MARRIOTT, 2013).

Tabela 6 - Cenários de mudanças ao longo do tempo segundo variáveis propostas*.

Ano	BXX ¹	Substituição de veículos (nº/ano) ²			Aquisição de baterias (unidades/ano) ³		Transporte (ton.km) ⁴			Manutenção (nº) ⁵				
		BAU	EL1	EL2	EL1	EL2	BAU	EL1	EL2	BAU	EL1		ELE2	
		OC	OE	OE	EL1	EL2	BAU	EL1	EL2	BAU	OC	OE	OC	OE
2020	B12	58	58	34	58	34	1,25+02	1,13+02	9,10+01	24	20	4	22	2
2021	B13	29	29	31	29	31	1,05+02	8,72+01	8,28+01	24	18	6	20	4
2022	B14	57	57	28	57	28	1,26+02	9,18+01	7,49+01	24	15	10	18	6
2023	B15	44	44	25	44	25	1,17+02	7,18+01	6,76+01	24	11	13	16	8
2024	B15	74	74	22	132	56	1,38+02	7,36+01	6,09+01	24	6	18	14	10
2025	B15	15	15	20	44	51	9,66+01	2,87+01	5,52+01	24	5	19	13	11
2026	B15	15	15	18	72	46	9,66+01	2,34+01	4,97+01	24	4	20	12	12
2027	B15	50	50	16	44	41	1,21+02	4,80+01	4,47+01	24	4	20	10	14
2028	B15	0	0	15	182	71	8,61+01	0,00+00	4,06+01	24	0	24	9	15
2029	B15	0	0	13	44	64	8,61+01	0,00+00	3,64+01	24	0	24	8	16
2030	B15	0	0	12	72	58	8,61+01	0,00+00	3,29+01	24	0	24	7	17
2031	B15	0	0	11	44	86	8,61+01	0,00+00	2,96+01	24	0	24	7	17
2032	B15	0	0	10	182	112	8,61+01	0,00+00	2,67+01	24	0	24	6	18
2033	B15	0	0	9	44	101	1,27+02	0,00+00	2,40+01	24	0	24	5	19
2034	B15	58	58	42	72	91	1,06+02	4,07+01	4,54+01	24	0	24	4	20
2035	B15	29	29	38	44	115	1,26+02	2,03+01	4,12+01	24	0	24	4	20
2036	B15	57	57	34	182	138	1,17+02	4,00+01	3,71+01	24	0	24	3	21
2037	B15	44	44	31	44	124	1,38+02	3,08+01	3,33+01	24	0	24	3	21
2038	B15	74	74	27	72	112	9,66+01	5,19+01	2,96+01	24	0	24	3	21
2039	B15	15	15	25	44	135	9,66+01	1,05+01	2,68+01	24	0	24	2	22
2040	B15	15	15	22	182	155	1,21+02	1,05+01	2,41+01	24	0	24	2	22
2041	B15	50	50	20	44	140	8,61+01	3,51+01	2,16+01	24	0	24	2	22
2042	B15	0	0	18	72	160	8,61+01	0,00+00	1,98+01	24	0	24	2	22
2043	B15	0	0	16	44	178	8,61+01	0,00+00	1,75+01	24	0	24	2	22
2044	B15	0	0	15	182	195	8,61+01	0,00+00	1,59+01	24	0	24	1	23
2045	B15	0	0	13	44	176	8,61+01	0,00+00	1,44+01	24	0	24	1	23
2046	B15	0	0	12	72	192	1,27+02	0,00+00	1,29+01	24	0	24	1	23
2047	B15	0	0	11	44	207	1,06+02	0,00+00	1,16+01	24	0	24	1	23
2048	B15	58	58	44	182	220	1,26+02	4,07+01	3,43+01	24	0	24	1	23
2049	B15	29	29	40	44	198	1,17+02	1,75+01	3,11+01	24	0	24	1	23
2050	B15	57	57	36	72	213	1,38+02	4,21+01	2,81+01	24	0	24	1	23

Legenda: ¹XX se refere ao percentual de biodiesel no diesel; ²a substituição de veículos ocorre de acordo com as definições dos cenários; ³nas substituições de baterias são somados o número de baterias para veículos novos e as substituições ao longo da vida útil dos veículos; ⁴ representa a soma dos valores de transporte de veículos e combustível; ⁵nos dados de manutenção é considerada a vida útil dos veículos, havendo uma manutenção completa ao longo dos 14 anos.* as variações de tipologia de veículo e eficiência são descritas na Tabela 8.

Fonte: Autor

Tabela 7 – Percentual de contribuição matriz elétrica ao longo dos anos (%).

Fonte Ano	Cana- de açúcar	Bagaço	Hidro	Eólica	Gás natural	Óleo	Carvão	Nuclear	Solar	Importação
2020	1,20	8,50	70,20	8,00	5,50	0,00	1,30	3,40	1,00	0,90
2021	1,20	8,30	70,30	8,00	5,40	0,00	1,30	3,30	1,30	0,90
2022	1,20	8,10	70,70	8,00	5,20	0,00	1,20	3,20	1,50	0,90
2023	1,30	7,80	70,50	8,10	5,10	0,10	1,20	3,20	1,90	0,80
2024	1,30	7,60	70,90	8,10	4,90	0,10	1,10	3,10	2,10	0,80
2025	1,30	7,40	71,00	8,10	4,80	0,10	1,10	3,00	2,40	0,80
2026	1,60	7,40	70,10	8,30	4,80	0,20	1,10	3,00	2,60	0,90
2027	1,80	7,50	69,20	8,40	4,80	0,30	1,20	3,00	2,90	0,90
2028	2,00	7,50	68,40	8,60	4,80	0,30	1,20	3,00	3,20	1,00
2029	2,30	7,60	67,40	8,70	4,80	0,40	1,30	3,10	3,40	1,00
2030	2,60	7,60	66,50	8,90	4,80	0,50	1,30	3,10	3,70	1,00
2031	2,60	7,40	66,30	9,00	4,80	0,40	1,20	3,00	4,20	1,10
2032	2,70	7,30	66,00	9,20	4,90	0,30	1,10	2,90	4,60	1,00
2033	2,70	7,10	65,80	9,30	4,90	0,30	0,90	2,90	5,10	1,00
2034	2,80	7,00	65,40	9,50	5,00	0,20	0,80	2,80	5,50	1,00
2035	2,80	6,80	65,30	9,60	5,00	0,10	0,70	2,70	6,00	1,00
2036	2,90	6,60	64,50	9,60	5,00	0,10	0,90	2,70	6,40	1,30
2037	2,90	6,40	63,00	9,60	5,10	0,10	1,10	2,60	7,80	1,40
2038	3,00	6,20	62,20	9,60	5,20	0,00	1,20	2,60	8,30	1,70
2039	3,00	6,00	60,70	9,60	5,30	0,00	1,40	2,60	9,70	1,70
2040	3,10	5,80	59,90	9,60	5,40	0,00	1,60	2,60	10,10	1,90
2041	3,20	5,80	58,90	9,70	5,40	0,00	1,70	2,70	10,70	1,90
2042	3,20	5,70	58,10	9,80	5,40	0,00	1,80	2,80	11,30	1,90
2043	3,30	5,70	57,00	9,80	5,50	0,10	1,80	2,80	12,10	1,90
2044	3,30	5,60	56,20	9,90	5,50	0,10	1,90	2,90	12,70	1,90
2045	3,40	5,60	55,20	10,00	5,50	0,10	2,00	3,00	13,30	1,90
2046	3,50	5,50	55,10	10,20	5,10	0,10	1,90	2,90	13,90	1,80
2047	3,60	5,50	54,70	10,40	4,70	0,10	1,90	2,90	14,40	1,80
2048	3,80	5,40	54,40	10,60	4,30	0,00	1,80	2,90	15,00	1,80
2049	3,90	5,40	53,80	10,90	4,10	0,00	1,80	2,80	15,50	1,80
2050	4,00	5,30	53,70	11,10	3,70	0,00	1,70	2,70	16,10	1,70

Fonte: (CENTRO CLIMA, 2018).

3.3.2 Fronteiras do sistema e unidade funcional

Em relação aos aspectos que influenciam os fatores de emissão, a fase de uso do ônibus gera a maior parte das emissões atmosféricas, principalmente devido às emissões de combustão nesta tipologia de motor e devido à vida útil desses veículos (CHESTER et al., 2013).

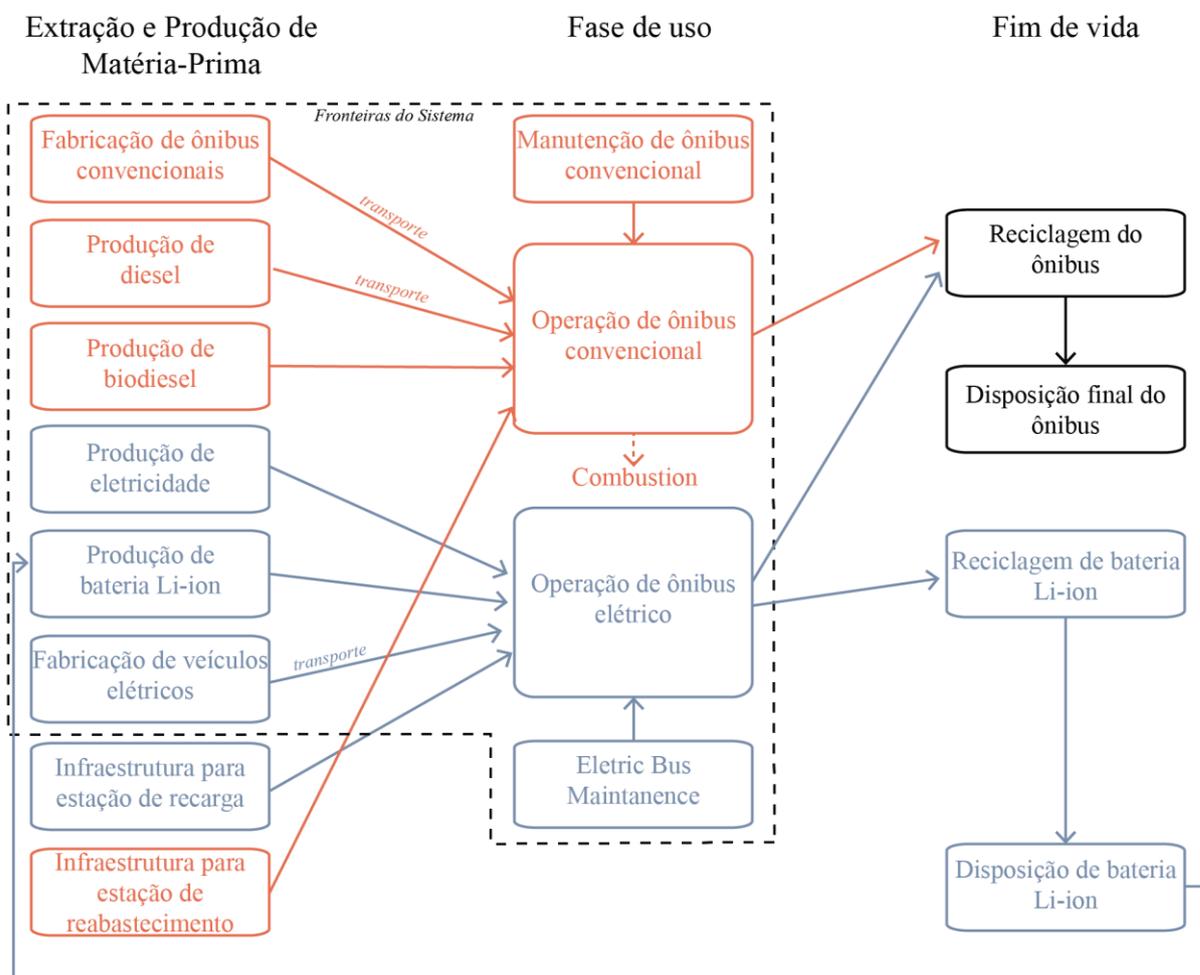
No entanto, mesmo tendo o combustível fóssil como uma das principais fontes de energia presentes neste estudo, a substituição de grande parte dos veículos alcançando seu limite de vida útil nos próximos anos e a transição gradual para eletrificação da frota e potencial redução dos impactos operacionais do estudo, amplia a avaliação para um escopo limitado de berço ao túmulo considerando a frota da Carris em sua totalidade. Assim, as fronteiras do sistema passam a ser definidas com enfoque na fase de operação e fabricação do veículo considerando a produção de energia e componentes, como o combustível, a energia consumida para operar os ônibus urbanos ou matéria prima para produção do ônibus.

As etapas de infraestrutura, bem como o fim de vida, foram desconsideradas, conforme especificado por CHESTER et al. (2013a), uma vez que a ausência de dados coletados localmente pode aumentar as incertezas do resultado (DA SILVA; SOBRINHO; DE SOUZA, 2018). Assim, no que diz respeito ao impacto dos veículos, estão incluídos a substituição de ônibus, manutenção e transporte do mesmo até a garagem da Carris, assim como a produção e substituição de baterias. No que diz respeito aos postos de carregamento, a sua localização seria em logradouros públicos em parques de estacionamento de autocarros espalhados por várias regiões da cidade, no caso da Carris a área situa-se no bairro Partenon na zona leste da capital gaúcha. Em relação a impactos agregados a fontes de energia na fase operacional, estão incluídos os impactos na produção, transporte e consumo (durante a operação); para o cenário de eletrificação foi considerada a geração de energia para recarga de veículos elétricos dentro da zona de delimitação geográfica definida: a cidade de Porto Alegre.

Conforme mostra a Figura 19, não foram consideradas eventuais alterações de rotas, adaptações e manutenção da infraestrutura urbana. O descarte da bateria também foi desconsiderado devido às suas incertezas. No Brasil a maioria dos resíduos são acumulados em aterros sanitários, apesar disso a disposição final de

baterias é controlada pela Resolução CONAMA nº 401 (CONAMA, 2008). No entanto, um sistema de coleta de baterias recarregáveis ainda é tenro; portanto, é difícil avaliar sua taxa de sucesso (CROCCE et al. 2004), já que práticas atuais ainda apresentam deficiências (HOJAS BAENAS et al., 2011). Apesar disso, é importante ressaltar que o descarte de baterias de íon-lítio pode levar a cargas ambientais significativas, mas ainda há muito poucos estudos sobre os impactos correspondentes (ZHAO; YOU, 2019).

Figura 19 - Fronteiras do sistema.



Fonte: Autor.

Considerando a vastidão dos fatores, o impacto varia de acordo com a projeção de cenários onde: (i) veículos e baterias são substituídos na frota; (ii) distâncias são percorridas; (iii) manutenções são executadas; (iv) combustível e

veículos novos são transportados; (v) valores médios de eficiência ano mudam; (vi) trocas de combustível e tecnologias são propostas, a unidade comum considerada na operação dos veículos é km percorrido, considerando também trocas e manutenções anuais. No entanto, levando em conta os estoques e fluxos associados às variáveis ao longo do tempo, a unidade funcional leva em conta “o conjunto de unidades em serviço” (ou seja, o estoque), em vez de uma única unidade, e introduz explicitamente a noção de tempo, integrando no modelo de ciclo de vida a dinâmica associada à substituição de produtos antigos por novos produtos na frota (ou estoque de produtos).

Tal escolha conecta-se às feitas por GARCIA et al. (2015) e GUYON (2017) ambos salientam que ao invés de capturar um *snapshot*, a abordagem de frota é capaz de levar em conta as mudanças ao longo do tempo, facilitando o entendimento da contribuição dos diferentes processos e impactos ambientais agregados a transição tecnológica.

Ademais, na análise de sensibilidade do uso de veículo, se utiliza o quilômetro como UF, assim como foi feito na fase de operação, a qual considera os quilômetros percorridos ano para normalizar os dados das variadas fontes energéticas. Isso se correlaciona com NORDELÖF; ROMARE; TIVANDER (2019) que consideram que a Unidade Funcional (UF) de uma ACV completa é definida como um ciclo de vida do veículo, que é especificado por um número total de quilômetros percorridos por ano.

3.4 Inventário de Ciclo de Vida (ICV)

3.4.1 Dados Primários

3.4.1.1 Características da frota

Os dados de consumo de combustível, número de viagens e passageiros foram fornecidos pela EPTC (EPTC, 2018). Além disso, a base de dados da frota também foi disponibilizada e categorizada pelo prefixo dos veículos, identificando características individuais do “Lote 7” da Carris, como eficiência em litros/quilômetro (l/km), modelos de veículos, ano de fabricação, tipo de motor (EURO) e linha a qual pertence. Ademais, características específicas de cada veículo da frota foram fornecidas, como tipo de câmbio e presença ou não de ar-condicionado, ambos

fatores afetam diretamente a eficiência posteriormente calculada na definição dos cenários.

É possível perceber na Tabela 8 que 55% dos modelos foram produzidos previamente a 2010, sendo que 17% dos veículos entraram em circulação no ano de 2016 e tinham previsão de substituição em 2020. Nas substituições, dados referentes a vida útil de cada veículo foram considerados, a mesma estimada de 14 anos (UHEREK et al., 2010). É importante mencionar que a vida média da frota não tem conformidade com o Edital nº 01/2015 - SMT (PMPA, 2015), o qual prevê a idade média máxima da frota de 5 anos, isso não se concretiza, já que 85% dos veículos possuem idade superior a 5 anos.

Ao todo a frota da Carris é composta por 342 ônibus em circulação na capital gaúcha. Os dados disponíveis classificam a categoria de consumo de cada ônibus de acordo com tamanho, altura, posição do motor, presença de ar condicionado e tipo de câmbio (LEICHTER; HACKENHAAR; PASSUELLO, 2021). No ano referência, os veículos foram caracterizados por suas dimensões: Pesado (P), Trucado (T) ou Especial (P); posição motor: Dianteiro (D), Traseiro (T) ou Central(C) e presença ou não de ar condicionado (ac) e câmbio automático (cx).

Regulamentos de requisitos mecânicos para a compra de veículos novos na cidade foram historicamente revistos seguindo atualizações na regulamentação europeia de motores pesados. Conseqüentemente, novos ônibus devem ter motores Euro 5 ou superior, com combustão mais eficiente com menores fatores de emissão de material particulado. Apesar de tais avanços na transição do motor, vale a pena frisar que, à medida que os ônibus são substituídos, a eficiência geralmente diminui. Isso ocorre principalmente porque todos os veículos novos adquiridos possuem ar-condicionado, e a presença de câmbio automático também é recomendada. Ambas as características aumentam o consumo de combustível pelos veículos.

Considerando a Resolução EPTC nº2 de 2019 (EPTC, 2019), foi delimitado um padrão na troca dos veículos. Veículos estilo Pesado motor dianteiro, são repostos por veículos Pesado motor dianteiro com ar-condicionado. Da mesma maneira, veículos estilo Pesado motor traseiro sem ar-condicionado e câmbio automático ou manual são repostos pelos respectivos equivalentes, porém ambos com ar

condicionado. Veículos estilo Trucado motor dianteiro, Especial motor dianteiro e Especial motor central com câmbio automático serão repostos por veículos estilo Especial motor central com ar condicionado e câmbio automático. Aqueles originalmente, Especial motor traseiro com câmbio automático sem ar, são substituídos por veículos similares, contudo, com ar-condicionado. A mudança a partir de tais suposições é representada nas Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 que ilustram transições nos três cenários cotados. Tais tabelas, descrevem a substituição de ônibus ao longo dos cenários expostos no subcapítulo 3.3.1.

Ainda, salienta-se que a distância adotada para a fase de uso dos veículos do estudo foi baseada na vida média de um ônibus da Carris na capital gaúcha que é de 842.268 km (EPTC, 2018). Nesse sentido, o valor de distância anual percorrida por veículo é identificado como 60.162 km. Com esses dados e com a eficiência dos modelos de ônibus por ano, é possível determinar a quantidade total de combustível ou eletricidade consumida em cada cenário.

É necessário destacar que esse valor e o número de veículos da frota são estagnados para todos os anos projetados. Da mesma forma, alterações no consumo devido à variação de capacidade (número de passageiros transportados) também foram excluídas neste estudo, esta abordagem justifica-se porque os dados primários fornecidos pelo EPTC são dados médios sem informação sobre esta variação.

Outro fator concordante a esses cortes foi a imprecisão atrelada a um prognóstico futuro, levando em conta que informações pertinentes aos últimos dois anos não podem ser utilizadas como referência. O isolamento e redução na circulação de veículos durante o período entre 2020 e 2022 cria incertezas em relação à circulação de veículos, padrões de viagem e adesão de passageiros em um cenário pós-pandêmico. Tal fato, conseqüentemente, apoia as decisões de fixação de valores de um ano típico pré-pandemia.

Tabela 8 - Fabricação de veículos na frota da empresa Carris ao longo do tempo e eficiência e modelo do veículo.

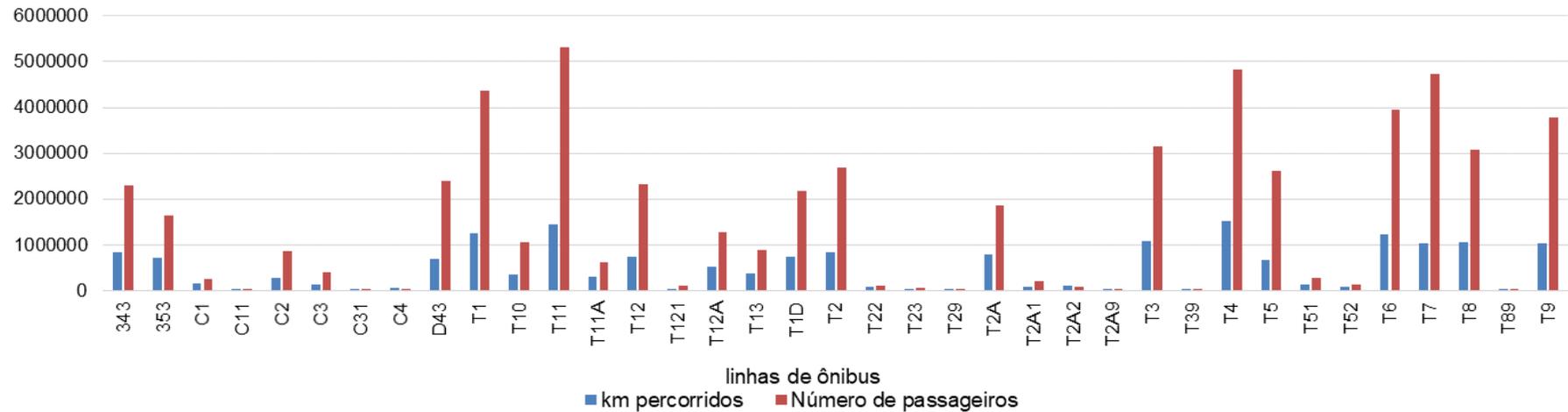
Tipologia Modelo	Convencional										Total veículos produzidos ano	
	PD	PD Ar	PT Ar Cx	PT Ar	PT Cx	TD	EC Ar Cx	EC Cx	ET Ar Cx	ET Cx		
Ano												
2006	51	1	0	0	0	6	0	0	0	0	0	58
2007	29	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	29
2008	0	0	0	0	42	0	0	15	0	0	0	57
2009	0	0	44	0	0	0	0	0	0	0	0	44
2010	0	0	62	0	0	0	0	0	0	0	12	74
2011	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	15
2012	0	0	0	0	0	0	13	2	0	0	0	15
2014	0	0	0	35	0	0	15	0	0	0	0	50
Consumo (l/km)	3,98-01	4,43-01	5,53-01	4,89-01	5,32-01	4,32-01	7,80-01	7,41-01	7,29-01	7,08-01		
Ano Base (2018)												

Legenda:

*Tipo de veículos: Pesado(P) ou Especial(P); Posição motor: Dianteiro(D); Traseiro(T); ou Central(C); Possui ar condicionado: "ar"; câmbio automático: cx".

Fonte: Autor, baseado em dados de EPTC (2018).

Figura 20 - Estimativa do número de passageiros e quilômetros percorridos por linha individual considerando o ano referência.



linhas de ônibus

■ km percorridos ■ Número de passageiros

Fonte: Autor.

Tabela 9 - Cenário 1 (BAU) de mudanças na frota ao longo do tempo segundo variáveis de eficiência e modelo do veículo.

Tipologia Modelo	Convencional									Total Convencionais	Eficiência (l/km)
	PD	PD Ar	PT Ar Cx	PT Ar	PT Cx	EC Ar Cx	EC Cx	ET Ar Cx	ET Cx		
Ano											
2020	29	52	106	35	57	34	17	0	12	342	5,45+01
2021	0	81	106	35	57	34	17	0	12	342	5,55+01
2022	0	81	148	35	15	49	2	0	12	342	5,60+01
2023	0	81	148	35	15	49	2	0	12	342	5,60+01
2024	0	81	148	35	15	49	2	12	0	342	5,61+01
2025	0	81	163	35	0	49	2	12	0	342	5,62+01
2026	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2027	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2028	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2029	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2030	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2031	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2032	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2033	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2034	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2035	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2036	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2037	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2038	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2039	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2040	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2041	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2042	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2043	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2044	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2045	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2046	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2047	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2048	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2049	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
2050	0	81	163	35	0	51	0	12	0	342	5,62+01
Consumo (l/km)	3,98-01	4,43-01	5,53-01	4,89-01	5,32-01	7,80-01	7,41-01	7,29-01	7,08-01	4,72-01	

Legenda:*Tipo de veículos: Pesado(P) ou Especial(P); Posição motor: Dianteiro(D); Traseiro(T); ou Central(C); Possui ar condicionado: "ar"; Possui câmbio autom: "cx".

Fonte: Autor

Tabela 10 - Cenário 2 (EL1) de mudanças na frota ao longo do tempo segundo variáveis de eficiência e modelo do veículo.

Modelo	Convencional										Elétrico		Total Veículos	
	PD	PD Ar	PT Ar Cx	PT Ar	PT Cx	EC Ar Cx	EC Cx	ET Ar Cx	ET Cx	Total Convencionais	Eficiência (l/km)	Volvo 7900		Eficiência (kWh/km)
Ano														
2020	29	0	106	35	57	28	17	0	12	284	5,66E-01	58	1,27E+00	342
2021	0	0	106	35	57	28	17	0	12	255	5,85E-01	87	1,27E+00	342
2022	0	0	106	35	15	28	2	0	12	198	5,85E-01	144	1,27E+00	342
2023	0	0	62	35	15	28	2	0	12	154	5,94E-01	188	1,27E+00	342
2024	0	0	0	35	15	28	2	0	0	80	6,07E-01	262	1,27E+00	342
2025	0	0	0	35	0	13	2	0	0	65	6,25E-01	277	1,27E+00	342
2026	0	0	0	35	0	13	2	0	0	50	5,76E-01	292	1,27E+00	342
2027	0	0	0	35	0	0	0	0	0	50	5,76E-01	292	1,27E+00	342
2028	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2029	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2030	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2031	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2032	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2033	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2034	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2035	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2036	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2037	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2038	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2039	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2040	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2041	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2042	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2043	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2044	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2045	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2046	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2047	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2048	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2049	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
2050	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	5,76E-01	342	1,27E+00	342
Consumo (l/km)	3,98-01	4,43-01	5,53-01	4,89-01	5,32-01	7,80-01	7,41-01	7,29-01	7,08-01	4,72-01				

Legenda: *Tipo de veículos: Pesado(P) ou Especial(P); Posição motor: Dianteiro (D); Traseiro (T); ou Central(C); Possui ar condicionado: "Ar"; Possui câmbio automático: "cx"; Volvo 7900 tirado de Nordelof (2014); a eficiência do veículo elétrico é constante considerando apenas alterações nas fontes.

Fonte: Autor

Tabela 11 - Cenário 3 (EL2) de mudanças na frota ao longo do tempo segundo variáveis de eficiência e modelo do veículo.

Tipologia	Convencional										Elétrico		Total Veículos	
	Modelo	PD	PD Ar	PT Ar Cx	PT Cx	EC Ar Cx	EC Cx	ET Ar Cx	ET Cx	Total Convencionais	Eficiência (l/km)	Volvo 7900		Eficiência (kWh/km)
Ano														
2020	52	1	106	35	57	28	17	0	12	308	5,66E-01	34	1,27E+00	342
2021	15	1	106	35	57	28	17	0	12	271	5,85E-01	65	1,27E+00	342
2022	0	0	106	35	15	28	17	0	12	249	5,85E-01	93	1,27E+00	342
2023	0	0	106	35	15	28	2	0	12	224	5,94E-01	140	1,27E+00	342
2024	0	0	104	35	15	28	2	0	12	202	6,07E-01	160	1,27E+00	342
2025	0	0	104	35	0	28	2	0	12	182	6,25E-01	178	1,27E+00	342
2026	0	0	89	35	0	28	0	0	12	164	5,76E-01	194	1,27E+00	342
2027	0	0	85	35	0	28	0	0	0	148	5,76E-01	209	1,27E+00	342
2028	0	0	70	35	0	28	0	0	0	133	5,76E-01	222	1,27E+00	342
2029	0	0	57	35	0	28	0	0	0	120	5,76E-01	234	1,27E+00	342
2030	0	0	45	35	0	28	0	0	0	108	5,76E-01	245	1,27E+00	342
2031	0	0	34	35	0	28	0	0	0	97	5,76E-01	245	1,27E+00	342
2032	0	0	24	35	0	28	0	0	0	87	5,76E-01	255	1,27E+00	342
2033	0	0	15	35	0	28	0	0	0	78	5,76E-01	264	1,27E+00	342
2034	0	0	7	35	0	28	0	0	0	70	5,76E-01	272	1,27E+00	342
2035	0	0	0	35	0	28	0	0	0	63	5,76E-01	279	1,27E+00	342
2036	0	0	0	35	0	22	0	0	0	57	5,76E-01	285	1,27E+00	342
2037	0	0	0	35	0	16	0	0	0	51	5,76E-01	291	1,27E+00	342
2038	0	0	0	35	0	11	0	0	0	46	5,76E-01	296	1,27E+00	342
2039	0	0	0	35	0	6	0	0	0	41	5,76E-01	301	1,27E+00	342
2040	0	0	0	35	0	2	0	0	0	37	5,76E-01	305	1,27E+00	342
2041	0	0	0	33	0	0	0	0	0	33	5,76E-01	309	1,27E+00	342
2042	0	0	0	30	0	0	0	0	0	31	5,76E-01	312	1,27E+00	342
2043	0	0	0	27	0	0	0	0	0	27	5,76E-01	315	1,27E+00	342
2044	0	0	0	24	0	0	0	0	0	25	5,76E-01	318	1,27E+00	342
2045	0	0	0	22	0	0	0	0	0	22	5,76E-01	320	1,27E+00	342
2046	0	0	0	20	0	0	0	0	0	20	5,76E-01	322	1,27E+00	342
2047	0	0	0	18	0	0	0	0	0	18	5,76E-01	324	1,27E+00	342
2048	0	0	0	16	0	0	0	0	0	16	5,76E-01	326	1,27E+00	342
2049	0	0	0	14	0	0	0	0	0	15	5,76E-01	327	1,27E+00	342
2050	0	0	0	13	0	0	0	0	0	13	5,76E-01	325	1,27E+00	342
Consumo (l/km)	3,98-01	4,43-01	5,53-01	4,89-01	5,32-01	7,80-01	7,41-01	7,29-01	7,08-01	4,72-01				

Legenda: *Tipo de veículos: Pesado(P) ou Especial(P); Posição motor: Dianteiro (D); Traseiro (T); ou Central(C); Possui ar condicionado: "Ar"; Possui câmbio automático: "cx"; Volvo 7900 tirado de Nordelof (2014); a eficiência do veículo elétrico é constante considerando apenas alterações nas fontes.

Fonte: Autor

3.4.1.2 Dados espaciais

Dados *shapefile* de características populacionais e uso do solo na capital gaúcha, bem como linhas de transporte público foram coletados através de consulta a base aberta DataPOA (DATAPOA, 2020) e IBGE (IBGE, 2010). Informações a respeito de densidade (hab/ha), população (hab), área (ha), renda e número de postos de trabalho foram extraídos do censo demográfico de 2010. Assim como, aspectos específicos da cidade como índice de aproveitamento (IA) e regime volumétrico (RV) foram retirados do Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre (PMPA, 2011).

Dados de rotas foram fornecidos pela EPTC, após georreferenciados, as distâncias percorridas por cada linha foram estimadas, possibilitando a avaliação do impacto por trecho e a tomada de decisão caso fosse avaliada a substituição por rota de ônibus. Os dados georreferenciados com as distâncias percorridas foram agregados a tabelas contendo tabela horária de linhas e número de viagens, para que se pudesse ter uma estimativa do número de passageiros por linha em dado mês ou ano. Ademais, a densidade populacional na envoltória de cada linha também é estimada. O subcapítulo 3.2.1 especifica tais correlações.

Foram estimadas as variações mensais do tráfego de cada linha, buscando encontrar inconsistências ou padrões para possíveis definições nos cenários de eletrificação. Nesse sentido, os meses de janeiro e fevereiro são os que apresentam menor número de passageiros e quilômetros rodados, seguidos pelo mês de julho. No contexto da correlação das datas com recessos escolares, os valores aparentemente condizem com dinâmicas sociais reais. Nessas circunstâncias, os valores de passageiros são os que mais divergem entre si, a exemplo, fevereiro é o mês com menor número de usuários, apresenta em torno de 30% menos passageiros do que os meses em destaque. Em comparação, o mesmo mês apresenta valor similar de quilômetros rodados em relação aos demais com apenas 30.000 quilômetros o separando com o mês com maior distância rodada, equivalendo a 9% de diferenciação. Tais valores podem ser visualizados na

Figura 20.

Por fim, acontece a escolha do software ArcGIS v.10.5 para fins de modelagem dos dados coletados e cenários, bem como na criação e organização de uma *geodatabase* onde são escolhidas as variáveis a serem utilizadas nas fases subsequentes. Ainda, salienta-se que a análise e organização desse material foi preponderante na verificação da coerência das escolhas do subcapítulo 3.3.

3.4.2 Dados Secundários

A ACV para este estudo foi concluída combinando cinco fontes de dados principais, o banco de dados ecoinvent® v3.6 (ECOINVENT, 2018), dados da Empresa De Pública de Transporte e Circulação de Porto Alegre (EPTC, 2018) e da Prefeitura Municipal de Porto Alegre (PMPA, 2020), materiais da Empresa de Pesquisa Energética (BEN, 2021) e do Centro Clima (CENTRO CLIMA, 2018), além de literatura complementar.

Atualmente, todos os ônibus são movidos a diesel S10 (10ppm) com a substituição gradativa de sua forma pura por um maior percentual de biodiesel na mistura de acordo com a Resolução CNPE nº 16 (ANP, 2018). Para maior completude da análise, emissões de combustão foram calculadas com base nos fatores de emissão de GEE relatados no Balanço Nacional de Energia de 2021 (BEN, 2021) e da Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB,2021). Os valores acrescentados aos processos analisados estão descritos na Tabela 12, referentes à combustão de 1 kg do respectivo combustível. Ressalta-se que os valores são incorporados aos dados já existentes de diesel e biodiesel nacional presentes na base de dados Suíça e descritos no APÊNDICE B – Detalhamento inventário

Tabela 12 - Dados de emissões para combustão dos combustíveis diesel e biodiesel.

Fluxos de saída	1 kg de Diesel	1 kg de Biodiesel	Unidade
Dióxido de carbono fóssil	3,10E+03	0,00E+00	kg
Dióxido de carbono biogênico	0,00E+00	2,76E+03	kg
Hidrocarbonetos	3,25 E-05	6,48 E-05	kg
Metano biogênico	0,00E+00	3,77E-01	kg
Metano fóssil	1,65E-01	0,00E+00	kg
Óxido nitroso	1,65E-01	2,67E-02	kg
Partículas	5,25 E-05	1,90 E-05	kg

Fonte: (CETESB,2021); (BEN, 2021).

Destaca-se que os valores elevados de metano biogênico no biodiesel correlacionam-se ao próprio processo de produção do combustível, no qual as emissões podem ser muito variáveis, pois ou são usados carreadores de energia fóssil (bioetanol de milho americano) ou resíduos da produção agrícola são usados como energia de processo (bagaço no caso da cana-de-açúcar brasileira) (EMPA, 2007).

Ademais, levando em conta cenários de eletrificação, processos de produção de eletricidade foram coletados. O *dataset* utilizado “*market for electricity production, BR*” foi aberto e a energia produzida foi analisada por região e fonte. Os quantitativos presentes na base são originários do relatório 2014 da EPE (BEN, 2015), estes foram associados a prognósticos futuros calculados pelo Centro Clima (CENTRO CLIMA, 2018). Cabe ressaltar que foram ignoradas perdas e infraestrutura da produção de linhas à medida que a capacidade vai aumentando. Considerando que o *dataset* consta a produção de eletricidade de alta voltagem, a conversão para média foi considerada para permitir o carregamento do veículo. A ramificação dos *datasets* utilizados estão descrita no APÊNDICE B – Detalhamento inventário

A produção de veículos convencionais é feita considerando dois modelos base da marca Volvo: convencional (modelo - 8500) e elétrico (modelo - 7900). Em ambas as tipologias, o processo “*bus production, RoW*” foi adaptado à realidade nacional, como descrito no APÊNDICE B – Detalhamento inventário, e suplementado com valores presentes na literatura (NORDELÖF et al., 2013; NORDELÖF; ROMARE; TIVANDER, 2019). Para a avaliação do impacto do ciclo de vida da manutenção dos veículos, foram utilizados dados secundários provenientes da versão Ecoinvent 3.6, “*maintenance bus, RoW*”, levando em conta a energia elétrica média utilizada e uso de insumos e componentes durante o período de vida avaliado. Todavia, é necessário apontar que, considerando a manutenção de veículos elétricos, o *dataset* original foi alterado tendo como base fontes bibliográficas (NORDELÖF et al., 2013).

Em relação à bateria, íon-lítio é a mais utilizada em ônibus elétricos, apresentando 32 células (ERCAN; TATARI, 2015). Assumiu-se que as peças são substituídas a cada quatro anos por um intervalo de tempo que considera sua capacidade máxima de rodagem de 264.000 km (GARCÍA SÁNCHEZ et al., 2013). Com base na média anual de funcionamento do veículo descrito pela EPTC (EPTC,

2018), uma bateria consome 126,5kWh para cada 100km percorridos (ZHOU et al., 2016). Conseqüentemente, para encontrar os impactos do uso de baterias veiculares, o valor do impacto foi adaptado por meio de mudanças do processo 14 células para um exemplar de 32 células. Ademais, fontes de eletricidade, água e outros insumos contidos no *dataset* foram alterados para o contexto nacional. Também foi levado em consideração como estudos anteriores apontaram (VELANDIA VARGAS et al., 2019) que a célula da bateria dificilmente seria produzida no Brasil; portanto, assumiu-se que as células são importadas e a bateria é montada no país.

No que concerne o transporte, foram utilizados dados secundários baseados na literatura e na base de dados Ecoinvent, versão 3.6. Como descrito nas fronteiras do sistema (subcapítulo 3.3.2), foram inventariados os processos de produção do diesel (desde a extração ao produto final), produção do biodiesel, além da produção dos veículos.

Quanto ao transporte do combustível, presume-se que tenha como origem a refinaria mais próxima, Refap, e que o produto final seja transportado desse local até a garagem da empresa de ônibus através de caminhões pipa. Verificando a distância média como sendo a distância da Refap até a garagem da Carris, é identificado um percurso médio de 22,5 km. Ainda, é presumida a capacidade de um caminhão tanque de 30 mil litros e a densidade média do óleo diesel S10 de 0,834 g/mL (PETROBRAS, 2018). Sendo assim, uma massa média transportada de 25,02 toneladas por caminhão é estimada. Ademais, o número de caminhões e a distância total percorrida ao ano é avaliada a partir dos valores de combustível consumido por cenário. Tendo-se 22,5 km percorridos, segundo os cálculos da base de dados o valor a ser inserido na análise é de:

$$Ton * km = (25,02 * 22,5) * 1/2520 = 0,022 \text{ metric ton} * km$$

Equação 1

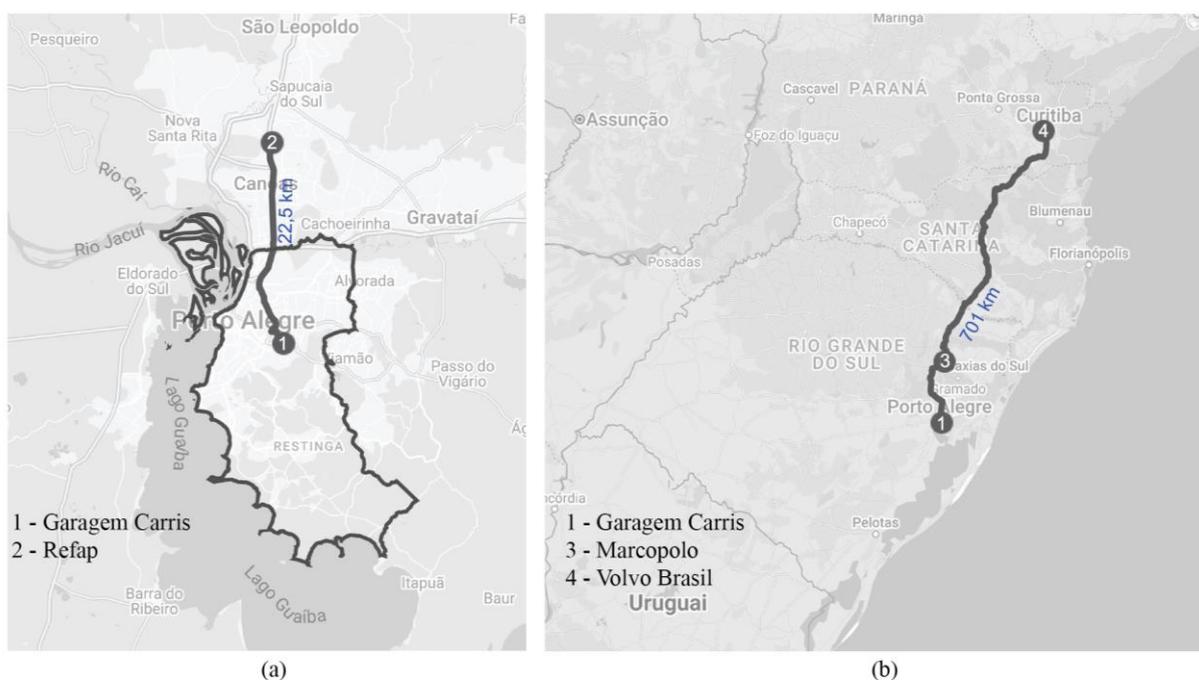
No que diz respeito ao transporte dos veículos, novamente se tem como destino a garagem da Carris. Além desse local, são presumidas a origem na fábrica da Volvo Brasil (Curitiba) e a montadora Marcopolo (Bento Gonçalves), totalizando 701 km percorridos. Ainda, é presumida a capacidade de até 23 toneladas de um caminhão prancha de três eixos e o peso de 19 toneladas para ambas as tipologias

de veículo (LAFIETE, 2021; VOLVO 2020). Portanto, segundo os cálculos da base (ECOINVENT, 2018) o valor a ser inserido na análise é de:

$$\text{Ton} * \text{km} = (19,00 * 701) * 1/19000 = 0,701 \text{ metric ton} * \text{km} \quad \text{Equação 2}$$

A partir dos resultados das Equações, o dado para transporte da base selecionado é “*transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6, RoW*”. Os quantitativos anuais de transporte são destacados no subcapítulo 3.3.1, os trechos são demonstrados na Figura 21.

Figura 21 - Trechos transporte (a) combustível, (b) ônibus.



Fonte: Autor.

3.5 Avaliação dos Impactos do Ciclo De Vida (AICV)

A etapa de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) foi realizada de acordo com o Norma ISO 14044 (ABNT, 2009). O método de caracterização aplicado foi o RECIPE versão 1.13 a partir de uma abordagem orientada a problemas (ponto médio) em uma estrutura hierárquica (H). A abordagem de ponto médio foi

selecionada na tentativa de reduzir a incerteza dos resultados (DONG; NG, 2014) e considerando que caracteriza as categorias de impacto com base em impactos que são causados diretamente por poluentes emitidos, ou seja, os impactos ambientais na fase intermitente do efeito de causa na forma de indicadores como dióxido de carbono (CO₂) e óxidos de nitrogênio (NO_x) (RATHORE; MONDAL, 2018).

A avaliação de impacto ambiental foi desenvolvida com o software OpenLCA versão 1.11. Das dezoito categorias de impacto descritas no método, quatro foram selecionadas: Potencial de Aquecimento Global (GWP); Depleção de Recursos Fósseis (FD), Toxicidade Humana (HT) e Formação de material particulado (PMF) foram selecionados para este estudo, pois as emissões contabilizadas estão relacionadas aos impactos ambientais mais recorrentemente utilizados em estudos de ACV de transporte conforme descrito no subcapítulo 2.1.4.5. GWP enfatiza o papel desempenhado nas mudanças climáticas, e representa o impacto ambiental em kg CO₂ equivalente, indicando estimativas emissões de CO₂, hidrocarbonetos e outros poluentes, relacionadas em um período de 100 anos (MUÑOZ et al., 2016). FD caracteriza o cenário atual de dependência de recursos fósseis e impactos de transição de fontes energéticas de recursos limitados, sendo expressa em *kg oil-Eq*. HT expressa a exposição das rotas com produtos químicos, com fator de caracterização levando em conta a persistência ambiental (destino), acúmulo no ser humano na cadeia (exposição) e toxicidade (efeito) de um produto químico. Em consenso, PMFP também considera efeitos relacionados à saúde humana com verificação de emissão de aerossóis primários e secundários de SO₂, NH₃ e NO_x (PRÉ Sustainability, 2016).

As categorias de impacto escolhidas para avaliação são relevantes para o sistema estudado, uma vez que a seleção segue uma abordagem em estudos de caso com tópicos semelhantes conforme descrito no Capítulo 2. Além disso, a escolha também correlaciona com uma ligação direta entre essas emissões e dois objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS): ODS 11 (relacionado a cidades e comunidades sustentáveis) e 13 (tomar medidas urgentes para clima de combate e seus impactos) e alguns indicadores específicos sugeridos pela ONU (ONU, 2015).

Ainda, para o procedimento de alocação, adotou-se o sistema cut-off, no qual todos os impactos levantados permanecem com o produto principal (ALLY; PRYOR,

2007). Os requisitos para os dados usados foram precisão, integridade e representatividade, consistência e facilidade de reprodução.

3.6 Interpretação dos resultados

A etapa final da ACV permeia as anteriores em um processo iterativo de análise crítica sobre as demais fases, permitindo revisões, mudanças, subtrações e adições de escopo (ABNT, 2009), de forma que informações do Inventário e informações geradas pela Avaliação de Impacto sejam convergidas na forma de conclusões e que provejam recomendações. É importante que as interpretações estejam de acordo com as definições iniciais de objetivo e escopo, e que expliquem as limitações do estudo, realizando uma análise crítica com relação à qualidade dos dados (ICV) e do método de AICV utilizado, principalmente com relação à subjetividade associada ao mesmo (CICLOG, 2022). Ademais, é nessa etapa onde ocorre a contextualização gráfica e espacial dos resultados auxiliando o entendimento do efeito dos cenários e apoiando a tomada de decisão consciente.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos neste trabalho podem ser divididos em três grandes grupos. O primeiro se refere à verificação da fonte energética dos veículos, o segundo à aplicação da ferramenta de ACV como recurso de apoio à tomada de decisão no transporte coletivo de Porto Alegre. O terceiro utiliza da abordagem territorial por meio de SIG para facilitar e aumentar a aderência da utilização de ACV por parte de planejadores urbanos.

4.1.1.1 Fonte energética

4.1.1.1.1 Mistura de Diesel e Biodiesel

As projeções para cenários futuros foram desenvolvidas a partir da delimitação da lei CNPE nº 16 (ANP, 2018) de acordo com definições detalhadas no subcapítulo 3.3.1.

Os resultados foram calculados tendo em vista a UF de 1km percorrido. Vale destacar que a diferenciação de poder calorífico entre os combustíveis é levada em conta, já que o biodiesel possui poder calorífico ligeiramente menor que o diesel. Tais particularidades são demonstradas na Tabela 13, onde a distribuição da equivalência foi calculada de acordo a eficiência em MJ por litro de combustível consumido.

Tabela 13 - Equivalência do combustível segundo seu poder calorífico.

Combustível	Massa específica (kg/l)	Poder calorífico (MJ/l)	Variação eficiência (%)
Diesel	0,843	36,120	-
Biodiesel	0,880	34,410	-
B12	0,845	35,915	-
B13	0,845	35,897	-0,0476
B14	0,846	35,880	-0,0476
B15	0,846	35,863	-0,0477

Fonte: (VIANA, 2008; HACKENHAAR, 2019), tabela elaborada pelo Autor.

A massa específica de cada mistura é assumida como sendo proporcional ao percentual de diesel e biodiesel contido na composição final, sendo que os valores base de ambos os combustíveis são obtidos na literatura (VIANA, 2008). A Tabela 13 ainda ilustra a variação percentual na eficiência de cada mistura quando comparada

a B12, utilizada no ano base de 2020. O percentual de cada ano é definido conforme a lei e se insere como: 2020 (B12), 2021 (B13), 2022 (B14) e 2023 (B15).

Os achados para cada categoria de impacto são representados na Figura 22. De forma geral, os impactos totais e percentuais do Diesel diminuem ao longo dos anos com a substituição gradual para o Biodiesel até 2023, quando o aumento porcentagem de Biodiesel na mistura cessa. No entanto, é importante salientar que o impacto do Diesel é o mais representativo ao longo de todos os anos considerando que sua contribuição percentual na análise é quantitativamente maior; em GWP é de 83% com aproximadamente $1,37E+00$ kg CO₂-eq. em 2020. Em contraponto, o impacto do Biodiesel corresponde em pouco mais de 20,3% com cerca de $2,82E-01$ kg CO₂-eq. no mesmo ano. Além disso, para HT, no mesmo ano, o Diesel abrange 54% (cerca de $3,36E-02$ kg 1,4-DB-eq.) e Biodiesel quase 46% (cerca de $2,83E-02$ kg 1,4-DBeq.) dos impactos.

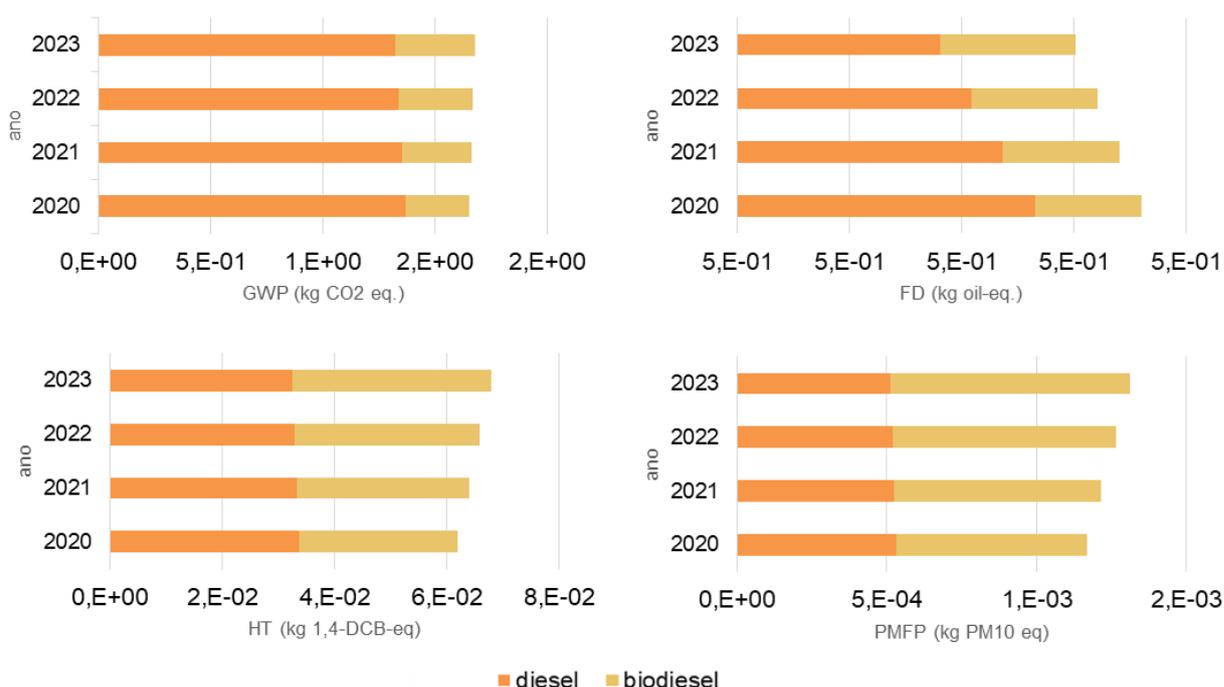
Em relação a FD, essa tendência é ainda mais representativa, com 96% ($5,13E-01$ kg oil-eq.) para Diesel e 4% ($1,90E-02$ kg oil-eq.) para o Biodiesel. Todavia, diferentemente das demais categorias, que possuem aumento do valor com a adição de um maior percentual de biodiesel na mistura, em FD entre 2020 e 2023 o impacto é reduzido em 2%.

Em PMF também se observa uma clara diferenciação em comparação com as categorias de impacto anteriormente analisadas. Em 2020, a contribuição no impacto de Biodiesel já é superior à do Diesel, 55% ($6,40E-04$ kg PM_{2.5} eq.) e 45% ($5,30E-04$ kg PM₁₀eq.). Esses valores têm aumento gradativo ao longo dos anos alcançando valor máximo em 2023, com a maior composição de Biodiesel na mistura (B15). Ainda, destaca-se que entre 2020 e 2023 há um aumento de 12% do valor inicial, sendo este mais significativo entre as categorias. Tal realidade se dá pela contribuição inicial da mistura no ano base, consequentemente GWP apresenta o menor aumento com apenas 2% e HT o intermediário com 10%.

Nesse contexto, ainda que o uso de biodiesel no diesel influencie o aumento dos impactos em GWP, seu efeito é substancialmente mais relevante em HT e PMF, pois os impactos ambientais atribuídos ao biodiesel em relação ao diesel foram significativamente maiores em relação a essas categorias. Os impactos notavelmente

altos do biodiesel em HT e PMF estão correlacionados com noções anteriores do combustível no setor de transportes, tendo como principal deficiência o aumento de NO_x na atmosfera somada aos impactos de produção deste combustível em relação ao diesel. NANAKI; KORONEOS (2012) também destacam outros inconvenientes no uso de biodiesel como fonte energética de transporte, considerando sua correlação com o aumento das emissões não só de óxidos de nitrogênio (NO_x), mas também de micropartículas, óxido nítrico, bem como nutrientes como nitrogênio e fósforo; este último o principal agente de eutrofização. Porém, soluções para esta problemática ainda não foram totalmente desenvolvidas (TABATABAEI et al., 2019).

Figura 22 - Impactos ambientais por mistura de combustível segundo a porcentagem de biodiesel no combustível de acordo com os cenários definidos.



Fonte: Autor.

Apesar desse cenário desfavorável, NOCKER et al. (2000) enfatizam vantagens no biodiesel, em especial considerando as emissões de gases de efeito estufa. Ainda em relação à FD, pesquisa sugere que considerando os vários compostos, como metal e energia fóssil catalisadores, o esgotamento desses recursos é maior quando comparado ao biodiesel cujos compostos são limitados a mercúrio, água e cloreto de sódio (NaCl) usado na produção de hidróxido sódio (NaOH) (VIORNERY-PORTILLO; BRAVO-DÍAZ; MENA-CERVANTES, 2020).

Portanto, deve-se levar em conta que o aumento de biodiesel na mistura diminuiria ligeiramente os impactos relacionados à FD, mas aumentaria em relação às demais categorias avaliadas. Tendo em conta tais peculiaridades, as futuras políticas nacionais devem centrar-se na análise o contexto como um todo por meio de diferentes categorias de impacto antes de criar políticas sem uma noção territorial e profunda das especificidades de cada localidade. Além disso, no caso de aumento do uso de biocombustíveis, B20 e B30, o impacto do uso da terra e escassez de água – não avaliados nesta pesquisa - deve ser considerado como um aumento da demanda por óleo de biodiesel pode no futuro alterar a dinâmica do mercado de produtos agrícolas (MENDES; BUENO; OMETTO, 2015; VIANA, 2008).

Por fim, também é importante mencionar as especificidades do biodiesel brasileiro em comparação tanto para diesel quanto para outros processos fora do Brasil. A produção de 1 kg de óleo de soja puro no Brasil gera 4,88 kg CO₂-eq. Em comparação, a produção de diesel no país para 1 kg de combustível é de aproximadamente 0,44 kg, enquanto a produção de biodiesel nos Estados Unidos (EUA) está próxima de 1,01 kg. Portanto, a produção brasileira de biodiesel, considerando GWP, causa 91% mais impactos em comparação com a mesma quantidade de diesel produzida no país. Além disso, quando comparado ao biodiesel produzido nos EUA, a diferença também é significativa, pois o produto gera 80% mais impactos durante sua fase de produção.

4.1.1.1.2 Matriz elétrica

Buscando um entendimento mais amplo das variações e influências dos processos de eletricidade considerados, uma contextualização e interpretação dos resultados é executada.

4.1.1.1.2.1 Sistema elétrico brasileiro

O sistema elétrico brasileiro é, atualmente, o maior da América Latina ocupando a oitava posição na lista dos maiores mercados de geração elétrica no mundo (BEN, 2020; IEA, 2020). No período 2012-2019, em média, a produção de

energia elétrica nacional girou em torno de 586 TWh, sendo que, em 2019, gerou aproximadamente 626 TWh representando 4,1% de aumento em relação ao ano de 2018 (BEN, 2020).

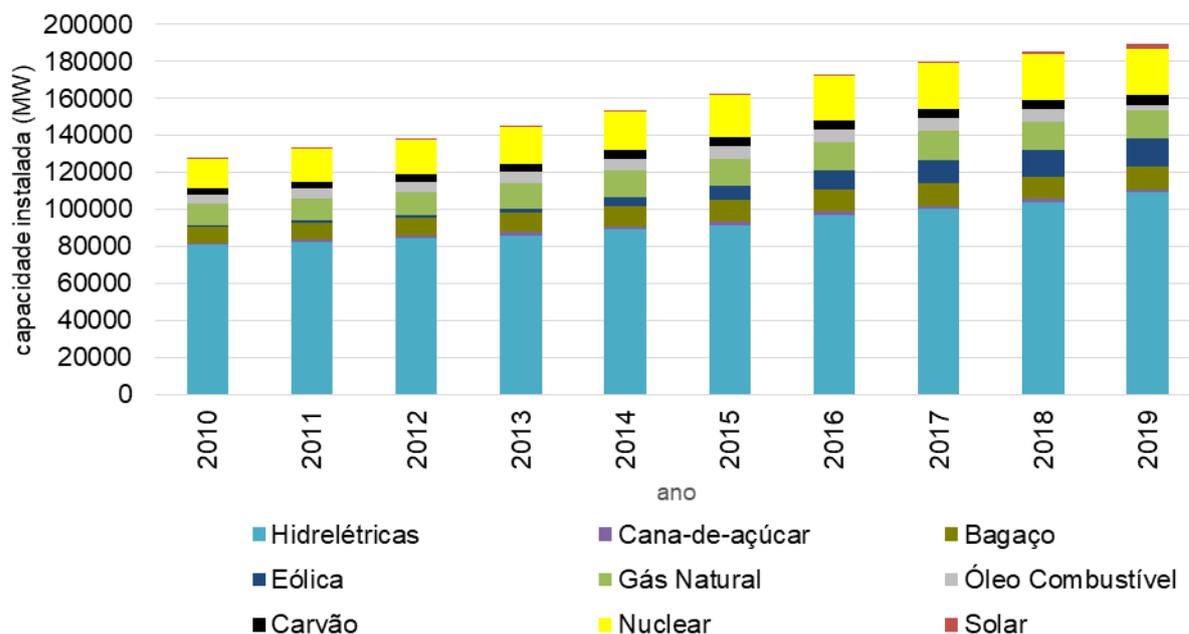
Por outro lado, analisando historicamente, a capacidade instalada de geração de eletricidade no Brasil foi expandida em mais de 48% entre 2010 e 2019. Sendo as fontes que mais apresentaram aumento renováveis, como eólica (7,4%) e solar (1,3%). A Figura 23 mostra essa progressão por tecnologia no Brasil entre 2010 e 2019.

Ainda vale ressaltar que, apesar da predominância de fontes hídricas ao longo dos anos, hidrelétricas no geral apresentaram queda em sua produção em todos os anos avaliados, exceto 2018. Ao todo, houve um decréscimo em torno de 5,8% no período, conjunto a um aumento da capacidade instalada de outras fontes renováveis. Entretanto, é importante salientar que a despeito de tal decréscimo, o Brasil permanece entre os países com maior geração hidrelétrica no mundo (BEN, 2020), e a geração de eletricidade no país ainda se baseia majoritariamente em centrais hídricas (CH).

Tal dependência cria um paradoxo, já que a geração hídrica está sujeita a variações meteorológicas, seja por alterações climáticas ou sazonais. Atualmente, essa realidade se manifesta de forma atenuante, já que a crescente diminuição da produtividade de usinas hidrelétricas acarreta redução em mais de 60% da geração total do país. Pelo seu nível de contribuição na geração brasileira, é perceptível não só uma repercussão em nível nacional, mas também no dia a dia do cidadão comum, por exemplo com o aumento das contas de luz no país (CNN, 2021).

Nesse cenário, alterações na matriz elétrica brasileira podem ser observadas tanto nas tecnologias de base renovável como nas não renováveis. Ainda que o modelo de algumas décadas atrás, baseado em hidrelétricas de grande porte, venha perdendo espaço, investimentos em tecnologias alternativas, como energia solar e eólica vem se expandindo. Tais fontes obtiveram as maiores ampliações de capacidade instalada entre 2019 e 2020, com aumentos na ordem de 32% para a primeira e 1% para a segunda (BEN, 2021).

Figura 23 - Evolução da capacidade instalada (MW) de centrais por tecnologia.



Fonte: (BEN, 2020), gráfico elaborado pelo Autor.

Ainda em 2020, a eletricidade proveniente de fontes renováveis representou mais de 80% da oferta interna de eletricidade do país. As previsões para os anos subsequentes tendem a indicar uma continuidade dessa tendência. Portanto, apesar da propensão da continuidade de maior participação de hidrelétricas na produção total de eletricidade no Brasil, avanços em outras tecnologias renováveis e o aumento na sua capacidade instalada traçam um cenário futuro favorável.

Essa diversificação da matriz brasileira é avaliada pelo Centro Clima (CENTRO CLIMA, 2017). Visando apresentar um prognóstico da oferta energética e as respectivas emissões de GEE no Brasil, cenários até 2050 são concebidos, a partir de preceitos condizentes ao Cenário de Plano Governamental (CPG) (PCE, 2015). Concordante ao Anuário Estatístico de Energia Elétrica de 2020 (EPE, 2019), a fonte com maior aumento percentual em sua capacidade instalada foi a solar com 59% entre 2020 e 2050. Contrastante, a capacidade instalada de fontes fósseis, como óleo combustível, tem um esperado decréscimo de 21% no intervalo analisado e de hidrelétricas tem um aumento de apenas 2% conforme ilustrado conforme ilustrado na Tabela 14.

Tabela 14 - Evolução da capacidade instalada (MW).

Fonte/Ano	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
Cana-de-açúcar	2102	2302	3721	4719	5716	6714	8709
Bagaço	12717	12717	14397	14397	14397	15852	15852
Hidrelétricas	121860	121910	121910	133643	139654	147136	153665
Eólica	14300	16694	19953	23943	27933	33919	39904
Gás Natural	13286	13286	13286	14290	14388	14388	14388
Óleo Combustível	4878	3556	3108	1108	789	810	810
Carvão	1984	1984	1984	1065	2765	3625	3625
Nuclear	3340	3340	3340	3340	3698	4695	4695
Solar	2953	8649	14365	22654	42439	62223	78006
Importação	1445	1445	1445	1445	3325	3325	3325

Fonte: Centro Clima (2017), tabela elaborada pelo Autor.

Além disso, as variações percentuais por fonte também são analisadas pelo Centro Clima, que prevê uma redução gradual da contribuição de fontes hídras consoante aos dados precedentes apontados pela EPE. Ademais, os autores estimam que, entre 2020 e 2050, ocorrerá uma redução de 16,5% da eletricidade produzida por usinas hidrelétricas, seguida de 3,2% e 1,8% de decréscimo de fontes como bagaço e gás natural respectivamente. Concordante às tendências, fontes renováveis são as que antecipam maior acréscimo percentual de produção ao longo dos anos, solar com 15,1% e eólica com 3,1%. Tal fato contribui positivamente para que a matriz nacional permaneça sendo, em sua maior parte, renovável. A separação por fonte é descrita com mais aprofundamento no subcapítulo 3.3.1.

4.1.1.1.2.2 Diferenciação por região

O Brasil está dividido em cinco regiões geográficas: Norte (N), Nordeste (NE), Sul (S), Sudeste (SE) e Centro Oeste (CO), com uma área total de 8.514.215 km². As dimensões continentais do território geram uma diversidade de climas, relevos e hidrografia, criando a necessidade de avaliação da eletricidade utilizada em cada parte do país. Nesse sentido, país, regiões e estados apresentam perfis de geração e consumo diferentes que devem ser avaliados considerando que a proposta do presente estima os benefícios da eletrificação de uma frota de veículos e as características da matriz são preponderantes nessa transição.

Em 2016, o Ministério de Minas e Energia, através do Centro de Pesquisas de Energia Elétrica (MME, 2016), publicou o relatório Matrizes Elétricas Estaduais com informações relativas à contribuição de cada fonte dentro da matriz elétrica por estado e região. Além disso, para fins de comparação, dados abertos da EPE (2021) constando a contribuição individual de cada usina no território brasileiro, com possibilidade de geolocalização e categorização por estado foram organizados e subsequentemente conferidos em relação as informações agregadas pelo MME. Tal tentativa, foi executada buscando não só concordância, mas também atualização dos valores estimados em 2016.

Todavia, a falta de especificação em relação à tecnologia utilizada para geração de eletricidade nas tabelas da EPE dificultou o caráter comparativo inicialmente concebido. Os dados mais genéricos impossibilitam uma correlação por fonte tecnológica, já que não consta a fonte específica (carvão, solar, gás natural, etc) e sim uma descrição simples, como “*térmica*”. Outro aspecto é a dificuldade de identificação se as usinas ainda estão em uso, já que consta na tabela apenas a data de inauguração das mesmas e nada referenciando seu status de funcionamento.

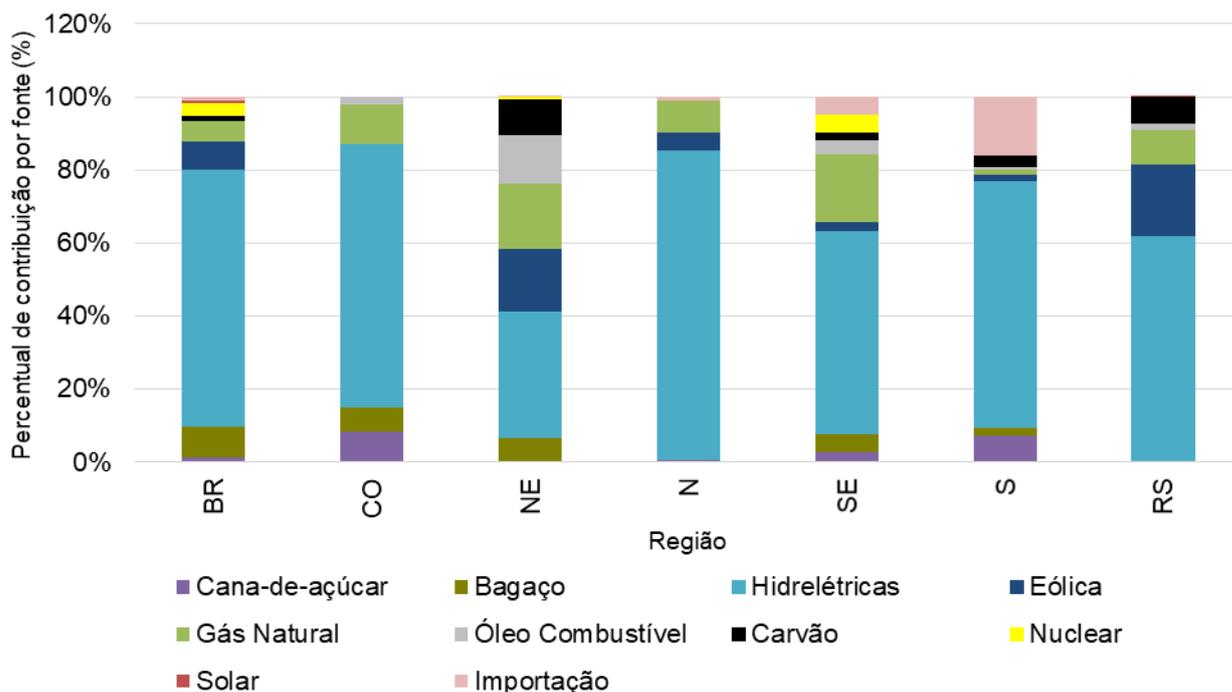
A Figura 24 apresenta um resumo dessa averiguação. Na mesma é possível perceber uma clara diferenciação de eletricidade produzida entre Brasil (BR), as regiões e o estado do Rio Grande do Sul (RS). A geração a partir de fonte hídricas continua predominante, exceto na região Nordeste, onde ela apresenta contribuição inferior a 35%. Em contrapartida, a região Norte possui o percentual mais elevado, com 85%. As demais regiões apresentam entre 60% e 80% de contribuição de hidrelétricas.

Ainda se destaca a elevada contribuição de gás natural (11%) e cana de açúcar (8%) na matriz do Centro Oeste (CO). Por outro lado, o Nordeste (NE) é a região com maior percentual de eletricidade a partir de fontes não renováveis, totalizando 43%, com destaque para óleo combustível (13%) e gás natural (18%). No entanto, o NE também é a região com maior geração de eletricidade a partir de fontes eólicas (18%).

Por último, o Sudeste (SE) é a única região que possui produção de energia nuclear (5%), com grande contribuição também de gás natural (19%) e a região Sul

(S) é a que contém maior parcela de importação de outros países, como Argentina e Uruguai. Ainda, é necessário salientar que foram contabilizadas as importações internas e as mesmas subdivididas por fonte, evitando a não consideração de trocas dentro do território nacional.

Figura 24 - Contribuição por região.



Fonte: (MME, 2016), gráfico elaborado pelo autor.

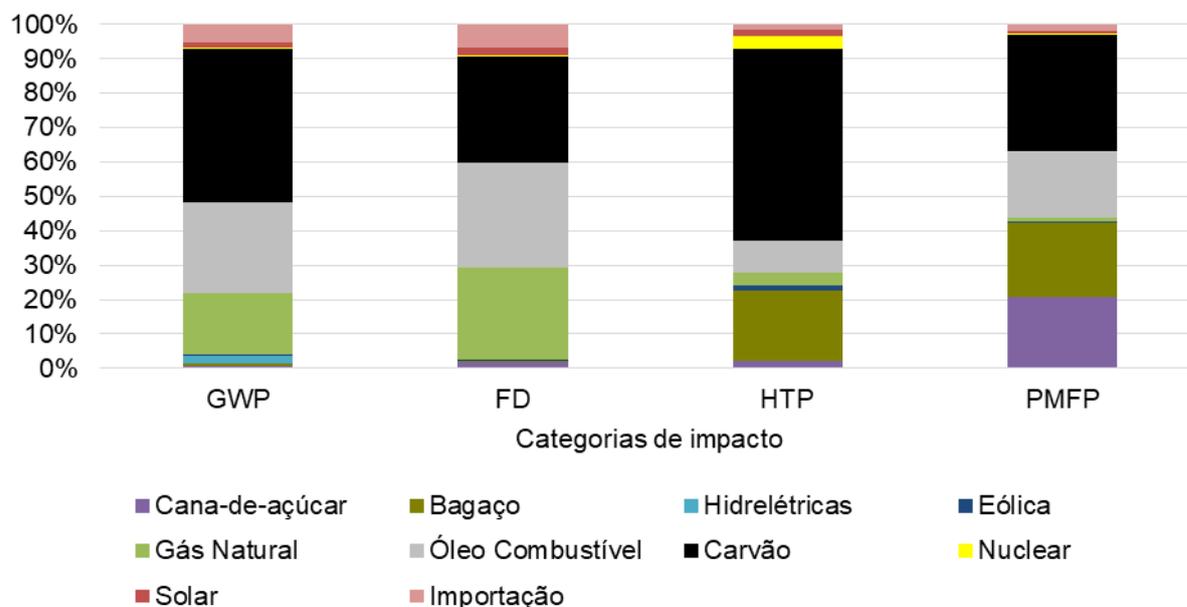
4.1.1.1.2.3 Análise tecnológica a partir de seu impacto ambiental

Como ponto de partida, foi avaliado o valor de 1kWh de para cada fonte. Tal valor universal foi considerado para fins de análise ignorando a contribuição percentual de cada fonte na matriz e sim avaliando a fonte de forma isolada. Os resultados por categoria de impacto são ilustrados na Figura 25.

Em relação ao Potencial de Aquecimento Global (GWP), carvão é a fonte com maior contribuição com 44%, seguida de óleo combustível (26%) e gás natural (17%), enquanto cana de açúcar (0,6%) e eólica (0,4%) tem baixo índice de CO₂eq. Tais achados são condizentes com os encontrados por TURCONI et al. (2014) que a partir da avaliação do sistema elétrico na Dinamarca ilustra as vantagens ambientais na substituição do carvão por energia proveniente de fontes renováveis, que segundo o autor, diminuem significativamente o aquecimento global e o consumo de combustível

fóssil. Por outro lado, CHERUBINI; BRIGHT; STRØMMAN (2012) ressaltam o papel de termoelétricas baseadas em bioenergia como caminhos na redução do impacto global pela substituição de eletricidade proveniente de combustíveis fósseis.

Figura 25 - Contribuição de cada fonte por categoria de impacto.



Fonte: Autor

Concordante aos achados dos autores, os resultados indicam que geração de eletricidade a partir de carvão e óleo combustível têm valores elevados para depleção de recursos fósseis (ambos com 31%) e novamente o impacto para o gás natural é um pouco menor (26%) para a mesma categoria de impacto. Essas diferenças podem estar associadas com a eficiência de usinas e de gás em comparação a outros recursos fósseis.

Ainda é importante frisar o comportamento da matriz frente a outras categorias, para HT e PMF, além do carvão, impactos atrelados ao tratamento de bagaço se destacam (com 20% e 21%, respectivamente). Além disso, considerando o material particulado, impactos de cana-de-açúcar também se destacam com 20% do total. Dados de literatura corroboram com esses resultados, MICHEAL; MOUSSA, (2021) destacam tais limitativos na escolha do bagaço, considerando a correlação entre sua combustão e emissões que diretamente afetam a saúde pública, causando problemas respiratórios e pulmonares. Além disso, o uso indiscriminado de recursos

como produtos químicos (por exemplo, fertilizantes ou herbicidas), água, combustíveis fósseis, energia elétrica ou uso do terra causam danos ao ambiente, saúde humana e qualidade do ecossistema (MEZA-PALACIOS et al., 2019).

4.1.1.1.2.4 Projeções Matriz Elétrica

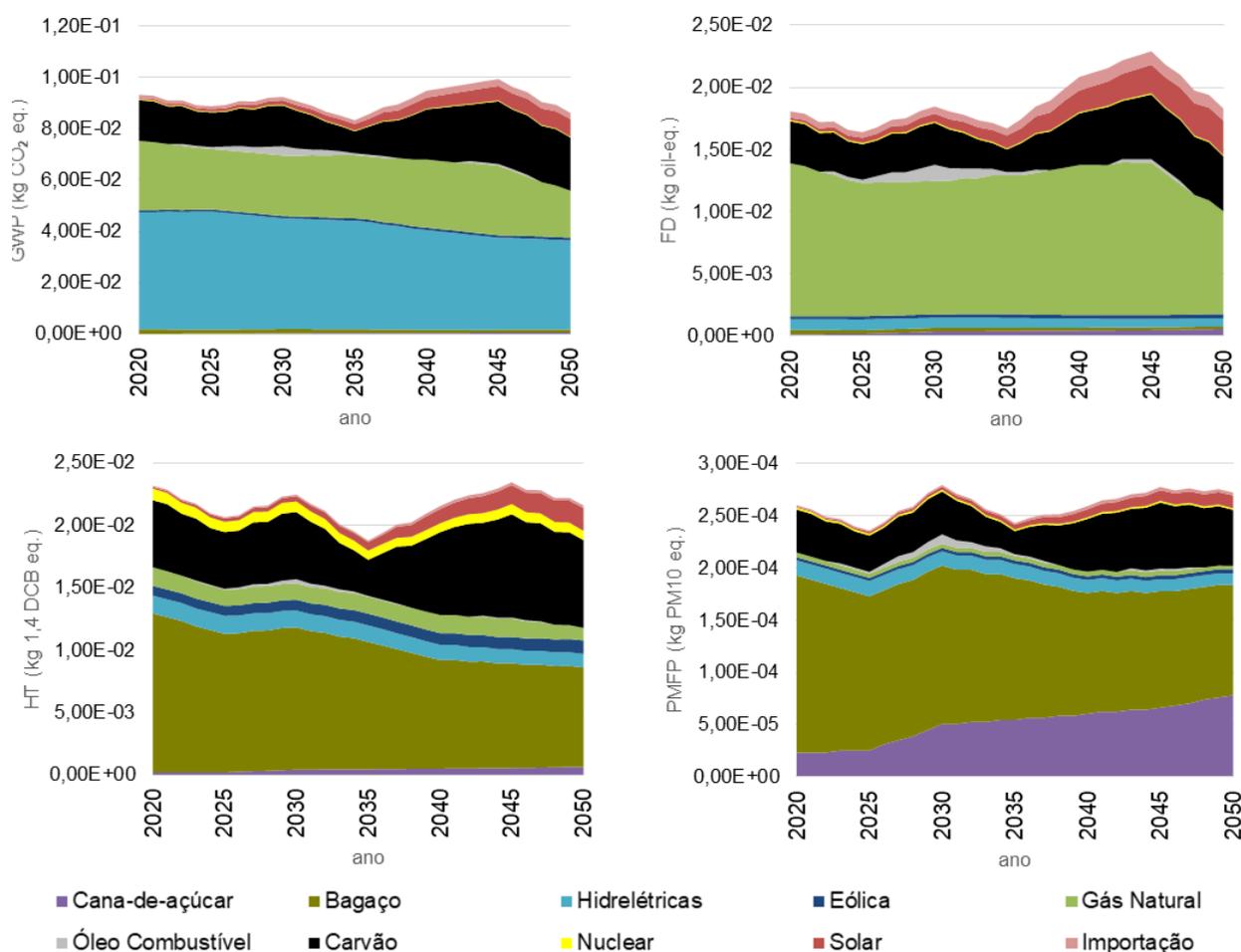
Projeções para cenários futuros foram desenvolvidas a partir da combinação de variáveis apresentadas pelo Centro Clima (CENTRO CLIMA, 2017), e Ministério de Minas e Energia (MME, 2016), descritas nos subcapítulos 3.3.1 e 4.1.1.1.2. Ademais, destaca-se que a unidade funcional utilizada é a rodagem de 1km ao ano, tal escolha foi feita buscando correlação com a análise de sensibilidade feita em outros processos e uma visualização clara da realidade Brasileira durante o período de análise. Combinadas as variáveis, a avaliação foi calculada conforme definições feitas na AICV, presente no subcapítulo 3.5. A Figura 26 ilustra os resultados.

Os resultados de Potencial de Aquecimento Global (GWP) apontam que as emissões totais ao longo dos anos apresentam variações. Entre 2020 e 2026, há uma redução nos impactos de $1,17E-01$ kg CO₂eq. em 2020 para de $1,12E+04$ kg CO₂eq. em 2026. Nesse intervalo se nota um aumento na contribuição de 2,9% em energia proveniente de fontes renováveis, e uma redução de 4,6% de fontes não renováveis. Entre 2027 e 2030, essa tendência se inverte com o aumento de 3,4% do impacto total, sendo que hidrelétricas apresentam uma redução de percentual de 4,3% e carvão e óleo combustível acréscimos de 2,1% e 2,3% respectivamente. Após outras variações ao longo dos anos, em 2050 há uma diminuição de $8,88E-03$ kg CO₂eq. (7,5%) do impacto em relação ao ano inicial.

Diferentemente do impacto de GWP, os impactos totais de FD aumentam em $2,93E-04$ kg oil-eq. (1,2%). Se destaca o aumento da contribuição do carvão na matriz de 6,4% e da própria energia solar. Na falta de um *dataset* brasileiro, o processo “*electricity production, solar tower power plant, RoW*” foi adaptado. Apesar disso, para fins de conformidade na análise, apenas os *providers* foram alterados, deixando as entradas em conformidade com as originais. Nesse sentido, se frisa o papel da entrada “*heat natural gas*”, que se destaca com o maior percentual de contribuição em todas as categorias estudadas, em FD, por exemplo, representa 76,3% dos impactos para 1kWh. Tal fato torna a fonte solar consideravelmente mais impactante as demais

fontes renováveis e com seu aumento percentual na matriz ao longo dos anos a tendência é que seu percentual de contribuição também aumente relativo aos impactos, como exemplificado em FD.

Figura 26 - Projeções de impacto de Potencial de Aquecimento Global (GWP) (em kg CO₂ eq.), Depleção de recursos fósseis (FD) (em kg oil eq.), Toxicidade humana (HT) (em kg 1,4-DCB eq.) e Formação de material particulado (PMFP) (em kg PM10 eq.) por ano da matriz elétrica brasileira.



Fonte: Autor.

Ademais, se compararmos 2020 com 2044, tanto em GWP, quanto FD, ocorre um aumento do impacto total de 5,6% e 24,3%, respectivamente. Em 2044 há uma redução significativa na produtividade hídrica e aumentos tanto para carvão quanto para óleo combustível (fonte de maior impacto em FD). Tais elevações são mais

impactantes em FD, já que em GWP a fonte hídrica é a que ainda apresenta maior contribuição na matriz brasileira e maior percentual de impacto considerando o percurso de 1km, em FD essa tendência não se repete, já que a fonte hídrica não tem participação significativa. Também é relevante frisar que, apesar do menor percentual de contribuição na matriz de fontes não renováveis como carvão e óleo combustível, sua elevação ao longo dos anos, além das particularidades do *dataset* de energia solar, afetam os resultados finais diretamente.

Considerando HT, a energia proveniente do bagaço (55,0% e 1,61E-02 kg 1,4-DCB-eq.), e do carvão mineral são as fontes com maior contribuição (23,2% e 6,78E-03 kg 1,4-DCB-eq.), aqui especificando os valores em 2020. Gás natural (6,4%) e hídrica (6,2%) são a terceira e quarta fonte com maior contribuição no mesmo ano. Em 2050 percebe-se uma redução do impacto total de 6,8%, passando de 2,92E-02 kg 1,4-DCB-eq. em 2020 para 2,72E-02 kg 1,4-DCB-eq. em 2050.

Em FPM a tendência apresentada em HT se repete parcialmente, agora a maior contribuição de impacto em 2020 são novamente a energia proveniente do bagaço (65,1% e 1,69E-04 kg PM10eq.) e do carvão mineral (15,8% e 4,10E-05 kg PM10eq.). Todavia, a terceira fonte com maior contribuição no mesmo ano é a cana de açúcar com (9,0% e 2,34E-05 kg PM10eq.). Nesse sentido, apesar da redução no percentual na matriz de energia elétrica do bagaço ao longo dos anos, os aumentos em ambos os outros maiores contribuintes (carvão e cana-de-açúcar), causam um crescimento do impacto de 4,7% comparando 2050 a 2020.

4.1.2 Cenários

Projeções para cenários futuros tendo como base mudanças no sistema foram desenvolvidas a partir da combinação de variáveis descritas em 3.3.1 e 3.4. Vale ressaltar que os cenários 1 a 3 possuem combinações possíveis de alteração da frota e fonte energética, como: (1) BAU: seguindo a legislação nacional com estagnação do percentual de biodiesel até 2023 e alterações na frota a partir de mudanças na eficiência e substituição após a completude da vida útil de cada veículo em funcionamento; (2) EL1: a substituição de OC para OE ocorrendo de acordo com o fim de vida do ônibus e considerando um aumento do percentual de biodiesel na mistura e evolução da matriz; (3) EL2: seguindo referências do Edital nº 01/2015, substituição de 10% da frota, e transição de OC para OE com cenário de operação condizente com

EL1. Observa-se que a substituição de OC por OE ocorre paralelamente às trocas de combustível.

Ainda, salienta-se que em BAU apenas mudanças de combustível são levadas em conta, pois a frota não é eletrificada, permanece com ônibus convencionais. Em EL1 e EL2, a frota começa a ser renovada em 2020, sendo que na EL1 a substituição total de OC para OE acontece em 2029 e em EL2 a renovação total da frota não é alcançada até o final do período do estudo.

4.1.2.1 Cenário 1 - BAU

No cenário BAU, os impactos totais e percentuais do Diesel diminuem ao longo dos anos com a substituição gradual do biodiesel até o ano de 2023, quando o percentual do biodiesel na mistura estagna. No entanto, vale salientar que o percentual de Diesel na mistura é sempre o mais representativo, sendo o mínimo alcançado de 85% em 2023. Todavia, sua contribuição percentual na análise relativa às categorias de impacto varia, já que são considerados outros fatores além da fase de operação, como a substituição de veículos anualmente. Apesar disso, em GWP, 77,4% do impacto é relativo ao Diesel, com aproximadamente $2,85E+07$ kg CO₂eq. em 2020. No mesmo ano, o impacto do biodiesel corresponde a pouco mais de 15,9%, com cerca de $5,87E+06$ kg CO₂eq em GWP.

Ademais, para essa categoria de impacto, contribuições associadas a produção e manutenção do veículo são relativamente baixas, com 5,0% e 1,7% respectivamente. Entretanto, anos com maior substituição de veículos apresentam maior impacto total, como é o caso de 2024 e 2038, onde o maior número de veículos ativos da frota atingem 14 anos, ao todo são feitas 88 substituições em ambos. Nesses anos, o impacto total atinge seu valor máximo, com 5,6% de aumento em relação a 2020, com $3,89E+07$ kg CO₂eq. Ainda, se destaca que os valores encontrados se correlacionam com os de GARCIA; GREGORY; FREIRE (2015) em avaliação da frota de veículos em Portugal.

Diferentemente de GWP, com a substituição do Diesel os impactos gerais em FD, anos sem substituição de ônibus como 2028 e 2039, apresentam o menor valor

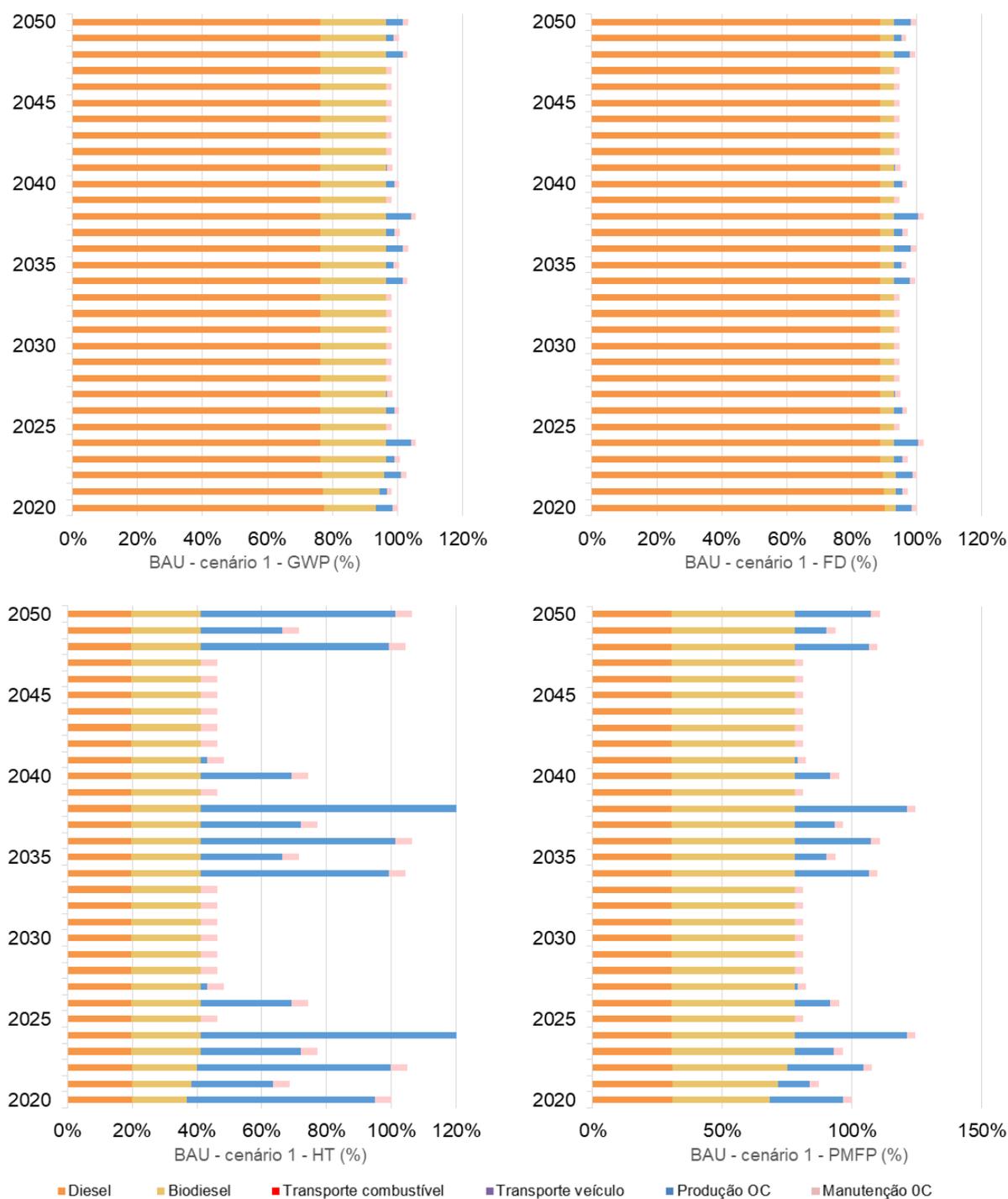
de impacto, mesmo com as variações entre os combustíveis tendo cessado. Há uma redução de 5,3% no impacto total, em tais períodos. Todavia, conforme os achados em GWP, o impacto principal permanece na fase de operação, com as fontes energéticas contribuindo em aproximadamente 93,0% ($1,10E+07$ kg oil eq.), mesmo em anos com significativa renovação da frota como 2024.

Em relação a HT e PMF, impactos relativos à produção e manutenção dos ônibus passam a ter maior relevância numérica. Em HT, para anos com alto grau de transição de veículos, como 2020 e 2034 (58 veículos), o impacto de produção é inclusive o mais expressivo, com 57,9% ($2,02E+06$ kg 1,4-DBeq.) e 55,5% ($2,02E+06$ kg 1,4-DBeq.) respectivamente. Se destaca que o maior percentual de Biodiesel na mistura até 2023 contribui para o aumento da sua contribuição junto ao impacto total. Concordante às categorias de impacto avaliadas anteriormente, tanto manutenção do veículo, como transporte de combustível e veículo a garagem da Carris apresentam baixo percentual, apenas com manutenção chegando a mais de 1%, com 5,2% ($1,80E+05$ kg 1,4-DBeq.) em 2020.

Em PMF, novamente os anos com maior número de veículos renovados possuem maior impacto total, como em 2024 e 2038, que apresentam 24,3% de acréscimo em comparação com 2020. No que se refere a anos com nenhuma substituição como é o caso de 2030, a maior contribuição está contida no Biodiesel, já que em anos sem trocas, é possível perceber claramente que a contribuição do Biodiesel, 58,5% ($1,70E+04$ kg PM.10eq.) é superior ao do Diesel, 37,4% ($1,09E+04$ kg PM.10eq.) nessa categoria de impacto. Tal fato demonstra a importância da escolha da fonte energética. Além disso, o percentual de Diesel e Biodiesel mantém-se constante entre 2023 e 2030 em 71% e 29%, respectivamente, conforme mostrado na Figura 27.

Portanto, é aparente que apesar da pequena proporção de biodiesel na mistura, seu incremento aumenta impactos tanto em GWP, como HT e PMF como destacado com estudos anteriores (LEICHTER; HACKENHAAR; PASSUELLO, 2021).

Figura 27 - Potencial de aquecimento global (GWP), Depleção de recursos fósseis (FD), Toxicidade humana (HT) e Formação de material particulado (PMFP) em percentual considerando o ano de 2020 como base.



Fonte: Autor.

4.1.2.2 Cenário 2 – EL1

Em relação ao cenário EL1, Diesel e Biodiesel atingem seu menor impacto em 2029, enquanto todas as fontes de eletricidade atingem seu ponto mais alto. Por outro lado, as baterias atingem seu impacto mais elevado em 2032, onde foram substituídas 148 baterias (0,1% e 2,55E+03 kg CO₂eq.). Além disso, EL1 demonstra que o impacto de GWP diminui de 3,23E+07 kg CO₂eq. em 2020 para cerca de 2,82E+06 kg CO₂eq em 2030, ano em que a eletricidade abrange 100% de GWP relacionado à fase de operação. Ainda, é importante citar a redução do impacto total no mesmo ano, o qual apresenta 14,5% do impacto referente a 2020. Assim, a transição para ônibus elétricos reduz quase 85,5% do impacto total, contabilizando quase 4,67E+06 kg CO₂eq conforme observado na Figura 28.

Nesse sentido, tomadores de decisão devem estar atentos à matriz elétrica que será utilizada pela frota de veículos, uma vez que uma matriz elétrica baseada em energias renováveis aumenta os benefícios atrelados a eletrificação de veículos e instrumentos e políticas energéticas desempenham um papel importante na promoção dessa mudança (ZHAO et al., 2020). Este fato destaca a importância de considerar a contribuição de cada fonte dentro da matriz e sua relação com o impacto total. Em 2030, por exemplo, a energia elétrica brasileira tem previsão de ser composta por 89,2% de energia elétrica proveniente de fontes renováveis de energia (66,4% hidrelétrica, 2,6% cana-de-açúcar, 7,6% bagaço, 8,9% energia eólica e 3,7% solar energia), enquanto a eletricidade proveniente de fontes de energia não renováveis será de apenas 10,8% (4,8% gás natural, 0,5% petróleo, 2,4% carvão e 3,1% nuclear).

Assim, na EL1, no mesmo ano para GWP, a energia hídrica foi a fonte de eletricidade com maior contribuição (37,1% e 1,12E+06 kg CO₂eq.), ainda duas fontes de eletricidade não renováveis apesar o baixo percentual na matriz de energia elétrica apresentam o segundo e terceiro maiores valores, respectivamente: (1) gás natural, 20,3% e 6,14E+05 kg CO₂eq.; (2) carvão, 13,7% e 4,13E+05 kg CO₂eq.

Ao mesmo tempo, em FD, Diesel e Biodiesel, continuam sendo os maiores contribuintes, até cessarem sua participação no sistema em 2029. Em 2028, as emissões de Diesel e Biodiesel contribuem conjuntamente para 68,4% (5,72E+06 kg oil eq.) do total. Ademais, previsivelmente, fontes fósseis são as maiores contribuintes após veículos convencionais pararem de circular, como gás natural (41,4%, 2,79E+05

kg oil eq.), carvão (13%, 8,79E+04 kg oil eq.) e óleo combustível (5,0%, 3,38E+04 kg oil eq.).

Para Toxicidade Humana, conforme BAU, valores de produção de veículos continuam se destacando em anos com grande número de substituições, ademais veículos elétricos possuem impacto superior o que aumenta essa variação, já que a eletrificação da frota está acoplada a um aumento de impacto na etapa de produção. Isso está de acordo com estudos de ACV comparativos para tipologias de veículos, (NORDELÖF et al., 2013), entretanto alterações atreladas entre veículo convencional e elétrico são pequenas se comparadas às variações no impacto causadas pelo carregamento ou abastecimento na fase operacional.

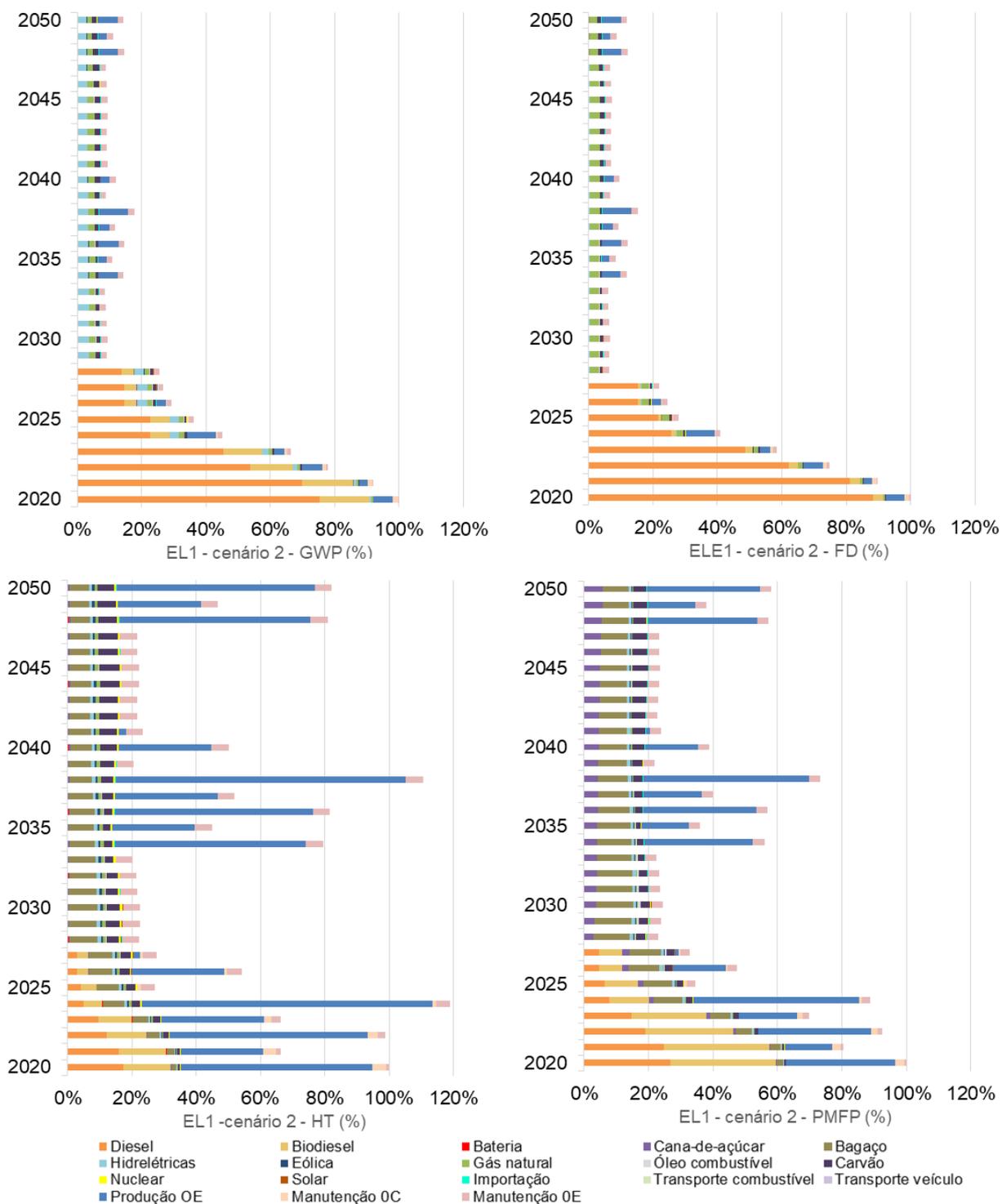
Em 2034, com a eletrificação total da frota, é possível notar a produção de novos ônibus comparada à de eletricidade, (74,9%, 2,02E+06 kg 1,4-DBeq.) e (18,2%, 4,92E+05 kg 1,4-DBeq.), nessa ordem. No entanto, salienta-se que em anos sem renovação da frota é possível notar com mais clareza a contribuição cada fonte elétrico, como em 2032: Bagaço (38,9%, 2,85E+05 kg 1,4-DBeq.), Carvão (16,2%, 1,18E+05 kg 1,4-DBeq.) e Hídrica (4,2%, 3,49E+04 kg 1,4-DBeq.) tem o maior impacto.

Para PMF, similarmente a HT, as participações relacionadas a efeitos respiratórios em relação a produção de veículos são superiores às duas categorias de impacto anteriormente analisadas, onde a fase de operação se destaca. Entretanto, o percentual de PMF é menor do que se comparado a HT, enquanto na primeira 59,5% (2,02E+06 kg 1,4-DBeq.) é proveniente da produção de ônibus elétricos, em FPM são aproximadamente 33,8% (1,17E+04 kg PM10eq.). Por último, também é perceptível o aumento da contribuição da cana-de-açúcar no sistema. Em 2034 é a segunda fonte elétrica com maior percentual (7,3%, 1,42E+03 kg PM10eq.).

As descobertas estão em acordo com a literatura que traz alguns *trade-offs* sobre o bagaço e cana-de-açúcar. Os autores destacam que o cultivo de biomassa pode aumentar a carga de nitrogênio na cadeia, enquanto a colheita pode reduzir tal carga ligeiramente (ZHAO et al., 2020). Além disso, preocupações com os impactos ambientais e efeitos na saúde associados às emissões de material particulado na produção de cana-de-açúcar e tratamento de bagaço no Brasil têm sido levantadas,

principalmente devido à queima. DU et al. (2018) aponta a colheita mecânica com 61% menos impactos, com 90% desses advindos de emissões de amônia no campo devido ao uso de fertilizantes. Já na colheita manual, o autor destaca que apenas 25% dos impactos são proveniente do uso de fertilizantes, sendo as emissões de material particulado durante a na queima pré-colheita o maior contribuinte, respondendo por 70% dos impactos.

Figura 28 - Potencial de aquecimento global (GWP), Depleção de recursos fósseis (FD), Toxicidade humana (HT) e Formação de material particulado (PMFP) em percentual considerando o cenário 2 (EL1) e o ano de 2020 como base.



Fonte: Autor.

4.1.2.3 Cenário 3 – EL2

No cenário 3, a diminuição do Diesel de 72,0% (2020) para 18,8% (2050) é notada (as emissões diminuem mais de $2,15E+07$ kg CO₂eq.). Nesse contexto, a transição para a ônibus elétricos é mais gradual que no cenário anterior, com trocas mais conservadoras. Em 2050 a frota atinge seu maior número de ônibus elétricos, ano quando a contribuição da mistura de B15 também se torna menos impactante e a matriz elétrica tem mais parcela referente ao valor total.

Comparando 2020 a 2050 é possível perceber a diferença de forma mais clara em GWP: Diesel (2020: 77,3%, $2,24E+07$ kg CO₂eq. e 2050: 18,8%, $9,64E+05$ kg CO₂eq.), Biodiesel (2020: 15%, $4,62E+06$ kg CO₂eq. e 2050: 5%, $2,57E+05$ kg CO₂eq.), Hídrica (2020: 0,4%, $1,18E+05$ kg CO₂eq. e 2050: 17,0%, $8,72E+05$ kg CO₂eq.) e Carvão (2020: 0,1%, $4,10E+04$ kg CO₂eq. e 2050: 11,1%, $5,19E+05$ kg CO₂eq.). Percebe-se, também, uma redução significativa nas fontes de óleo combustível e um crescimento gradual das elétricas, uma vez que a substituição dos veículos acontece mais gradualmente que no cenário anterior.

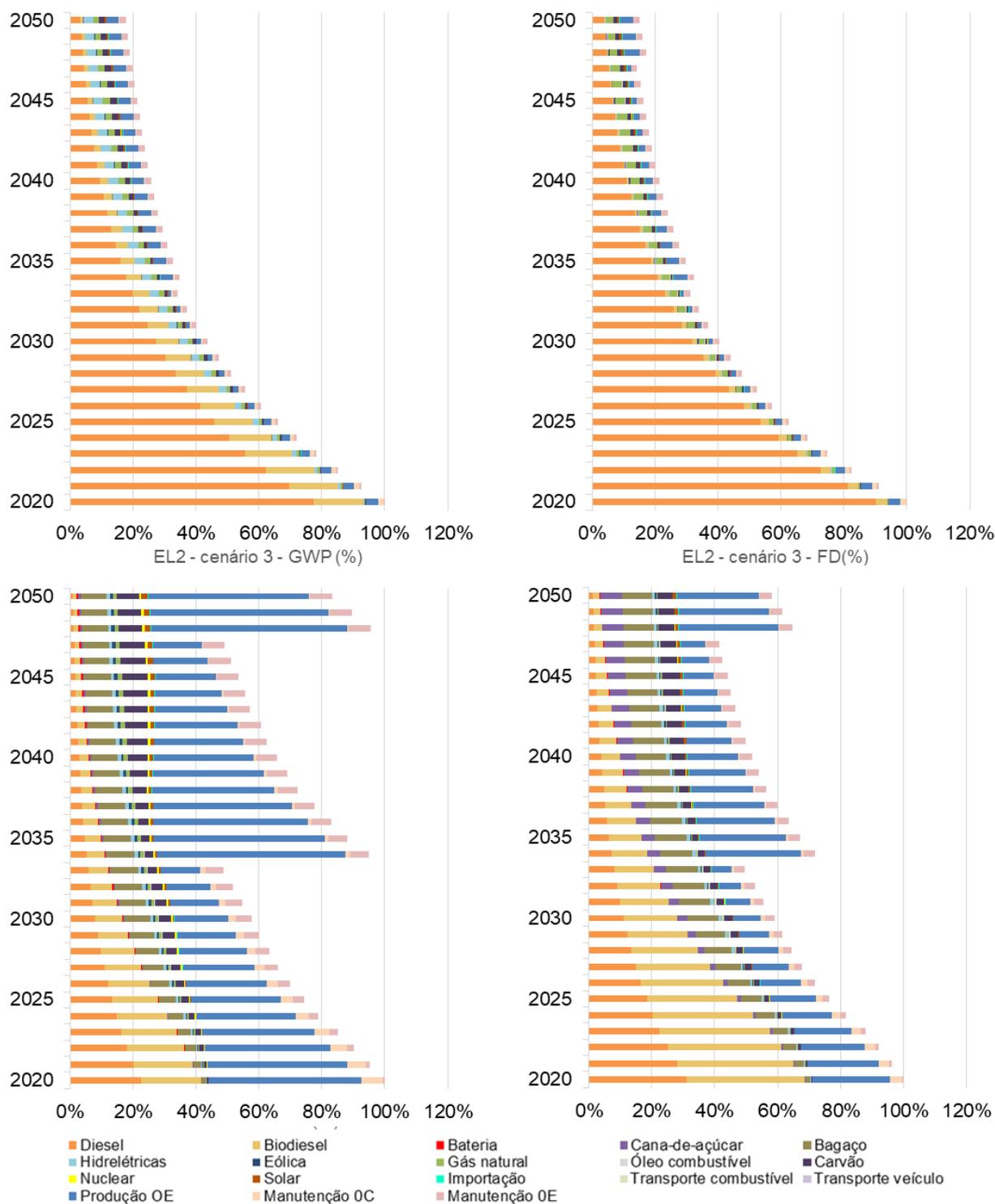
A Figura 29, também ilustra FD, onde Diesel e Biodiesel deixam de ser os principais contribuintes em 2042, pois as emissões de Diesel e Biodiesel contribuem para 49,6% ($8,80E+05$ kg oil eq.) nesse ano. Ademais, mesmo com a substituição da maior parte da frota por ônibus elétricos em 2050, a mistura continua tendo contribuição significativa se comparada ao número reduzido de carros convencionais. Em tal ano, recursos fósseis são responsáveis por quase metade do valor final do impacto: Diesel (25,8%, $3,61E+05$ oil eq.), gás natural (14,8%, $2,07E+05$ kg oil eq.) e carvão (7,9%, $1,11E+05$ kg oil eq.).

Mesmo que o número de veículos convencionais substituídos para elétricos mantenha um ritmo gradual de substituição, os valores de HT na produção de ônibus ainda continuam se destacando em todos os anos avaliados. Apesar de em 2050 a eletrificação total da frota não ser alcançada, fontes elétricas aumentam seu percentual significativamente, com destaque para o Bagaço (9,8%, $1,76E+05$ kg 1,4-DBeq.) e o Carvão (8,6%, $4,92E+05$ kg 1,4-DBeq.), que se mantém as fontes mais impactantes nessa categoria. A contribuição significativa do carvão é destacada por GASPAROTTO; DA BOIT MARTINELLO (2021) que chamam atenção para os perigos do carvão a saúde humana, uma vez que as centrais elétricas a carvão são

prodigiosos geradores de poluição ambiental, liberando grandes quantidades de partículas aerossóis na atmosfera apresentando um risco invisível para a saúde humana.

Para PMF, as emissões em 2050 de eletricidade se aproximam do impacto de maior relevância do sistema, alcançando 41,9% (6,81E+03 kg PM10eq.). Ainda, é importante frisar que cana-de-açúcar e bagaço permanecem as fontes de energia com maiores emissões anuais de gases relacionados a efeitos respiratórios considerando a matriz em sua totalidade.

Figura 29 - Potencial de aquecimento global (GWP), Depleção de recursos fósseis (FD), Toxicidade humana (HT) e Formação de material particulado (PMFP) em percentual considerando o cenário 3 (EL2) e o ano de 2020 como base.



4.1.2.4 Comparação entre os cenários

O estudo de caso traz a abordagem de cenário de acordo com WEIDEMA et al. (2004), que destaca como o número e variedade de cenários possíveis para uma análise pode ser infinito. O autor destaca que uma solução plausível é usar cenários extremos, que podem ajudar a definir outros cenários plausíveis, ou quando não há dados suficientes sobre as mudanças ao longo do tempo. Nesse sentido, os resultados dos cenários de acordo com a Figura 30 demonstram explicitamente o perfil ambiental do sistema com dados atuais e suas tendências de projeções futuras com diferentes resultados potenciais. Este método de avaliar e representar resultados pode fornecer informações mais precisas para a criação e gestão de metas combinadas de redução de impactos ambientais em políticas públicas.

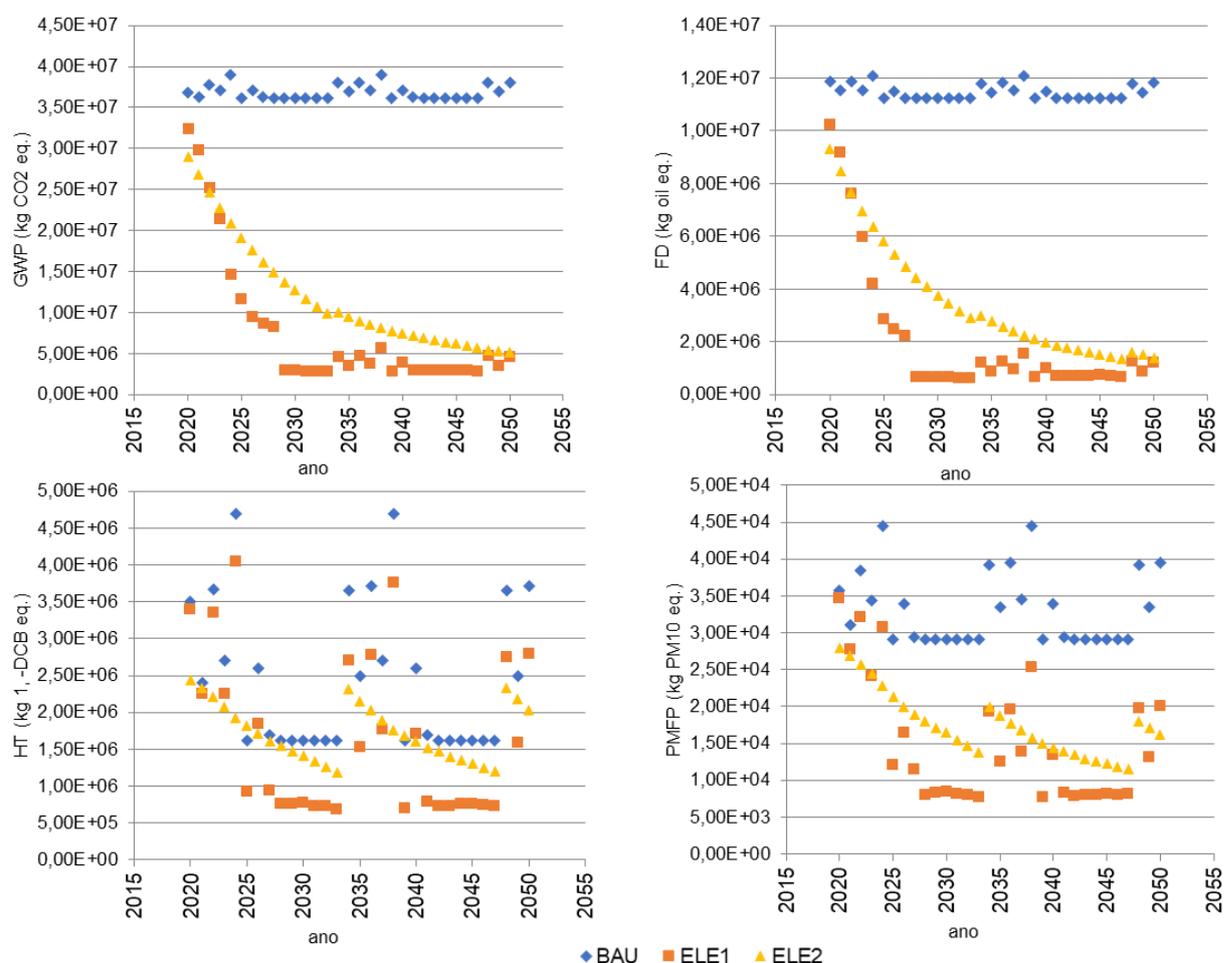
Como pode ser observado nos gráficos, a adoção de OE reduz os impactos para os três cenários avaliados. Os cenários EL1 e EL2, se adotados, podem reduzir as emissões significativamente em comparação com BAU. Assim, os resultados apresentados no estudo corroboram com outras avaliações realizadas por COONEY; et al. (2013) e NORDELÖF et al. (2019) em países desenvolvidos. Além disso, os achados ampliam a pesquisa em países emergentes, pois DREIER et al. (2018) já demonstraram que o uso de ônibus de baixo carbono pode contribuir para a descarbonização do transporte e auxiliar na consecução de metas de carbono no sistema BRT no Brasil.

De acordo com pesquisadores (BICER; DINCER, 2017). as substituições de baterias e atualizações da frota de ônibus também devem ser analisadas para comparar os diferentes tipos de combustíveis de forma eficaz. Destaca-se que esses fatores foram pouco explorados na literatura, pois a maior parte dos artigos avaliam o impacto de um único veículo, a abordagem de “frota” é pouco explorada. Portanto, é importante ressaltar que esses aspectos foram inseridos nos cenários desenvolvidos, como mencionado nos subcapítulos 3.3.1 e 3.4.1.1.

Consequentemente, se destaca que foram avaliados cenários de substituição da frota e o número elevado de veículos substituídos anualmente afeta diretamente os resultados. É perceptível que a contribuição mais elevada na substituição dos

veículos está presente nas categorias de impacto HT e PMF. Tal realidade, é similar a conclusões de outros autores, como VELANDIA VARGAS et al. (2019) que ressalta toxicidade humana, como categoria de impacto em que a contribuição da produção do veículo conta com quase 85% do impacto total por quilômetro. Em contrapartida, o autor demonstra que a contribuição mais significativa da eletricidade aparece nas mudanças climáticas, onde representa aproximadamente 30% do impacto total.

Figura 30 - Projeções de impacto de Potencial de Aquecimento Global (GWP) (em kg CO₂ eq.), Depleção de recursos fósseis (FD) (em kg oil eq.), Toxicidade humana (HT) (em kg 1,4-DCB eq.) e Formação de material particulado (PMFP) (em kg PM₁₀ eq.) por ano do sistema de transporte público (frota Carris) de Porto Alegre.



Fonte: Autor.

Outros autores também frisam como HT se distingue como uma categoria potencialmente significativa na transição de veículos convencionais para elétricos.

Impactos adicionais de toxicidade na fase de produção de veículos elétricos decorrem principalmente dos requisitos adicionais de cobre. Ademais, para o potencial de formação de material particulado (PMFP), a análise dos fluxos também identifica as cadeias de suprimentos de metal - níquel, cobre e alumínio - como as fontes dominantes de emissões da fase de produção do veículo, sendo as emissões de SO₂ a principal causa de PMF para todos os cenários de transporte do ciclo de vida (HAWKINS; GAUSEN; STRØMMAN, 2012).

BICER; DINCER (2017) também aponta que os valores de HT podem ser maiores em veículos elétricos devido à fabricação e etapas de manutenção em comparação com os veículos de abastecimento convencional. Nesse sentido, os *stakeholders* devem estar também atentos à contribuição significativa na produção de veículos em HT e PMF e fazer substituições de forma informada e consistente. No entanto, é indiscutível que apesar do aumento de emissões na fase de produção, OE ainda são mais vantajosos, já que há uma redução significativa na fase de operação na maioria dos impactos (BICER; DINCER, 2017).

Outro aspecto que merece atenção é que em todos os cenários analisados, os impactos da produção de baterias representam pequenas contribuições para os resultados de emissão de CO₂. No entanto, embora tal manufatura represente um percentual baixo, é fundamental mencionar que os resultados estão alinhados com a literatura de ACV sobre transporte público de ônibus, já que os impactos da produção de baterias não são tão expressivos se comparados em uma análise ampla do sistemas de transportes (NORDELÖF et al., 2019). MAJEAU-BETTEZ; HAWKINS; STRØMMAN (2011) ainda destacam que, exceto para depleção de ozônio, a bateria NiMH desempenha significativamente pior do que as duas baterias de Li-ion avaliadas pelo autor para todas as categorias de impacto. Segundo o autor, tal fato ocorre, uma vez que a bateria Li-ion possui maior eficiência na fase de uso, e armazena entre 2 a 3 vezes mais energia ao longo de sua vida, evitando recargas constantes e substituições recorrentes.

Ainda, enfatiza-se que o descarte da bateria não foi considerado por falta de dados, assim como descrito em detalhe no subcapítulo 3.4.2. Tal fato, prejudica a avaliação desse equipamento, uma vez que autores apontam a correlação entre a

fase de descarte e impactos ambientais elevados (UNTERREINER et al., 2016; ZHAO et al., 2019). UNTERREINER et al. (2016) também destaca a importância da análise da cadeia da bateria em sua totalidade devido ao alto potencial de reciclabilidade desse equipamento.

De acordo com os resultados, o cenário EL1 tem o maior potencial de redução de impacto entre os cenários analisados em relação aos resultados para todas as categorias de impacto, seguido por EL2 em comparação com BAU. Tal fato ocorre já que em EL1, a partir de 2029, acontece a substituição total de OC por OE, demonstrando o potencial de redução de 85,5% dos impactos associados a GWP.

Nesse contexto, os tomadores de decisão podem obter uma visão ampla de uma possível transição para OE, facilitando a compreensão e a comparação entre os cenários. No entanto, o gráfico é apenas uma ferramenta no processo decisório sobre ACV no setor de transportes; é recomendado que os *stakeholders* incluam outras partes interessadas para a discussão do desenvolvimento de políticas públicas.

Por um lado, ao decidir pela transição de OC para OE ao analisar BAU em comparação com EL1 e EL2, os tomadores de decisão devem considerar a escolha da matriz elétrica sob o território analisado, que no caso do Brasil corresponde a mais de 79,5% dos impactos no cenário EL1 em 2029 tendo como base GWP. Embora EL1 e EL2 apareçam como os melhores cenários em comparação com BAU (veja a Figura 30), as descobertas mostram a importância em considerar a fonte de energia na tomada de decisão, pois houve variações nos resultados de impacto ao longo dos anos, apesar da redução do consumo de combustíveis fósseis.

Tais achados alinham-se com a literatura, uma vez que pesquisadores indicam que as emissões em HT dependem fortemente na matriz escolhida (BICER; DINCER, 2017). Por exemplo, quando os países usam energia renovável, eles podem reduzir as emissões de HT (BOUREIMA et al., 2009), mas se a eletricidade for proveniente de recursos fósseis, os danos ao meio ambiente e à saúde humana podem persistir ou mesmo se agravar (BICER; DINCER, 2017).

Ainda, é importante notar que os cenários foram baseados em projeções do mercado brasileiro a partir de mudanças na matriz elétrica. Todavia, as autoridades públicas devem também suportar suas escolhas tendo como base variações nas matrizes locais, pois tal decisão pode alterar consideravelmente os resultados,

especialmente em grandes países com diferenças significativas entre regiões, como o Brasil. Um descritivo dessas variações é aprofundando nos subcapítulos 4.1.1.1.2.1 e 4.1.1.1.2.2.

Por fim, a inserção do OE pode impactar positivamente na redução da dependência de combustíveis fósseis (como o diesel usado como combustível para ônibus) nos casos em que a produção de eletricidade é baseada principalmente em fontes renováveis. É fundamental destacar que OE são preferidos pelos usuários que utilizam o transporte para deslocamento para diário em relação a outras tipologias de transporte público. Todavia, mesmo que as emissões diminuam, o aspecto ambiental não pode ser considerado um item prioritário para os passageiros, pois o tempo de congestionamento e viagem são os critérios apontados como primordiais (PRASETIO et al., 2019). Conseqüentemente, é essencial que as políticas de promoção de veículos de baixa emissão contemplem preferências e hábitos dos clientes, bem como especificidades territoriais, pois diferentes partes do mundo precisam de abordagens diferentes (KNEZ; OBRECHT, 2017). Assim, os tomadores de decisão devem criar diferentes mecanismos que não só priorizem o meio ambiente, mas também engajem a população-alvo no uso de OE, incluindo outros aspectos, como segurança, preço, tempo de viagem e qualidade do serviço oferecido.

4.1.3 Análise espacial

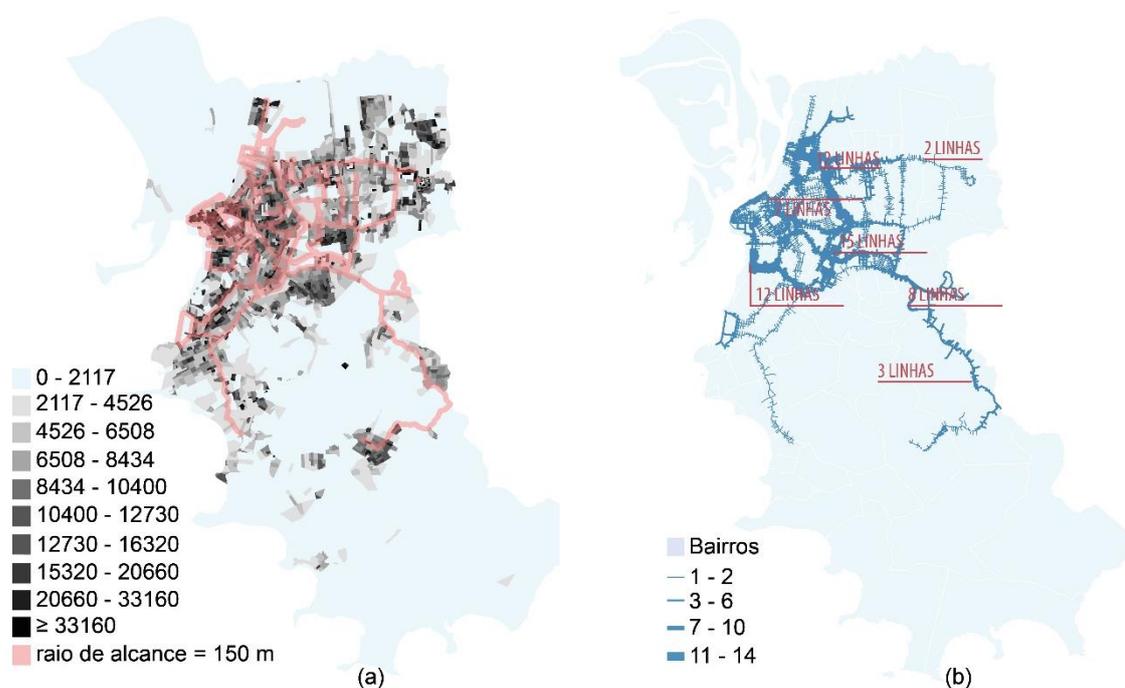
A representação espacial das linhas de ônibus através do SIG fornece não só uma visualização interativa, mas também a possibilidade de correlação das rotas com outros dados espaciais. Tal fato possibilita a tomada de decisão mais consistente, já que amplifica a noção prática do território, agora não restringido a dados isolados de transporte.

Dessa forma, se utiliza de dados especializados de densidade populacional para apoiar a ordem de substituição para OE ao longo de EL1. A escolha desse cenário como referência é dada pela rápida transição para veículos elétricos e a conseqüente necessidade de fazer escolhas importantes a curto prazo. Assim, a área do entorno de cada linha de ônibus e sua população imediata são estimadas e

substituições são feitas a partir da densidade média encontrada no entorno de cada linha.

Assim, com o apoio o software ArcGIS v.10.5 é executada a espacialização dos dados. A partir da delimitação das rotas, com a ferramenta *buffer*, raios de alcance de 150 metros são concebidos na envoltória das 37 linhas pertencentes a Carris. KAN et al. (2008) indicam essa distância para estimar a poluição de vias com alto tráfego. Subsequentemente, utilizando o recurso *intersect*, o *buffer* é mesclado com as subdivisões dos setores censitários, buscando estimar a densidade média presente no entorno imediato de para cada linha da frota. Tais estimativas são representadas na Figura 31.

Figura 31 - Espacialização dos dados; (a) densidade + raio de alcance linhas; (b) repetição linhas + vias.



Fonte: Autor

Em relação às linhas em específico, é observável a partir da Figura 31 que as rotas percorridas pelas “T” são as que mais se destacam, contando com 84% do total de quilômetros rodados e 86% do número de pessoas. As linhas T (transversais) atravessam a cidade, muitas vezes circulando por trechos de diferentes zonas e cruzando o centro em sua jornada. Desse modo, a média de quilômetros percorridos

em uma única viagem pelas linhas T em relação às demais também é mais significativo com 36,23 quilômetros por viagem. Dentre elas, a linha com maior distância percorrida é a T4 contando com mais de 8,2% da circulação total da frota, ela é seguida pela T9 que conta com 7,8% dos valores totais, tais valores são observáveis na Figura 20.

Ainda, se destaca a presença dos veículos T junto às perimetrais e seu nível de repetição junto às demais linhas. Nota-se um acúmulo de viagens junto ao centro e as arteriais, passando em sua maioria por zonas já consolidadas de Porto Alegre, considerando a localização de grande parte das rotas em vias contendo corredores de ônibus. A localização de cada linha junto ao perímetro de Porto Alegre pode ser visualizada no APÊNDICE C – .

Visando obter uma perspectiva ampla, os raios de alcance foram sobrepostos ao mapa de densidade populacional, buscando demonstrar as áreas de maior agregação e por conseguinte as primeiras a sofrerem mudanças. Na Figura 32 é possível perceber esse fenômeno, com as linhas T, em sua maioria, circulando por áreas com menor densidade acumulada. Outro aspecto notável, é o bolsão populacional formado em bairros centrais, que tem como linhas principais as “C” (circulares). Nesse sentido, decisões a respeito de cenários tendo em vista as linhas em si, devem ser executadas de acordo com a ponderação da relevância das variáveis do percurso.

Por conseguinte, levando em conta a contribuição de emissões veiculares na degradação da qualidade do ar, o presente estudo visa avaliar a relação do processo de combustão dos veículos convencionais para com a exposição dos moradores no entorno. Consequentemente, a densidade local é dada como fator principal a ser ponderado na substituição das linhas. Ainda, se destaca que dados especificados no subcapítulo 4.1.1.1.1 são utilizados na modelagem dos processos de combustão de Diesel e Biodiesel.

É importante citar que a concentração de material particulado diminui em função da adição de biodiesel ao diesel. Estudos apontam essa particularidade e o biocombustível como uma alternativa promissora para redução dos impactos de PMFP, reduzindo as emissões nocivas dos motores internos a combustão (MOFIJUR

et al., 2016; SCHMIDT; GERPEN, 1996). Dessa forma, OE oferecem recursos vantajosos em relação a OC, já que apresentam emissões zero no tubo de escape, baixa manutenção, maior eficiência do trem de força e, finalmente, menos poluição atrelada a seu percurso (HAWKINS; GAUSEN; STRØMMAN, 2012).

Verificando a relação direta de PMFP a partículas inaláveis danosas à saúde humana, é estimada uma área de risco a população local das emissões de escape do motor interno a combustão. Por meio do SIG, variações de impacto ao longo dos anos são visualizadas, a partir da soma das emissões provenientes em cada linha e a *rasterização* das áreas de exposição agregadas a ela. Com o enfoque da análise na densidade, o primeiro local a se perceber uma redução de material particulado é próximo a zona central.

À medida que as substituições de OC são executadas há uma redução global no impacto da frota e local nas áreas com maior acúmulo populacional. O eixo norte junto a Avenida Nilo Peçanha é outro ponto focal de substituição a curto prazo, as linhas mais afastadas de zonas densas são as substituídas por último, como as do eixo leste, mais afastadas da aglomeração urbana. É importante salientar que as substituições são feitas a partir da vida útil do veículo, conseqüentemente alguns anos não apresentam nenhuma mudança, como 2025, e outros redução significativa, até que os motores de combustão cessem de existir na frota em 2029. A Figura 32 demonstra a variação de emissões a partir das determinações de EL1.

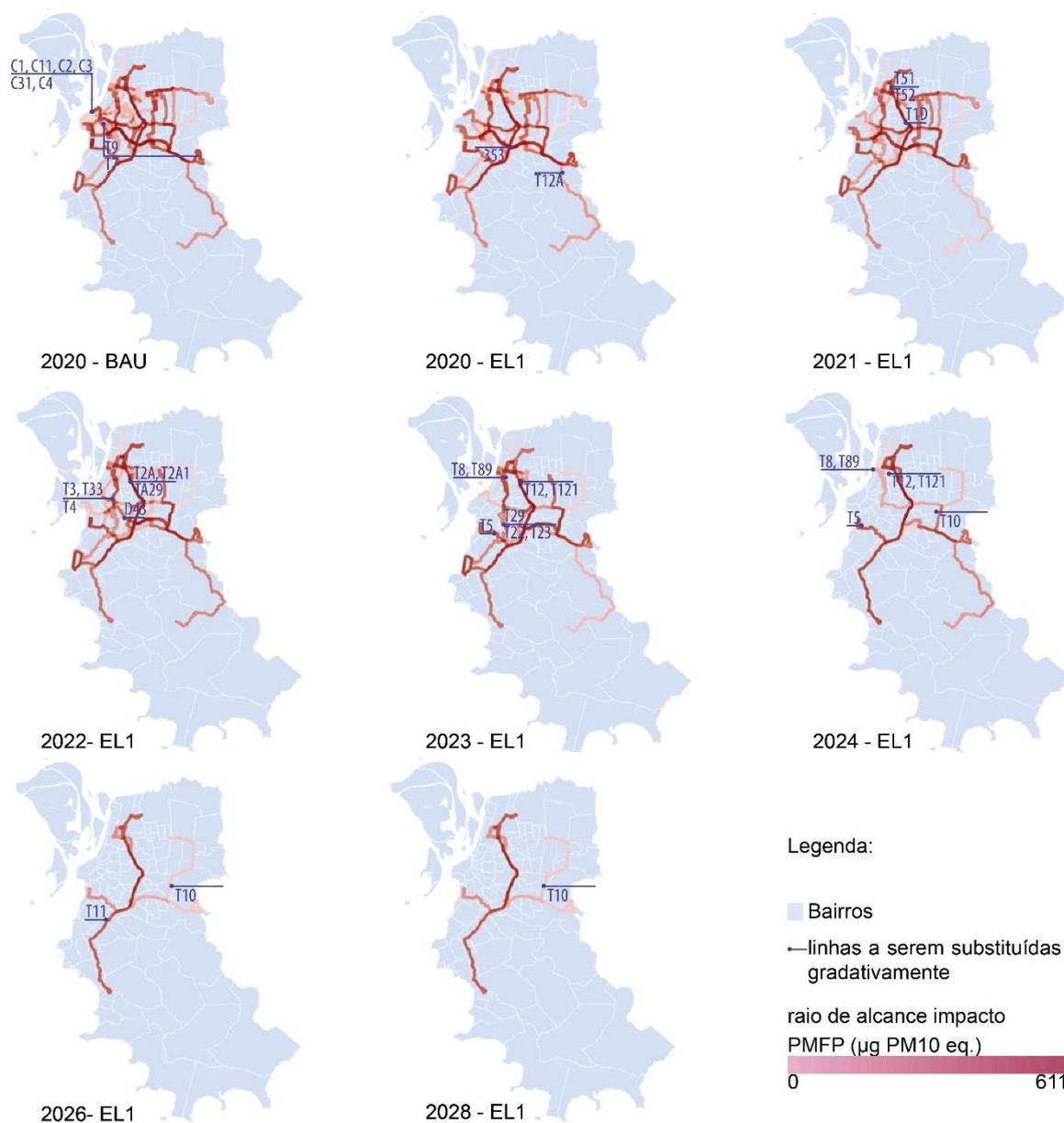
A incorporação da abordagem de ACV territorial facilita a interpretação por meio de mapas e agrega a estimativa de emissões com base na área de dispersão da poluição gerada por veículos a combustão. Tal fato introduz uma nova perspectiva para a tomada de decisão, que agora se dá considerando características agregadas à cidade em si e não só à empresa Carris separadamente. Além disso, se destaca que é feita uma avaliação anual considerando μg (Micrograma) de PMFP apenas das linhas da Carris e não do sistema de transporte em sua totalidade.

Todavia, por meio dos resultados obtidos, se inquirir que um mapeamento completo do transporte na capital traria indicadores valiosos, podendo afetar até mesmo tendências do mercado imobiliário. Adotar modelos espacialmente explícitos pode ser aprimorado para antecipar dinâmicas sociais futuras e áreas que necessitem de melhorias em infraestrutura viária. Quanto à Carris, os locais com maior volume de poluentes se localizam junto a região central e as perimetrais, zonas onde circulam as

linhas T e C. As linhas C1 e C11 são as que possuem a densidade mais elevada as circundado, aproximadamente 19.257 hab/km², valor superior à média da cidade de 6.232 habitantes por Km².

Os resultados demonstram a correlação entre o tráfego de ônibus e níveis PM10. Sendo os locais com maior circulação de veículos junto aos corredores de ônibus e centro da cidade. Por último, é importante destacar que políticas de transporte tendo em vista a eletrificação da frota condizentes a estratégias de planejamento urbano, reduziriam a poluição do ar em áreas chave, demonstrando a correlação da escolha por transportes sustentáveis como os hábitos da população.

Figura 32 - Emissões cenário 2 - EL1.



Fonte: Autor.

5 CONCLUSÕES

Na presente dissertação, uma estratégia dinâmica de diagnóstico e prognóstico futuro do desempenho ambiental do transporte por ônibus, considerando especificidades territoriais e diferentes cenários de mitigação, é desenvolvida. A estrutura combina variação da frota e inventários dinâmicos do ciclo de vida para avaliar em simultâneo o deslocamento de veículos convencionais e elétricos ao longo do tempo, bem como a contribuição das diferentes fontes de eletricidade e combustíveis sobre a operação do sistema espacialmente.

Nesse sentido, uma contribuição fundamental da pesquisa é a avaliação das mudanças de tecnologia considerando o comportamento transitório da frota de ônibus, possibilitando a percepção dos efeitos das escolhas ano a ano. Ademais, este trabalho não avalia o setor de transporte isoladamente, mas também verifica as contribuições por fonte na matriz elétrica brasileira, possibilitando um entendimento amplo do impacto atrelado a diferentes tecnologias de geração de eletricidade e as particularidades de cada uma frente as dimensões continentais do país e prognósticos futuros.

É perceptível que a introdução de OE na frota é uma opção de redução de impactos ambientais no transporte em Porto Alegre, com base na contribuição por fonte na matriz. De acordo com os resultados, a transição do cenário BAU para EL1 pode ser apresentada como a solução que tem maior redução de impactos, porém diversos fatores não foram considerados, como o investimento financeiro para esta rápida transição. Particularmente, a manutenção do cenário EL2 favorece a percepção gradativa de substituição da frota pela população; essa mudança gradual poderia engajar e incentivar os usuários a aderirem a modais de transporte público. No entanto, a escolha do cenário EL1 é uma alternativa em caso da necessidade na obtenção de resultados a curto prazo, que devem estar alinhados com a disponibilidade local de energia renovável e metas da municipalidade. Assim, recomenda-se avaliar também cenários intermediários, uma vez que as decisões devem ser alinhadas com os objetivos estratégicos e prioridades de cada região.

A partir da adesão com políticas nacionais de biocombustível, os resultados também apontam que o aumento de biodiesel na mistura eleva as emissões em todas as categorias de impacto exceto FD. Outra tendência verificada é que à medida que os OC vão sendo substituídos, há redução da eficiência, sendo tal decréscimo mais explícito em anos com maior número de substituições de veículos. O aumento dos impactos está relacionado ao incremento de biodiesel à mistura, e à adesão a veículos com ar-condicionado e câmbio automático que diminuem a eficiência do sistema. Adicionalmente, de acordo com os resultados desta pesquisa, as leis federais sobre produção de biocombustíveis têm forte influência sobre o transporte coletivo e seus impactos, mas identificar outras particularidades do sistema é primordial para vislumbrar a melhor ação para os municípios. Assim, diversas estratégias para mitigar os impactos no transporte devem ser consideradas, permitindo uma evolução tecnológica que reduza impactos, seja por meio de mudanças no combustível ou pela eletrificação da frota.

Considerando cenários de eletrificação, destaca-se que a transição para fontes energéticas mais limpas como eletricidade, revela a contribuição significativa de outras partes do sistema, como manutenção e produção dos veículos que se tornam mais relevantes no ciclo de vida da frota considerando os altos números de substituição em EL1. Assim, estudos futuros devem considerar essas etapas de forma mais aprofundada, bem como avaliar a disponibilidade futura no fornecimento de energia limpa, dando suporte a decisões amplas e transparentes.

Mais do que os resultados práticos do estudo de caso, a pesquisa demonstra que na condução de uma ACV para apoio à tomada de decisão em serviços públicos urbanos, uma abordagem detalhada é necessária, considerando que as variáveis tecnológicas interagem diretamente com o contexto territorial em uma rede complexa na qual se conectam mudanças de lei e comportamento dos usuários.

Portanto, os aspectos essenciais da modelagem de ACV Territorial para avaliação de impacto foram utilizados buscando considerar os fatores que podem realmente produzir uma mudança no cenário atual e apoiar políticas voltadas para o alcance das metas de desenvolvimento sustentável. Tal abordagem foi facilitadora na definição do objetivo e escopo do estudo, bem como contribuinte nas etapas de ICV e interpretação. Na interpretação em especial, o mapeamento das emissões e a correlação das rotas junto a dados populacionais mostrou-se vantajosa na

conectividade da ferramenta de ACV na consecução e verificação de medidas voltadas ao planejamento futuro.

5.1. Sugestões para trabalhos futuros

Por fim, como sugestão para novos estudos, recomenda-se o aprofundamento da utilização de SIG e ACV para tomada de decisão considerando variedades populacionais além da densidade. Outra possibilidade é ampliar do escopo do estudo e considerar emissões localizadas para toda a frota de veículos (ônibus, veículos a passeio, caminhões etc.) dentro dos limites da cidade de Porto Alegre. Outra opção seria a verificação do potencial de circularidade das baterias veiculares, analisando cenários de disposição final e reciclagem da mesma.

Além disso, a importância de se analisar a situação econômica e a viabilidade de cada cenário deve ser enfatizada, já que o presente estudo se limita a entender o impacto potencial do sistema sob a ótica ambiental. Portanto, a análise de viabilidade econômica deve considerar outros aspectos como os custos de recarga e materiais dos veículos, bem como a disponibilidade de eletricidade para abastecer os OE em Porto Alegre, uma vez que o aumento da demanda pode contribuir para o uso de fontes fósseis na matriz. Nesse contexto, os custos da energia elétrica brasileira podem ser utilizados e comparados aos custos de produção e transporte de diesel e do biodiesel até a garagem da prestadora de serviços. Outra sugestão é analisar os resultados usando análise de incerteza para avaliar mais variabilidades temporais e territoriais, especialmente considerando a precificação da energia e sua disponibilidade.

REFERÊNCIAS

ABNT NBR ISO 14040 NBRISO14040 Gestão ambiental. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/21711/abnt-nbriso14040-gestao-ambiental-avaliacao-do-ciclo-de-vida-principios-e-estrutura>>. Acesso em: 6 ago. 2022a.

ABNT NBR ISO 14044 NBRISO14044 Gestão ambiental. Disponível em: <<https://www.normas.com.br/visualizar/abnt-nbr-nm/28378/abnt-nbriso14044-gestao-ambiental-avaliacao-do-ciclo-de-vida-requisitos-e-orientacoes>>. Acesso em: 7 ago. 2022b.

A study of life cycle assessment in two old neighbourhoods in Belgium - ScienceDirect. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2210670718322352>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

ACCARDO, A. et al. Life Cycle Assessment of an NMC Battery for Application to Electric Light-Duty Commercial Vehicles and Comparison with a Sodium-Nickel-Chloride Battery. **Applied Sciences**, v. 11, n. 3, p. 1160, jan. 2021.

ADEDEJI, P. A. et al. Potential Roles of Artificial Intelligence in the LCI of Renewable Energy Systems. (S. S. Emamian, M. Awang, F. Yusof, Eds.) **Advances in Manufacturing Engineering. Anais...: Lecture Notes in Mechanical Engineering.** Singapore: Springer, 2020.

ALBERS, A. et al. Coupling partial-equilibrium and dynamic biogenic carbon models to assess future transport scenarios in France. **Applied Energy**, v. 239, p. 316–330, 1 abr. 2019.

ALLY, J.; PRYOR, T. Life-cycle assessment of diesel, natural gas and hydrogen fuel cell bus transportation systems. **Journal of Power Sources**, v. 170, n. 2, p. 401–411, 10 jul. 2007.

AL-THAWADI, F. E.; AL-GHAMDI, S. G. Evaluation of sustainable urban mobility using comparative environmental life cycle assessment: A case study of Qatar. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 1, p. 100003, 1 jun. 2019.

AMATUNI, L. et al. Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective. **Journal of Cleaner Production**, v. 266, p. 121869, 1 set. 2020.

ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos. Disponível em: <<http://www.antp.org.br/sistema-de-informacoes-da-mobilidade/apresentacao.html>>. Acesso em: 6 ago. 2022a.

ANTP - Associação Nacional de Transportes Públicos. Disponível em: <<http://antp.org.br/noticias/destaques/antp-lanca-novo-caderno-tecnico-a-importancia-macroeconomica-e-socioambiental-do-transporte-publico-por-onibus-no-brasil.html>>. Acesso em: 6 ago. 2022b.

Anuário Estatístico de Energia Elétrica. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/anuario-estatistico-de-energia-eletrica>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Apresentação. Disponível em: <<https://www.kelman.com.br/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

AR5 Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change — IPCC. , [s.d.]. Disponível em: <<https://www.ipcc.ch/report/ar5/wg3/>>. Acesso em: 6 ago. 2022

Avaliação do Ciclo de Vida - Ciclog. Disponível em: <<https://ciclodevida.ufsc.br/avaliacao-do-ciclo-de-vida/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

AZAPAGIC, A.; PETTIT, C.; SINCLAIR, P. A life cycle methodology for mapping the flows of pollutants in the urban environment. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 9, n. 3, p. 199–214, 1 ago. 2007.

Balanco Energético Nacional. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-ben>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Balanco Energético Nacional 2015. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Balanco-Energetico-Nacional-2015>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Balanco Energético Nacional 2020. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2020>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Balanco Energético Nacional 2021. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2021>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

BASTOS, J. et al. Environmental impacts of commuting modes in Lisbon: a life-cycle assessment addressing particulate matter impacts on health. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 13, n. 9, p. 652–663, 2019.

BENGTSSON, M. et al. An approach for handling geographical information in life cycle assessment using a relational database. **Journal of Hazardous Materials**, v. 61, n. 1, p. 67–75, 1 ago. 1998.

BI, Z. et al. Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system. **Applied Energy**, v. 146, p. 11–19, 15 maio 2015.

BICER, Y.; DINCER, I. Comparative life cycle assessment of hydrogen, methanol and electric vehicles from well to wheel. **International Journal of Hydrogen Energy**, The

7th International Conference on Hydrogen Production (ICH2P-2016), 8-11 May 2016, Hangzhou, China. v. 42, n. 6, p. 3767–3777, 9 fev. 2017.

BILGILI, L. et al. Evaluation of railway versus highway emissions using LCA approach between the two cities of Middle Anatolia. **Sustainable Cities and Society**, v. 49, p. 101635, 1 ago. 2019.

BORÉN, S. Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 14, n. 12, p. 956–971, 1 out. 2020.

BOUREIMA, F.-S. et al. Comparative LCA of electric, hybrid, LPG and gasoline cars in Belgian context. **World Electric Vehicle Journal**, v. 3, n. 3, p. 469–476, set. 2009.

Cars, planes, trains: where do CO₂ emissions from transport come from? Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Centro **Clima.** Disponível em: <<http://www.ppe.ufrj.br/index.php/pt/pesquisa/laboratorios/centro-clima>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

CHERUBINI, F.; BRIGHT, R. M.; STRØMMAN, A. H. Site-specific global warming potentials of biogenic CO₂ for bioenergy: contributions from carbon fluxes and albedo dynamics. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 4, p. 045902, nov. 2012.

CHESTER, M. et al. Infrastructure and automobile shifts: positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals. **Environmental Research Letters**, v. 8, n. 1, p. 015041, mar. 2013a.

CHESTER, M.; HORVATH, A. High-speed rail with emerging automobiles and aircraft can reduce environmental impacts in California's future. **Environmental Research Letters**, v. 7, n. 3, p. 034012, jul. 2012.

CHESTER, M. V. et al. Integrating Life-cycle Environmental and Economic Assessment with Transportation and Land Use Planning. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 21, p. 12020–12028, 5 nov. 2013b.

CHESTER, M. V.; CANO, A. Time-based life-cycle assessment for environmental policymaking: Greenhouse gas reduction goals and public transit. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 43, p. 49–58, 1 mar. 2016.

CHOI, W. et al. Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea. **Applied Energy**, v. 265, p. 114754, 1 maio 2020.

CHOMA, E. F., & UGAYA, C. M. L. **Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet.** Journal of Cleaner Production, 152, 497–507. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.07.091>, 2017

CIROTH, A. Data Quality in Life Cycle Inventories. Em: CIROTH, A.; ARVIDSSON, R. (Eds.). **Life Cycle Inventory Analysis : Methods and Data**. LCA Compendium – The Complete World of Life Cycle Assessment. Cham: Springer International Publishing, 2021. p. 97–122.

COMUNELLO, P. **Carris pretende incluir ônibus elétricos na frota de coletivos**. Disponível em: <https://www.jornaldocomercio.com/_conteudo/2016/03/cadernos/jc_logistica/487175-carris-pretende-incluir-onibus-eletricos-na-frota-de-coletivos.html>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Constituição da República Federativa do Brasil. p. 498, [s.d.].

COONEY, G.; HAWKINS, T. R.; MARRIOTT, J. Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 5, p. 689–699, 2013.

CROCCE ROMANO ESPINOSA, D.; MOURA BERNARDES, A.; ALBERTO SOARES TENÓRIO, J. Brazilian policy on battery disposal and its practical effects on battery recycling. **Journal of Power Sources**, v. 137, n. 1, p. 134–139, 5 out. 2004.

CRUZ, L. et al. Greening transportation and parking at University of Coimbra. **International Journal of Sustainability in Higher Education**, v. 18, n. 1, p. 23–38, 1 jan. 2017.

DA SILVA, R. E.; SOBRINHO, P. M.; DE SOUZA, T. M. How can energy prices and subsidies accelerate the integration of electric vehicles in Brazil? An economic analysis. **The Electricity Journal**, v. 31, n. 3, p. 16–22, 1 abr. 2018.

Dados Abertos Dados Abertos. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/dados-abertos>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Dados Abertos - Datapoa. Disponível em: <<http://datapoa.com.br/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

DE BORTOLI, A.; CHRISTOFOROU, Z. Consequential LCA for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris. **Journal of Cleaner Production**, v. 273, p. 122898, 10 nov. 2020.

DING, T.; BOURRELLY, S.; ACHTEN, W. M. J. Operationalising territorial life cycle inventory through the development of territorial emission factor for European agricultural land use. **Journal of Cleaner Production**, v. 263, p. 121565, 1 ago. 2020.

DONG, Y. H.; NG, S. T. Comparing the midpoint and endpoint approaches based on ReCiPe—a study of commercial buildings in Hong Kong. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 19, n. 7, p. 1409–1423, 1 jul. 2014.

DREIER, D. et al. 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, 1 jan. 2018.

DRESEN, B.; JANDEWERTH, M. Integration of spatial analyses into LCA—calculating GHG emissions with geoinformation systems. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 9, p. 1094–1103, 1 nov. 2012.

DU, C. et al. Life cycle assessment addressing health effects of particulate matter of mechanical versus manual sugarcane harvesting in Brazil. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 23, n. 4, p. 787–799, 1 abr. 2018.

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, 1 set. 2015.

Evaluation of sustainable transport research in 2000–2019 - ScienceDirect. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652620304510>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

FESTY, B. [Urban atmospheric pollution: sources, pollutants and evolution]. **Bulletin De l'Academie Nationale De Medecine**, v. 181, n. 3, p. 461–474; discussion 474–476, 18 mar. 1997.

FIELD, F.; KIRCHAIN, R.; CLARK, J. Life-Cycle Assessment and Temporal Distributions of Emissions: Developing a Fleet-Based Analysis. **Journal of Industrial Ecology**, v. 4, n. 2, p. 71–91, 2000.

Fontes renováveis devem aumentar participação na matriz energética em 2022. 2022. Disponível em: <<http://bitly.ws/wtGL>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

FONTOURA, W. B., CHAVES, G. de L. D., & RIBEIRO, G. M. **The Brazilian urban mobility policy: The impact in São Paulo transport system using system dynamics.** *Transport Policy*, 73, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.09.014>, 2019

FRANÇOIS, C. et al. Environmental assessment of urban mobility: Combining life cycle assessment with land-use and transport interaction modelling—Application to Lyon (France). **Ecological Indicators**, v. 72, p. 597–604, 1 jan. 2017.

FURTADO, D. C. Transporte Coletivo Responsivo à Demanda: uma análise de requisitos de aceitabilidade para potenciais usuários no Distrito Federal. 10 jul. 2017.

GARCIA, R.; GREGORY, J.; FREIRE, F. Dynamic fleet-based life-cycle greenhouse gas assessment of the introduction of electric vehicles in the Portuguese light-duty fleet. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 20, n. 9, p. 1287–1299, 1 set. 2015.

GARCÍA SÁNCHEZ, J. A. et al. 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, 1 out. 2013.

GASOL, C. M. et al. Environmental assessment: (LCA) and spatial modelling (GIS) of energy crop implementation on local scale. **Biomass and Bioenergy**, v. 35, n. 7, p. 2975–2985, 1 jul. 2011.

GASPAROTTO, J.; DA BOIT MARTINELLO, K. Coal as an energy source and its impacts on human health. **Energy Geoscience**, Coal energy and environmental impacts. v. 2, n. 2, p. 113–120, 1 abr. 2021.

GEYER, R. et al. Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 15, n. 7, p. 692–703, 1 ago. 2010.

Global Transportation Services Industry. Disponível em: <<https://www.reportlinker.com/p05960735/Global-Transportation-Services-Industry.html>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

GOMES, L. E. **Círculo vicioso: cai o número de usuários, aumenta a passagem, cai ainda mais o número de usuários. Fim da Linha**, 11 mar. 2019. Disponível em: <<https://fimdalinha.sul21.com.br/circulo-vicioso-cai-o-numero-de-usuarios-aumenta-a-passagem-cai-ainda-mais-o-numero-de-usuarios/>>. Acesso em: 7 ago. 2022

GROEN, E. A. et al. **Sensitivity analysis in life cycle assessment**. 2014. Disponível em: <<https://research.wur.nl/en/publications/sensitivity-analysis-in-life-cycle-assessment-2>>. Acesso em: 7 ago. 2022

Guidelines for Life-Cycle Assessment: : A “Code of Practice” from the workshop held at Sesimbra, Portugal, 31 March - 3 April 1993 Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETAC). **Environmental Science and Pollution Research International**, v. 1, n. 1, p. 55, jan. 1994.

GUINÉE, J. et al. Life cycle assessment An operational guide to the ISO standards. **undefined**, 2001.

GUYON, O. Methodology for the Life Cycle Assessment of a Car-sharing Service. **undefined**, 2017.

HAWKINS, T. R.; GAUSEN, O. M.; STRØMMAN, A. H. Environmental impacts of hybrid and electric vehicles—a review. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 17, n. 8, p. 997–1014, 1 set. 2012.

HILOIDHARI, M. et al. Emerging role of Geographical Information System (GIS), Life Cycle Assessment (LCA) and spatial LCA (GIS-LCA) in sustainable bioenergy planning. **Bioresource Technology**, Special Issue on International Conference on

Current Trends in Biotechnology & post ICCB-2016 conference on Strategies for Environmental Protection and Management (ICSEPM-2016). v. 242, p. 218–226, 1 out. 2017.

HOJAS BAENAS, J. M. et al. A study of reverse logistics flow management in vehicle battery industries in the midwest of the state of São Paulo (Brazil). **Journal of Cleaner Production**, v. 19, n. 2, p. 168–172, 1 jan. 2011.

Home. Disponível em: <<https://ecoinvent.org/>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

HOOFTMAN, N. et al. Environmental Analysis of Petrol, Diesel and Electric Passenger Cars in a Belgian Urban Setting. **Energies**, v. 9, n. 2, p. 84, fev. 2016.

IBGE | Censo 2010. Disponível em: <<https://censo2010.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

ISO 14040:2006. Disponível em: <<https://www.iso.org/cms/render/live/en/sites/isoorg/contents/data/standard/03/74/37456.html>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

JIANG, B., LIANG, S., PENG, Z. R.,... REMAIS, J. V. **Transport and public health in China: the road to a healthy future**. The Lancet. Lancet Publishing Group. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(17\)31958-X](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(17)31958-X), 2017, October 14 JÚNIOR, N. M. PREFEITURA MUNICIPAL DE PORTO ALEGRE. p. 192, [s.d.].

KHAN, M. I. et al. Life cycle (well-to-wheel) energy and environmental assessment of natural gas as transportation fuel in Pakistan. **Applied Energy**, v. 242, p. 1738–1752, 15 maio 2019.

KNEZ, M.; OBRECHT, M. Policies for Promotion of Electric Vehicles and Factors Influencing Consumers' Purchasing Decisions of Low Emission Vehicles. 2017.

KNOBLOCH, F. et al. Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time. **Nature Sustainability**, v. 3, n. 6, p. 437–447, jun. 2020.

KUBAŃSKI, M. Prospects for the Use of Electric Vehicles in Public Transport on the Example of the City of Czechowice-Dziedzice. **Transportation Research Procedia**, LOGI 2019 - Horizons of Autonomous Mobility in Europe. v. 44, p. 110–114, 1 jan. 2020.

KUNZ, M. et al. The Influence of Public Policies on Urban Mobility: A Comparative Study between Porto Alegre (Brazil) and Washington D.C. (United States). **Journal of Civil Engineering and Architecture**, 11(3). <https://doi.org/10.17265/1934-7359/2017.03.009>, 2017, 2017

LAMPIS, A. **Dossier de Energia 2022. Brasil: um foco no setor elétrico**. [s.l.] Banco Interamericano de Desenvolvimento, 2 maio 2022. Disponível em: <<https://publications.iadb.org/pt/node/32134>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

LANG, J. et al. Energy and Environmental Implications of Hybrid and Electric Vehicles in China. **Energies**, v. 6, n. 5, p. 2663–2685, maio 2013.

LAUSSELET, C.; LUND, K. M.; BRATTEBØ, H. LCA and scenario analysis of a Norwegian net-zero GHG emission neighbourhood: The importance of mobility and surplus energy from PV technologies. **Building and Environment**, v. 189, p. 107528, 1 fev. 2021.

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

Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice | Wiley. Disponível em: <<https://www.wiley.com/en-us/Life+Cycle+Assessment+%28LCA%29%3A+A+Guide+to+Best+Practice-p-9783527655649>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Life Cycle Assessment of a heavy metro train - ScienceDirect. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652614010658>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Life cycle assessment to quantify the impact of technology improvements in bike-sharing systems - Bonilla-Alicea - 2020 - Journal of Industrial Ecology - Wiley Online Library. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/jiec.12860>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

LIU, K. F.-R. et al. GIS-Based Regionalization of LCA. **Journal of Geoscience and Environment Protection**, v. 2, n. 2, p. 1–8, 17 abr. 2014.

LOMBARDI, L., TRIBIOLI, L., COZZOLINO, R., & BELLA, G. **Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA**. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(12), 1989–2006. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1294-y>, 2017

LOUIZA, H., Zéroual, A., & DJAMEL, H. **Impact of the transport on the urban heat island**. *International Journal for Traffic and Transport Engineering*, 5(3), 252–263. [https://doi.org/10.7708/ijtte.2015.5\(3\).03](https://doi.org/10.7708/ijtte.2015.5(3).03), 2015
LOISEAU, E. et al. Implementation of an adapted LCA framework to environmental assessment of a territory: important learning points from a French Mediterranean case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 80, p. 17–29, 1 out. 2014.

LOISEAU, E. et al. Territorial Life Cycle Assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda. **Journal of Cleaner Production**, v. 176, p. 474–485, 1 mar. 2018.

Low-Carbon Land Transport: Policy Handbook. Disponível em: <<https://www.routledge.com/Low-Carbon-Land-Transport-Policy-Handbook/Bongardt-Creutzig-Huging-Sakamoto-Bakker-Gota-Bohler-Baedeker/p/book/9781849713771>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

LUKKA, K. The Constructive Research Approach. Em: **Case Study Research in Logistics**. [s.l: s.n.]. p. 83–101.

MAJEAU-BETTEZ, G.; HAWKINS, T. R.; STRØMMAN, A. H. **Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles**. research-article. Disponível em: <<https://pubs.acs.org/doi/pdf/10.1021/es103607c>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

MARKETING, D. DE V. FOR. **Carreta Prancha. Lafaete**, [s.d.]. Disponível em: <<https://www.lafaetelocacao.com.br/produto/carreta-prancha/>>. Acesso em: 7 ago. 2022

MASTRUCCI, A. et al. **GIS-based Life Cycle Assessment of urban building stocks retrofitting. A bottom-up framework applied to Luxembourg**. *EnvironInfo/ICT4S. Anais...*2015.

Matrizes Elétricas Estaduais 2016 - ano ref. 2015 (PDF) — Português (Brasil). Disponível em: <<https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/secretarias/spe/publicacoes/matrizes-energeticas-estaduais/03-matrizes-eletricas-estaduais-2016-ano-ref-2015-pdf.pdf/view>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

MENDES, N. C.; BUENO, C.; OMETTO, A. R. Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida: revisão dos principais métodos. **Production**, v. 26, p. 160–175, 24 nov. 2015.

MESSAGIE, M. et al. Environmental and Financial Evaluation of Passenger Vehicle Technologies in Belgium. **Sustainability**, v. 5, n. 12, p. 5020–5033, dez. 2013.

Metade dos ônibus de Porto Alegre tem mais de uma década de uso, e 10% da frota deve ser aposentada até o final do ano. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2022/01/metade-dos-onibus-de-porto-alegre-tem-mais-de-uma-decada-de-uso-e-10-da-frota-deve-ser-aposentada-ate-o-final-do-ano-ckymuf7c20007015p7ja19v7h.html>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

MEZA-PALACIOS, R. et al. Life cycle assessment of cane sugar production: The environmental contribution to human health, climate change, ecosystem quality and resources in México. **Journal of Environmental Science and Health, Part A**, v. 54, n. 7, p. 668–678, 7 jun. 2019.

MICHEAL, A.; MOUSSA, R. R. Investigating the Economic and Environmental Effect of Integrating Sugarcane Bagasse (SCB) Fibers in Cement Bricks. **Ain Shams Engineering Journal**, v. 12, n. 3, p. 3297–3303, 1 set. 2021.

MISHALANI, R. G. et al. Modeling the relationships among urban passenger travel carbon dioxide emissions, transportation demand and supply, population density, and proxy policy variables. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 33, p. 146–154, 1 dez. 2014.

MOFIJUR, M. et al. Role of biofuel and their binary (diesel–biodiesel) and ternary (ethanol–biodiesel–diesel) blends on internal combustion engines emission reduction. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 53, p. 265–278, 1 jan. 2016.

MORO, A.; HELMERS, E. A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 22, n. 1, p. 4–14, 1 jan. 2017.

MUÑOZ, E. et al. SIMON: Assisted Mobility for Older and Impaired Users. **Transportation Research Procedia**, Transport Research Arena TRA2016. v. 14, p. 4420–4429, 1 jan. 2016.

NAHLIK, M. J.; CHESTER, M. V. Transit-oriented smart growth can reduce life-cycle environmental impacts and household costs in Los Angeles. **Transport Policy**, v. 35, p. 21–30, 1 set. 2014.

NANAKI, E. A.; KORONEOS, C. J. Comparative LCA of the use of biodiesel, diesel and gasoline for transportation. **Journal of Cleaner Production**, v. 20, n. 1, p. 14–19, 1 jan. 2012.

Não podemos ser tão dependentes das chuvas, diz especialista sobre crise hídrica. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/business/nao-podemos-ser-tao-dependentes-das-chuvas-diz-especialista-sobre-crise-hidrica/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

NEMATCHOUA, M. K. From existing neighbourhoods to net-zero energy and nearly zero carbon neighbourhoods in the tropical regions. **Solar Energy**, v. 211, p. 244–257, 15 nov. 2020.

NORDELÖF, A. et al. Less or different environmental impact? **Systems Perspectives on Electromobility 2013**, p. 60–75, 2013.

NORDELÖF, 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, 1 out. 2019.

Óleo Diesel | Petrobras. Disponível em: <<https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/produtos/automotivos/oleo-diesel/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

ONU BRASIL. **ONU-Habitat: população mundial será 68% urbana até 2050.** Disponível em: <<http://bitly.ws/wtGj>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

OSORIO-TEJADA, J. L.; LLERA-SASTRESA, E.; HARIZA HASHIM, A. Well-to-Wheels Approach for the Environmental Impact Assessment of Road Freight Services. **Sustainability**, v. 10, n. 12, p. 4487, dez. 2018.

OWEN, C. L. Design research: building the knowledge base. **Design Studies**, v. 19, n. 1, p. 9–20, 1 jan. 1998.

PATELLA, S. M. et al. Traffic Simulation-Based Approach for A Cradle-to-Grave Greenhouse Gases Emission Model. **Sustainability**, v. 11, n. 16, p. 4328, jan. 2019.

Comparison of LCA and external-cost analysis for biodiesel and diesel | Semantic Scholar. Disponível em:

<<https://www.semanticscholar.org/paper/Comparison-of-LCA-and-external-cost-analysis-for-Nocker-Spirinckx/0a56ef72f74344786768b30aee8280f7212f9d29>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

PÉNARD-MORAND, C.; ANNESI-MAESANO, I. Air pollution: from sources of emissions to health effects. **Breathe**, v. 1, n. 2, p. 108–119, dez. 2004.

Pilhas e baterias. Disponível em:

<http://ibama.gov.br/index.php?option=com_content&view=article&id=729&Itemid=962>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Plano de Mobilidade Urbana | Prefeitura de Porto Alegre. Disponível em: <<https://prefeitura.poa.br/smim/projetos/plano-de-mobilidade-urbana>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Plano de Mobilidade Urbana nas capitais (2018). Disponível em: <<https://www.mobilize.org.br/estatisticas/54/plano-de-mobilidade-urbana-nas-capitais-2018.html>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental (PDDUA) e Anexos | Prefeitura de Porto Alegre. Disponível em: <<https://prefeitura.poa.br/carta-de-servicos/plano-diretor-de-desenvolvimento-urbano-ambiental-pddua-e-anexos>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

População rural e urbana | Educa | Jovens - IBGE. Disponível em: <<https://educa.ibge.gov.br/jovens/conheca-o-brasil/populacao/18313-populacao-rural-e-urbana.html>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

PORTO ALEGRE. **SMF.** Disponível em: <http://www2.portoalegre.rs.gov.br/smf/default.php?reg=19&p_secao=256>. Acesso em: 6 ago. 2022a.

PORTO ALEGRE. **EPTC.** Disponível em: <<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/eptc/>>. Acesso em: 6 ago. 2022b.

PRADHAN, A.; MBOHWA, C. **Development of Life Cycle Inventory (LCI) for Sugarcane Ethanol Production in South Africa.** 2017 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC). **Anais...**dez. 2017.

PRASETIO, E. A. et al. **Acceptance of Electric Vehicle in Indonesia: Case Study in Bandung.** 2019 6th International Conference on Electric Vehicular Technology (ICEVT). **Anais...**nov. 2019.

Prefeitura de Porto Alegre. Disponível em: <<https://prefeitura.poa.br/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Prometida para outubro, renovação da frota de ônibus da Carris fica para o ano que vem. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2019/10/prometida-para-outubro-renovacao-da-frota-de-onibus-da>>

carris-fica-para-o-ano-que-vem-ck2aywi5t01wj01n3veugd25r.html>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Prospective Analysis of Traffic Exposure as a Risk Factor for Incident Coronary Heart Disease: The Atherosclerosis Risk in Communities (ARIC) Study | Environmental Health Perspectives | Vol. 116, No. 11. Disponível em: <https://ehp.niehs.nih.gov/doi/10.1289/ehp.11290?url_ver=Z39.88-2003&rfr_id=ori:rid:crossref.org&rfr_dat=cr_pub%20%20pubmed>. Acesso em: 7 ago. 2022.

RAHMAN, M. H.; CHIN, H. C.; HAQUE, M. M. Environmental sustainability of urban road transport: an integrated analysis for life cycle emission impact. **International Journal of Environment and Sustainable Development**, v. 13, n. 2, p. 126–141, 2014.

RAJAEIFAR, M. A. et al. Attributional and consequential environmental assessment of using waste cooking oil- and poultry fat-based biodiesel blends in urban buses: a real-world operation condition study. **Biofuel Research Journal**, v. 4, n. 3, p. 638–653, 1 set. 2017.

RATHORE, V. K.; MONDAL, P. Life cycle assessment of defluoridation of water using laterite soil based adsorbents. **Journal of Cleaner Production**, v. 180, p. 716–727, 10 abr. 2018.

ReCiPe - PRé Sustainability. Disponível em: <<https://pre-sustainability.com/articles/recipe/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Relatórios e Publicações | Emissão Veicular. Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Resolução CNPE Nº 16 DE 29/10/2018 - Federal - LegisWeb. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=369098>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Resolução EPTC Nº 2 DE 07/02/2019 - Municipal - Porto Alegre - LegisWeb. Disponível em: <<https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=374764>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

RÜDISÜLI, M.; TESKE, S. L.; ELBER, U. Impacts of an Increased Substitution of Fossil Energy Carriers with Electricity-Based Technologies on the Swiss Electricity System. **Energies**, v. 12, n. 12, p. 2399, jan. 2019.

SANTOS, M. L. M.; MARQUES, G. DOS S. Emissões de CO₂ e o setor de transporte rodoviário: análise comparativa do Índice de Intensidade de Carbono do Distrito Federal e Amazonas / CO₂ emissions and road transport sector: a comparative analysis of the Carbon Intensity Index of the Federal District and Amazon. **Brazilian Applied Science Review**, v. 4, n. 2, p. 137–450, 10 mar. 2020.

SAXE, S.; KASRAIAN, D. Rethinking environmental LCA life stages for transport infrastructure to facilitate holistic assessment. **Journal of Industrial Ecology**, v. 24, n. 5, p. 1031–1046, 2020.

Scenarios in life-cycle assessment. Disponível em: <<https://lca-net.com/publications/show/scenarios-life-cycle-assessment/>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

SCHMIDT, K.; GERPEN, J. V. **The Effect of Biodiesel Fuel Composition on Diesel Combustion and Emissions.** Warrendale, PA: SAE International, 1 maio 1996. Disponível em: <<https://www.sae.org/publications/technical-papers/content/961086/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Seeg Brasil. Disponível em: <<https://seeg.eco.br/>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Setor de transporte público urbano acumula perdas de R\$ 25,7 bi em dois anos de pandemia. Disponível em: <<http://www.ntu.org.br/novo/NoticiaCompleta.aspx?idArea=10&idSegundoNivel=106&idNoticia=1567>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

SHIAU, C.; MICHALEK, J. J. **A MINLP Model for Global Optimization of Plug-In Hybrid Vehicle Design and Allocation to Minimize Life Cycle Greenhouse Gas Emissions.** DAC 2010. **Anais...**2010.

SILVA, J. A. B. DA; SILVA, S. DA. CRITÉRIOS DE QUALIDADE EM SERVIÇOS DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO: UMA CONTRIBUIÇÃO TEÓRICA. **Brazilian Journal of Production Engineering**, v. 4, n. 1, p. 83–98, 26 abr. 2018.

Sob sinais de colapso do transporte público em Porto Alegre, especialistas sugerem alternativas. Disponível em: <<https://gauchazh.clicrbs.com.br/porto-alegre/noticia/2021/07/sob-sinais-de-colapso-do-transporte-publico-em-porto-alegre-especialistas-sugerem-alternativas-ckqztglc8003f019350szzudy.html>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

STANDARDS, E. **BS EN 15978:2011 Sustainability of construction works. Assessment of environmental performance of buildings. Calculation method.** Disponível em: <<https://www.en-standard.eu/bs-en-15978-2011-sustainability-of-construction-works-assessment-of-environmental-performance-of-buildings-calculation-method/>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

SUH, S. et al. System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. **Environmental Science & Technology**, v. 38, n. 3, p. 657–664, 1 fev. 2004.

SYRÉ, A. M.; HEINING, F.; GÖHLICH, D. Method for a Multi-Vehicle, Simulation-Based Life Cycle Assessment and Application to Berlin's Motorized Individual Transport. **Sustainability**, v. 12, n. 18, p. 7302, jan. 2020.

TABATABAEI, M. et al. Environmental impact assessment of the mechanical shaft work produced in a diesel engine running on diesel/biodiesel blends containing

glycerol-derived triacetin. **Journal of Cleaner Production**, v. 223, p. 466–486, 20 jun. 2019.

TONG, F.; AZEVEDO, I. M. L. What are the best combinations of fuel-vehicle technologies to mitigate climate change and air pollution effects across the United States? **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 7, p. 074046, jul. 2020.

Toward a more accurate regionalized life cycle inventory - ScienceDirect. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615011920?via%3Dihub>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development | Department of Economic and Social Affairs. Disponível em: <<https://sdgs.un.org/2030agenda>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

Transport Targets of Sustainable Development Goals. SLOCAT, [s.d.]. Disponível em: <<https://slocat.net/transport-targets-sustainable-development-goals/>>. Acesso em: 6 ago. 2022

Transporte é a fonte de emissões que mais cresce. Veja o que dizem os números | WRI Brasil. Disponível em: <<https://wribrasil.org.br/noticias/transporte-e-fonte-de-emissoes-que-mais-cresce-veja-o-que-dizem-os-numeros>>. Acesso em: 6 ago. 2022.

TOLEDO, A. L. L., & ROVERE, E. L. L. Urban mobility and greenhouse gas emissions: Status, public policies, and scenarios in a developing economy city, Natal, Brazil. **Sustainability (Switzerland)**, 10(11). <https://doi.org/10.3390/su10113995>, 2018

TURCONI, R. et al. **Environmental impacts of future low-carbon electricity systems: Detailed life cycle assessment of a Danish case study.** Applied Energy, v. 132, p. 66–73, 1 nov. 2014.

UHEREK, E., HALENKA, T., BORKEN-KLEEFELD, J., BALKANSKI, Y., BERNTSEN, T., BORREGO, C., ... SCHMID, S. **Transport impacts on atmosphere and climate: Land transport.** *Atmospheric Environment*, 44(37), 4772–4816. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.01.002>, 2010.

VAISHNAVI, V. K. **Design Science Research Methods and Patterns: Innovating Information and Communication Technology.** New York: Auerbach Publications, 2007.

VEDRENNE, M. et al. Life cycle assessment as a policy-support tool: The case of taxis in the city of Madrid. **Energy Policy**, v. 66, p. 185–197, 1 mar. 2014.

VELANDIA VARGAS, J. E. et al. Life cycle assessment of electric vehicles and buses in Brazil: effects of local manufacturing, mass reduction, and energy consumption

evolution. **The International Journal of Life Cycle Assessment**, v. 24, n. 10, p. 1878–1897, 1 out. 2019.

VIANA, M. M. **Inventário do ciclo de vida do biodiesel ético do óleo de girassol**. text—[s.l.] Universidade de São Paulo, 28 jul. 2008.

VIORNERY-PORTILLO, E. A.; BRAVO-DÍAZ, B.; MENA-CERVANTES, V. Y. Life cycle assessment and emission analysis of waste cooking oil biodiesel blend and fossil diesel used in a power generator. **Fuel**, v. 281, p. 118739, 1 dez. 2020.

Volvo Buses presents new electric bus chassis - electrive.com. Disponível em: <<https://www.electrive.com/2021/09/28/volvo-presents-new-electric-bus-chassis/>>. Acesso em: 7 ago. 2022.

WANG, S. et al. Life-Cycle Assessment of Carbon Footprint of Bike-Share and Bus Systems in Campus Transit. **Sustainability**, v. 13, n. 1, p. 158, jan. 2021.

WEBER, J. Individual accessibility and distance from major employment centers: An examination using space-time measures. **Journal of Geographical Systems**, v. 5, n. 1, p. 51–70, 1 maio 2003.

WEI, W. et al. How to Conduct a Proper Sensitivity Analysis in Life Cycle Assessment: Taking into Account Correlations within LCI Data and Interactions within the LCA Calculation Model. **Environmental Science & Technology**, v. 49, n. 1, p. 377–385, 6 jan. 2015.

WORLD BANK. **How better transport will help Latin America get ahead of the climate crisis**. 2021. Disponível em: Disponível em: <<https://blogs.worldbank.org/transport/how-better-transport-will-help-latin-america-get-ahead-climate-crisis>>. Acesso em: 29 ago. 2022.

WU, B. M.; HINE, J. P. A PTAL approach to measuring changes in bus service accessibility. **Transport Policy**, Transport and Social Exclusion. v. 10, n. 4, p. 307–320, 1 out. 2003.

WULF, C.; ZAPP, P. Sustainability Assessment of Innovative Energy Technologies – Hydrogen from Wind Power as a Fuel for Mobility Applications. **Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems**, 2020.

ZHANG, P.; YUAN, H.; TIAN, X. Sustainable development in China: Trends, patterns, and determinants of the “Five Modernizations” in Chinese cities. **Journal of Cleaner Production**, v. 214, p. 685–695, 20 mar. 2019.

ZHAO, F. et al. Multi-environmental impacts of biofuel production in the U.S. Corn Belt: A coupled hydro-biogeochemical modeling approach. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119561, 1 abr. 2020.

ZHAO, S.; YOU, F. Comparative Life-Cycle Assessment of Li-Ion Batteries through Process-Based and Integrated Hybrid Approaches. **ACS Sustainable Chemistry & Engineering**, v. 7, n. 5, p. 5082–5094, 4 mar. 2019.

ZHENG, Y. et al. Well-to-wheels greenhouse gas and air pollutant emissions from battery electric vehicles in China. **Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change**, v. 25, n. 3, p. 355–370, 1 mar. 2020.

ZHOU, B. et al. Real-world performance of battery electric buses and their life-cycle benefits with respect to energy consumption and carbon dioxide emissions. **Energy**, v. 96, p. 603–613, 1 fev. 2016.

APÊNDICE A – Revisão sistemática

Tabela 15 - Dados gerais das publicações

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
01	Gompf, K. et al.	Using analytical hierarchy process (AHP) to introduce weights to social life cycle assessment of mobility services	2021	Alemanha	Sustainability (Switzerland)	ferramenta	O objetivo desta pesquisa é apoiar a tomada de decisão por meio de determinação de pesos para diferentes critérios e indicadores para avaliação de sustentabilidade social de serviços de mobilidade.
02	Lausset, C. et al.	LCA and scenario analysis of a Norwegian net-zero GHG emission neighbourhood: The importance of mobility and surplus energy from PV technologies	2021	Alemanha	Building and Environment	estudo de caso	Estudo de caso de um bairro verificando a atividade mais impactante e cenários de mudança a partir do desenvolvimento de um modelo
03	Accardo, A. et al.	Life cycle assessment of an NMC battery for application to electric light-duty commercial vehicles and comparison with a sodium-nickel-chloride battery	2021	Itália	Applied Sciences (Switzerland)	estudo de caso	Estudo de caso, comparando impactos ambientais de diferentes tipos de baterias para veículos elétricos.
04	Petrauskienė, K. et al.	Comparative environmental life cycle and cost assessment of electric, hybrid, and conventional vehicles in Lithuania	2021	Lituânia	Sustainability (Switzerland)	estudo de caso	O objetivo deste estudo é revelar as mudanças no desempenho ambiental e econômico se mudarmos da combustão interna veículos motorizados para veículos elétricos a bateria ou híbridos elétricos.
05	Bottero, M. et al.	Evaluating the transition towards post-carbon cities: A literature review	2021	Itália	Sustainability (Switzerland)	revisão	O artigo tem como objetivo investigar a literatura científica no contexto de estruturas de avaliação para apoiar problemas de decisão relacionados à transição energética.
06	Göhlich, D. et al.	Integrated approach for the assessment of strategies for the decarbonization of urban traffic	2021	Alemanha	Sustainability (Switzerland)	ferramenta	O objetivo e a missão deste projeto é a desenvolvimento de um framework que nos permite analisar, otimizar e verificar diferentes cenários para descarbonizar o transporte urbano.
07	Wang, S. et al.	Life-cycle assessment of carbon footprint of bike-share and bus systems in campus transit	2021	China	Sustainability (Switzerland)	estudo de caso	O estudo tem como objetivo comparar a pegada de carbono de dois modos de transporte nos sistemas de trânsito do campus, ônibus e bicicletas compartilhadas, usando a avaliação do ciclo de vida (ACV).
08	de Bortoli, A. et al.	Consequential LCA for territorial and multimodal transportation policies: method and application to the free-floating e-scooter disruption in Paris	2020	França	Journal of Cleaner Production	estudo de caso	Este artigo propõe uma formalização matemática da ACV aplicada a uma mudança de mobilidade territorial.
09	Gompf, K. et al.	Towards social life cycle assessment of mobility services: systematic literature review and the way forward	2020	Alemanha	International Journal of Life Cycle Assessment	revisão	O principal objetivo desta revisão é descrever o Estado da arte da avaliação de impacto social com foco na mobilidade serviços.
10	Sven Borén	Electric buses' sustainability effects, noise, energy use, and costs	2020	Suécia	International Journal of	tecnologia	Estudos anteriores de sistemas de ônibus identificaram a necessidade investigar mais detalhadamente os custos sociais, o custo total de

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
					Sustainable Transportation		propriedade, o uso de energia anualmente para contabilizar para variações sazonais e ruído durante a aceleração. Atender a essas necessidades foi o objetivo deste estudo.
11	Syré, A.M. et al.	Method for a multi-vehicle, simulation-based life cycle assessment and application to berlin's motorized individual transport	2020	Alemanha	Sustainability (Switzerland)	método	O objetivo deste estudo é demonstrar as influências de diferentes tecnologias e estratégias para sistemas de transporte em várias categorias de impacto de ACV. Assim, apresentamos um método que combina uma ACV com simulação de transporte baseada em agente com estudo de caso em Berlim.
12	Amatuni, L. et al.	Does car sharing reduce greenhouse gas emissions? Assessing the modal shift and lifetime shift rebound effects from a life cycle perspective	2020	Holanda	Journal of Cleaner Production	estudo de caso	Este estudo contribui para a compreensão da redução total das emissões de gases de efeito estufa relacionadas à mobilidade. É proposto um modelo abrangente que leva em conta as distâncias percorridas anualmente pelos principais modos de transporte urbano, bem como seus fatores de emissão de ciclo de vida, e a análise antes e depois é realizada para um membro médio de compartilhamento de carros em três casos: Holanda, São Francisco, Calgary.
13	Tong, F. et al.	What are the best combinations of fuel-vehicle technologies to mitigate climate change and air pollution effects across the United States?	2020	Estados Unidos	Environmental Research Letters	diagnóstico diferentes combustíveis - estudo de caso	É apresentada uma avaliação sistemática e espacialmente explícita de externalidades causadas por combustíveis alternativos e tecnologias veiculares nos Estados Unidos, usando um estrutura de modelagem acoplada que liga a avaliação do ciclo de vida e a qualidade do ar de forma reduzida.
14	Knobloch, F. et al.	Net emission reductions from electric cars and heat pumps in 59 world regions over time	2020	Reino Unido	Nature Sustainability	estudo de caso	Analizados trade-offs de emissões atuais e futuras em 59 regiões do mundo combinando simulações de modelos de avaliação integrados prospectivos com avaliações ascendentes do ciclo de vida.
15	Choi, W. et al.	Greenhouse gas emissions of conventional and alternative vehicles: Predictions based on energy policy analysis in South Korea	2020	Córea do Sul	Applied Energy	diretrizes	Este artigo compara as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do poço à roda (WTW) de veículos representativos Tipos – veículo com motor de combustão interna (ICEV), veículo elétrico híbrido (HEV), veículo elétrico híbrido plug-in (PHEV), veículo elétrico a bateria (BEV) e veículo elétrico a célula de combustível (FCEV) – no futuro (2030) com base em uma análise WTW para o presente (2017) e uma análise de várias políticas energéticas que podem afetar as emissões futuras. A Coreia do Sul é selecionada como a região alvo.
16	Zheng, Y. et al.	Well-to-wheels greenhouse gas and air pollutant emissions from battery electric vehicles in China	2020	China	Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change	estudo de caso	O objetivo deste artigo é fornecer uma nova abordagem do poço às rodas (WTW) e inventário de emissões para BEVs na China, o maior mercado de EV do mundo.

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
17	Bonilla-Alicea, R.J. et al.	Life cycle assessment to quantify the impact of technology improvements in bike-sharing systems	2020	Estados Unidos	Journal of Industrial Ecology	tecnologia	Esta avaliação atinge os seguintes objetivos: (1) ACV de uma bicicleta inteligente; (2) comparar o impacto de uma doca inteligente e um sistema de bicicleta inteligente para determinar quantos passeios a mais por bicicleta por dia são necessários para superar o aumento do impacto ambiental da mudança em uma cidade; (3) fornecer uma estimativa do aumento total do impacto se a evolução de smart dock para smart bike é concluída nos Estados Unidos; (4) auxiliar os tomadores de decisão por meio dos resultados.
18	Nematchoua, M.K. et al.	A study of life cycle assessment in two old neighbourhoods in Belgium	2020	França	Sustainable Cities and Society	estudo de caso	O principal objetivo desta pesquisa é mostrar como aplicar a ACV em um escala de vizinhança e como conduzir nossa abordagem no caso de dois bairros de características diferentes, incluindo a mobilidade dos moradores do bairro.
19	Glensor, K. et al.	Life-cycle assessment of Brazilian transport biofuel and electrification pathways	2019	Alemanha	Sustainability (Switzerland)	estudo de caso	A ACV considera vários cenários de conversão de frotas de automóveis e autocarros urbanos para 100% eléctricos ou biocombustíveis (bioetanol e biodiesel) até 2050 em comparação com um cenário BAU.
20	Bastos, J. et al.	Environmental impacts of commuting modes in Lisbon: A life-cycle assessment addressing particulate matter impacts on health	2019	Portugal	International Journal of Sustainable Transportation	estudo de caso	Este artigo apresenta uma ACV multimodal comparando modos de transporte alternativos para viagens urbanas na região de Lisboa, considerando uma gama mais ampla de impactos e integrando os impactos das emissões e seus efeitos na saúde.
21	Nordelöf, A. et al.	Life cycle assessment of city buses powered by electricity, hydrogenated vegetable oil or diesel	2019	Suécia	Transportation Research Part D: Transport and Environment	estudo de caso	O objetivo deste artigo é relatar um estudo de caso de ACV coeso que usa dados da indústria para investigar os impactos ambientais de diferentes ônibus urbanos da mesma série de modelos para transporte público nas cidades.
22	Ajanovic, A. et al.	On the environmental benignity of electric vehicles	2019	Austria	Journal of Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems	estudo de caso	O objetivo central deste artigo é investigar o impacto ambiental geral dos veículos elétricos em diferentes regiões.
23	Hollingsworth, J. et al.	Are e-scooters polluters? the environmental impacts of shared dockless electric scooters	2019	Estados Unidos	Environmental Research Letters	estudo de caso	Usando a avaliação do ciclo de vida, é quantificado o impacto ambiental total impactos de opções de mobilidade.

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
24	Bilgili, L. et al.	Evaluation of railway versus highway emissions using LCA approach between the two cities of Middle Anatolia	2019	Turquia	Sustainable Cities and Society	estudo de caso	Este estudo tem como objetivo realizar uma avaliação comparativa de vários cenários de emissões de rodovias e ferrovias transporte entre Kırşehir e Niğde-Ulukışla na península média da Anatólia, na Turquia, para permitir tomar uma decisão ótima do ponto de vista ambiental.
25	Patella, S.M. et al.	Traffic simulation-based approach for a cradle-to-grave greenhouse gases emission model	2019	Itália	Sustainability (Switzerland)	diretrizes	A pesquisa apresentada neste artigo tem como objetivo avaliar os efeitos ambientais do transporte individual por carros, combinando a implicação do ciclo de vida completo no nível do veículo e os resultados da simulação de tráfego.
26	Al-Thawadi, F.E. et al.	Evaluation of sustainable urban mobility using comparative environmental life cycle assessment: A case study of Qatar	2019	Catar	Transportation Research Interdisciplinary Perspectives	estudo de caso	O foco deste estudo é o desenvolvimento de modelos comparativos de avaliação do ciclo de vida para quantificar a produção de energia e as emissões de duas principais alternativas de transporte no Catar – automóveis e metrô.
27	Khan, M.I. et al.	Life cycle (well-to-wheel) energy and environmental assessment of natural gas as transportation fuel in Pakistan	2019	Reino Unido	Applied Energy	estudo de caso	O objetivo desta pesquisa é fornecer um poço-à-roda (WtW) avaliação de consumos de energia e emissões de GEE para 25 combinações de combustível automotivo e correspondência sistemas de powertrain, com foco especial nas vias de gás natural.
28	Albers, A. et al.	Coupling partial-equilibrium and dynamic biogenic carbon models to assess future transport scenarios in France	2019	França	Applied Energy	tecnologia	O objetivo do presente estudo é destacar as potenciais consequências climáticas sensíveis a estratégias de transporte orientadas por políticas para França.
29	Rüdisüli, M. et al.	Impacts of an increased substitution of fossil energy carriers with electricity-based technologies on the Swiss electricity system	2019	Suíça	Energies	estudo de caso	Avaliação dos desafios em termos de demandas adicionais de eletricidade, déficits e superávits bem como a mitigação efetiva de CO2 são avaliadas em uma abordagem dinâmica do transporte.
30	Osorio-Tejada, J.L. et al.	Well-to-wheels approach for the environmental impact assessment of road freight services	2018	Espanha	Sustainability (Switzerland)	metodo	Este trabalho propõe um método para o cálculo do consumo de combustível e das emissões durante um serviço de transporte rodoviário de mercadorias.
31	Wulf, C. et al.	Life Cycle Assessment of hydrogen transport and distribution options	2018	Alemanha	Journal of Cleaner Production	estudo de caso	Este artigo apresenta uma avaliação do ciclo de vida de três cadeias de suprimentos de veículos.
32	Hooftman, N. et al.	In-life range modularity for electric vehicles: The environmental impact of a range-extender trailer system	2018	Belgica	Applied Sciences (Switzerland)	estudo de caso	O objetivo do artigo é avaliar o impacto ambiental na mobilidade considerando tanto as mudanças climáticas quanto a qualidade do ar.
33	Bohnes, F.A. et al.	Environmental Impacts of Future Urban Deployment of Electric Vehicles: Assessment Framework and Case Study of Copenhagen for 2016-2030	2017	Dinamarca	Environmental Science and Technology	diretrizes	É proposta uma estrutura usando a avaliação do ciclo de vida que permite a quantificação dos impactos ambientais de um sistema de transporte em escala urbana completa de uma perspectiva de previsão baseada em frota.

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
34	Petit-Boix, A. et al.	Application of life cycle thinking towards sustainable cities: A review	2017	Espanha	Journal of Cleaner Production	revisão	O objetivo desta revisão é avaliar até que ponto a pesquisa ACV avaliam cidades sustentáveis considerando as questões abordadas nas estratégias de sustentabilidade urbana.
35	Rajaeifar, M.A. et al.	Attributional and consequential environmental assessment of using waste cooking oil- and poultry fat-based biodiesel blends in urban buses: A real-world operation condition study	2017	Irã	Biofuel Research Journal	estudo de caso	O objetivo do estudo de ACV foi avaliar a impactos ambientais do uso de biodiesel à base de WCO e PF em ônibus urbanos. Para atingir esse objetivo, duas abordagens fundamentalmente diferentes foram empregado, ou seja, LCA atribucional e consequential.
36	Saxe, S. et al.	The net greenhouse gas impact of the Sheppard Subway Line	2017	Reino Unido	Transportation Research Part D: Transport and Environment	estudo de caso	Este artigo investiga o impacto combinado de GEE da construção, operação, padrões de passageiros e mudanças na forma urbana associada à linha de metrô Sheppard em Toronto.
37	François, C. et al.	Environmental assessment of urban mobility: Combining life cycle assessment with land-use and transport interaction modelling—Application to Lyon (France)	2017	França	Ecological Indicators	estudo de caso	O objetivo deste artigo é demonstrar a relevância e a viabilidade de combinar esses três pressupostos, fornecendo uma avaliação ambiental clara e estruturada da mobilidade urbana em Lyon.
38	Cruz, L. et al.	Greening transportation and parking at University of Coimbra	2017	Portugal	International Journal of Sustainability in Higher Education	ferramenta	O objetivo deste artigo é fazer uma análise quantitativa e qualitativa da mobilidade e dentro de um campus universitário a partir de uma abordagem do ciclo de vida,
39	Ercan, T. et al.	On the front lines of a sustainable transportation fleet: Applications of vehicle-to-grid technology for transit and school buses	2016	Estados Unidos	Energies	tecnologia	A integração das externalidades da poluição do ar e os resultados da ACV é crucial para transporte e eletricidade setores de geração, portanto, o estudo apresenta tal avaliação.
40	Cuellar, Y. et al.	Life cycle emissions from a bus rapid transit system and comparison with other modes of passenger transportation	2016	Colômbia	CTyF - Ciencia, Tecnologia y Futuro	estudo de caso	O trabalho teve como objetivo realizar uma ACV de ônibus a diesel e biodiesel em Bogotá e comparar com outros modais de transporte.
41	Hooftman, N. et al.	Environmental analysis of petrol, diesel and electric passenger cars in a Belgian urban setting	2016	Belgica	Energies	estudo de caso	Nesta publicação, é proposto um método para avaliar a contribuição dos veículos elétricos para a qualidade do ar na Bélgica, em comparação com veículos convencionais da mesma classe de peso.
42	Trancossi, M. et al.	Design of an innovative off road hybrid vehicle by energy efficiency criteria	2016	Reino Unido	International Journal of Heat and Technology	tecnologia	Este artigo leva em consideração uma metodologia de projeto eficaz, que se baseia em eficiência energética e otimização do veículo e seus principais componentes.
43	Moriarty, P. et al.	Eco-efficiency indicators for urban transport	2015	Austrália	Journal of Sustainable Development of Energy, Water	diretrizes	Este trabalho tem como foco a ecoeficiência do transporte urbano de passageiros, que pode ser definida como a produção do máximo de benefícios para a sociedade, minimizando os impactos

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
					and Environment Systems		ambientais dos insumos de energia e materiais do transporte urbano.
44	Bi, Z. et al.	Plug-in vs. wireless charging: Life cycle energy and greenhouse gas emissions for an electric bus system	2015	Estados Unidos	Applied Energy	estudo de caso	O objetivo deste estudo de ACV é comparar dois cenários de cobrança para um sistema de ônibus totalmente elétrico, carregamento plug-in e estacionário carregamento sem fio, em termos de demanda cumulativa de energia.
45	Del Pero, F. et al.	Life Cycle Assessment of a heavy metro train	2015	Itália	Journal of Cleaner Production	estudo de caso	Os objetivos finais do estudo são: (1) Determinar os estágios de ACV prejudiciais ("hotspots") para um metrô e estabelecer um linha de base para comparação com veículos similares; (2) Identificar potenciais melhorias do produto para apoiar recomendações para futuras estratégias de design; (3) Comparar os impactos de um trem do metrô com veículos semelhantes.
46	Prata, J. et al.	Setting a city strategy for low Carbon Emissions: The role of electric vehicles, renewable energy and Energy Efficiency	2015	Portugal	International Journal of Sustainable Development and Planning	diretrizes	O foco desta pesquisa é investigar o papel futuro dos veículos elétricos (VEs), ER e eficiência energética (EE) como um sistema energético integrado para suprir as necessidades energéticas para a mobilidade diária das famílias em 2020, considerando as viagens funcionais diárias habituais (casa para o trabalho/escola).
47	Liu, J. et al.	Plug-In Hybrid Electric Vehicles' Potential for Urban Transport in China: The Role of Energy Sources and Utility Factors	2015	China	International Journal of Sustainable Transportation	tecnologia	Este artigo investiga o consumo de energia do ciclo de vida dos PHEVs e as emissões de carbono para o caso de 2020 China usando o Gás de Efeito Estufa, Emissões Regulamentadas e Uso de Energia em Modelo de Transporte (GREET).
48	Nahlik, M.J. et al.	Transit-oriented smart growth can reduce life-cycle environmental impacts and household costs in Los Angeles	2014	Estados Unidos	Transport Policy	diretrizes	Uma avaliação das potenciais estratégias de desenvolvimento em torno de duas linhas de transporte público são desenvolvidas começando com um avaliação do uso do solo, em seguida projetando TOD apropriado para cada estação, estimando os impactos de mudança, e finalmente desenvolvendo um comportamento doméstico e de transporte avaliação.
49	Rahman, M.H. et al.	Environmental sustainability of urban road transport: An integrated analysis for life cycle emission impact	2014	Austrália	International Journal of Environment and Sustainable Development	revisão	Para avaliar o impacto ambiental total do transporte rodoviário urbano, o ciclo de vida do transporte urbano foi dividido em quatro fases: veículo, infraestrutura, combustível e operação..
50	Chester, M. et al.	Infrastructure and automobile shifts: Positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals	2013	Estados Unidos	Environmental Research Letters	diretrizes	Um ACV ambiental é desenvolvida para o Orange BRT, Gold LRT e viagens de automóveis concorrentes.

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
51	Cooney, G. et al.	Life cycle assessment of diesel and electric public transportation buses	2013	Estados Unidos	Journal of Industrial Ecology	estudo de caso	O objetivo deste estudo de ACV é comparar os impactos ambientais do ciclo de vida do ICEB e EB, incluindo a produção do ônibus e bateria, bem como os impactos da fase de uso de qualquer produção/combustão de diesel ou geração de eletricidade.
52	Prata, J. et al.	Moving towards the sustainable city: The role of electric vehicles, renewable energy and energy efficiency	2013	Portugal	WIT Transactions on Ecology and the Environment	diretrizes	Nesta pesquisa adaptamos o modelo de metabolismo estendido de uma cidade desenvolvido por Newman (1999) e o fluxo de materiais e energia contabilizado por Sheeri (2002) para avaliar o papel futuro dos veículos elétricos, uso de energia renovável para necessidades de mobilidade e aumentos de eficiência energética para residentes na cidade de Aveiro, Portugal.
53	Lang, J. et al.	Energy and environmental implications of hybrid and electric vehicles in China	2013	China	Energies	estudo de caso	Neste estudo, os impactos energéticos e ambientais de híbridos e EVs durante 2010–2020 foram avaliados através de uma análise de conversão de energia e avaliação do ciclo de vida.
54	Message., Lebeau, K. et al.	Environmental and financial evaluation of passenger vehicle technologies in Belgium	2013	Belgica	Sustainability (Switzerland)	estudo de caso	O ACV é uma comparação descritiva do impacto ambiental associado aos BEVs e veículos convencionais na Bélgica. O âmbito geográfico e temporal do estudo é o mercado automóvel belga.
55	Chester, M. et al.	High-speed rail with emerging automobiles and aircraft can reduce environmental impacts in California's future	2012	Estados Unidos	Environmental Research Letters	diretrizes	Um inventário de ciclo de vida é desenvolvido, incluindo veículos, infraestrutura e componentes de produção de energia. A avaliação de impacto consequente do ciclo de vida é então estabelecida para avaliar expansão da infraestrutura contra a construção de um novo sistema ferroviário de alta velocidade.
56	Norman Shiau, C. et al.	Global optimization of plug-in hybrid vehicle design and allocation to minimize life cycle greenhouse gas emissions	2011	Estados Unidos	Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME	metodo	Desenvolvimento de um método seguindo três etapas. Análise de quais rotas podem ser usadas para transporte de carvão para geração de eletricidade combinada com dados sobre o transporte ferroviário direto e indireto e suas emissões de GEE.
57	Bessou, C. et al.	Biofuels, greenhouse gases and climate change. A review	2011	França	Agronomy Sustainable Development	for revisão	Este artigo analisa as tecnologias atuais e futuras de biocombustíveis e seus impactos no desenvolvimento de políticas e estruturas econômicas. Dentro das políticas de bioenergia, a ênfase tem sido colocada nos biocombustíveis para transporte.

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
58	Garcia, R. et al.	Dynamic fleet-based life-cycle greenhouse gas assessment of the introduction of electric vehicles in the Portuguese light-duty fleet	2015	Portugal	The International Journal of Life Cycle Assessment	estudo de caso	O objetivo deste artigo é avaliar se a deslocação de ICEVs por BEVs na frota ligeira portuguesa é benéfica para o ambiente (com foco nas emissões de GEE), tendo em conta o comportamento dinâmico da frota.
59	Sherwood, J., et al.	Rolling coal: The greenhouse gas emissions of coal rail transport for electricity generation	2020	Estados Unidos	Journal of Cleaner Production	of método	Apresentamos um modelo reformulado para design e alocação ideais de convencional (CV), híbrido elétrico (HEV) e plug-in veículos elétricos híbridos (PHEV) para obter soluções globais que minimizar as emissões de gases de efeito estufa (GEE) do ciclo de vida da frota.
60	Kylli, A. et al.	The role of Remote Working in smart cities: lessons learnt from COVID-19 pandemic	2020	Cyprus	Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization and Environmental Effects	of método	Este trabalho estabeleceu indicadores de impacto que demonstram a contribuição dos modelos de trabalho remoto no enfrentamento dos desafios energéticos e ambientais para a transição das cidades europeias para regiões de energia inteligente.
61	Loiseau, E. et al.	Territorial Life Cycle Assessment (LCA): What exactly is it about? A proposal towards using a common terminology and a research agenda	2018	França	Journal of Cleaner Production	of método	Este artigo tem como objetivo analisar como a nova abordagem baseada em ACV territorial se diferencia da ACV convencional, destacando as principais diferenças e valores agregados.
62	Ghimire, S.R. et al.	A modified eco-efficiency framework and methodology for advancing the state of practice of sustainability analysis as applied to green infrastructure	2019	Estados Unidos	Integrated Environmental Assessment and Management	of método	É proposto uma estrutura de ecoeficiência (EE) modificada e uma nova metodologia de análise de sustentabilidade para práticas de infraestrutura verde (GI) usadas na gestão de recursos hídricos.
63	García-Pérez, S. et al.	A characterisation and evaluation of urban areas from an energy efficiency approach, using geographic information systems in combination with life cycle assessment methodology	2017	Espanha	International Journal of Sustainable Development and Planning	of ferramenta	Caracterização e avaliação de áreas urbanas a partir de uma abordagem de eficiência energética, utilizando sistemas de informação geográfica em combinação com metodologia de avaliação do ciclo de vida.
64	Vadoudi, K. et al.	GIS-oriented lifecycle management for sustainability	2016	França	IFIP Advances in Information and Communication Technology	estudo de caso	Este artigo propõe um novo modelo de dados para integrar dados geoespaciais com dados relacionados ao produto por meio de impactos ambientais ao longo de todo o ciclo de vida.
65	Hendrickson, T.P. et al.	Life-cycle implications and supply chain logistics of electric vehicle battery recycling in California	2015	Estados Unidos	Environmental Research Letters	of método	Este estudo combina avaliação do ciclo de vida e sistemas de informações geográficas (GIS) para analisar as implicações de energia, gases de efeito estufa (GEE), uso de água e critérios de poluição do ar de redes de infraestrutura em fim de vida para baterias de íons de lítio (LIBs) em Califórnia.
66	Yoo, M. et al.	An Integrated Approach to Energy Systems Integration with LCIA and GIS	2015	Suíça	Computer Aided Chemical Engineering	ferramenta	Neste artigo, é apresentado a implementação de uma plataforma de Integração de Sistemas de Energia que permite a modelagem de Sistemas de Energia integrando dados ICA, AICV e SIG como parâmetros de modelagem e variáveis incluídas em um modelo de processo industrial.

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
67	Richards-Rissetto, H. et al.	Movement as a means of social (re)production: Using GIS to measure social integration across urban landscapes	2014	Estados Unidos	Journal of Archaeological Science	ferramenta	Este artigo contribui para o estudo do movimento em ambientes urbanos onde as formas construídas e os recursos naturais trabalharam juntos para desempenhar um papel fundamental na estruturação da mobilidade humana. Propomos um método analítico usando SIG para medir a integração social.
68	Loiseau, E. et al.	Adapting the LCA framework to environmental assessment in land planning	2013	Alemanha	International Journal of Life Cycle Assessment	revisão	O objetivo deste artigo é, portanto, propor um quadro metodológico para as etapas de avaliação ambiental necessárias no ordenamento do território.
69	Zhuang, Y. et al.	Global environmental impact assessment research trends (1973-2009)	2011	China	Procedia Environmental Sciences	método	Este artigo analisa as literaturas em sua tendência de crescimento, categorias temáticas e periódicos, colaborações internacionais, distribuição geográfica das publicações e questões de pesquisa científica usando análise bibliométrica.
70	Geyer, R. et al.	Coupling GIS and LCA for biodiversity assessments of land use	2010	Estados Unidos	International Journal of Life Cycle Assessment	ferramenta	Este estudo apresenta uma abordagem de prova de conceito para acoplar GIS e LCA para avaliações de biodiversidade do uso da terra e aplica-a a um estudo de caso de produção de etanol a partir de culturas agrícolas na Califórnia.
71	Ernani Francisco Choma, Cássia Maria Lie Ugaya	Environmental impact assessment of increasing electric vehicles in the Brazilian fleet	2017	Brasil	Journal of Cleaner Production	estudo de caso	O objetivo principal deste estudo é identificar os impactos ambientais dos veículos elétricos a bateria na frota brasileira de veículos leves, usando ACV.
72	Leonardo Iannuzzi et al.	Life Cycle Assessment (LCA) for use on renewable sourced hydrogen fuel cell buses vs diesel engines buses in the city of Rosario, Argentina	2021	Argentina	Hydrogen Energy	tecnologia	O objetivo deste trabalho é construir a primeira Análise de Energia e Ciclo de Vida (ACV) com entre ônibus com motor de combustão interna atualmente utilizado na cidade de Rosário, Província de Santa Fé, Argentina, e algumas alternativas tecnológicas e suas variantes com foco em ônibus com um motor elétrico movido a hidrogênio comprimido que células de combustível de membrana eletrolítica polimérica.
73	Antonio García et al.	Life cycle CO ₂ footprint reduction comparison of hybrid and electric buses for bus transit networks	2021	Espanha	Applied Energy	tecnologia	Avaliar criticamente o ciclo de vida geral de diferentes tecnologias de trem de força para as redes de ônibus de trânsito rápido nas 4 maiores cidades da Espanha: Madri, Barcelona, Valência e Sevilha.
74	Ryuji Kawamoto et al.	Estimation of CO ₂ Emissions of Internal Combustion Engine Vehicle and Battery Electric Vehicle Using LCA	2019	Japão	Sustainability	estudo de caso	Neste artigo, as emissões de CO ₂ do ciclo de vida em cada região foram calculadas levando em consideração a distância de condução do veículo durante a vida útil em cada região e os desvios nas emissões de CO ₂ para a produção de baterias.

N°	Autores	Título	Ano	País	Journal	Foco	Objetivo (resumo)
75	Benedetta Marmioli et al.	Electricity Generation in LCA of Electric Vehicles: A Review	2018	Itália	Applied Sciences	revisão	ACV sobre mobilidade elétrica estão fornecendo uma infinidade de resultados divergentes. 44 artigos, publicados de 2008 a 2018, foram investigados nesta revisão, a fim de encontrar a extensão e a razão por trás deste desvio.
76	Elisabeth Ekener et al.	Addressing positive impacts in social LCA—discussing current and new approaches exemplified by the case of vehicle fuels	2016	Alemanha	The International Journal of Life Cycle Assessment	revisão	Este documento procura maneiras de abordar os impactos sociais positivos na avaliação do ciclo de vida social (S-ACV) e tenta responder a duas perguntas: Como a metodologia S-ACV pode ser melhorada a fim de identificar sistematicamente todos os impactos positivos potenciais na cadeia de suprimentos? Como os impactos positivos podem ser levados em consideração juntamente com os impactos negativos na S-ACV?
77	Alberto Moro & Eckard Helmers	A new hybrid method for reducing the gap between WTW and LCA in the carbon footprint assessment of electric vehicles	2015	Itália	The International Journal of Life Cycle Assessment	método	Os autores propõem uma metodologia híbrida WTW+ACV útil para avaliar os perfis de gases de efeito estufa (GHG) dos veículos rodoviários.
78	GeZheng, Zhijun Peng	Life Cycle Assessment (LCA) of BEV's environmental benefits for meeting the challenge of ICExit (Internal Combustion Engine Exit)	2021	Inglaterra	Energy Reports	tecnologia	Com base na revisão da literatura necessária, as emissões de LC (Life Cycle), em particular LCCO2 (Life Cycle CO2), de BEVs (Veículos Elétricos a Bateria) foram avaliadas e comparadas com os ICEVs (Veículos com Motor de Combustão Interna) mais eficientes, como os HEVs (Veículos Elétricos Híbridos) não plug-in e os carros a diesel.

Tabela 16 - Dados específicos os artigos de transporte*

N°	Modal	Público alvo	Unidade funcional	Fronteiras do sistema	Base de dados	Método	Categoria de impacto**
01	veículo privado	Instituições acadêmicas, autoridades municipais e prestadores de serviço de transporte.	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
02	veículo privado, ônibus, ferroviário, bicicleta	n/a	“to fulfil the housing, school, kindergarten, and mobility needs of the 2500 inhabitants of Ydalir over a 60 year time period”.	well-to-wheel	Ecoinvent National travel survey	IPCC	GHG ²
03	caminhões	n/a	1 kWh	cradle-to-grave	Ecoinvent primary data from manufacturers	CML baseline, CED	ADP, ADP-FF, GWP, AP, EP, ODP, POP, HT, F-ECOTP, M-ECOTP, T-ECOTP, CED
04	veículo privado	n/a	1 km driving distance	Cradle-to-Grave (vehicle) well-to-wheel(fuel)	Ecoinvent	ReCiPe	GWP, IO, HT, LU, ADP-FF
05	veículo privado + bus + bike	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
06	veículo privado, ônibus, caminhão, motocicleta, bicicleta	Autoridades de transporte e tomadores de decisão.	per vehicle-km, per person-km, or per ton-km	Well-to-wheel	greet and ecoinvent	n/a	AP, GWP, PMFP, POP, MDP, ADP-FF
07	ônibus	Tomadores de decisão	energy (kJ) consumed per passenger-mile.	n/a	NREL LCI	n/a	ADP-FF, GWP
08	motocicleta	Tomadores de decisão	km travelled	n/a	French Impact-ADEME database Ecoinvent	CML-IA baseline, IPCC	GWP
09	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
10	ônibus	Autoridades de transporte público na Suécia, companhias de energia, operadores de ônibus, fabricantes de automóveis e agências com enfoque em mobilidade.	km	Well-toWheels	Ecoinvent	n/a	GWP, EP, AP, POP, PMFP
11	veículo privado	n/a	total kilometers driven	cradle-to-gate	Ecoinvent	ReCiPe	GWP, AP, EP, POFP, PMFP, MDP

N°	Modal	Público alvo	Unidade funcional	Fronteiras do sistema	Base de dados	Método	Categoria de impacto**
12	veículo compartilhado	n/a	per passenger kilometre travelled (PKT)	cradle-to-grave	n/a	n/a	GHG
13	veículo privado	Tomadores de decisão em nível local e nacional	one vehicle mile traveled (VMT)	well-to-wheel	NREL	IPCC	GWP, PMFP
14	veículo privado	Tomadores de decisão	kW	use-phase	Ecoinvent	IPCC ¹	GHG
15	veículo privado		km	well-to-wheel	n/a	n/a	GHG
16	veículo privado		100 km	Well-to-wheels	n/a	n/a	GHG PMFP
17	bicicleta	n/a	per kilometer	Cradle to grave	U.S. Life Cycle Inventory Database	ReCiPe	GWP, HH, E, R
18	veículo privado, ônibus, bicicleta	n/a	daily distance travelled	use-phase ¹	ecoinvent	n/a	GWP, AP, ADP, EP, ODP, AD, PMFP
19	veículo privado, ônibus	n/a	distance driven by all vehicles (within each mode) per year	Well-to-Tank Tank-to-Wheels (fuel) cradle-grave (veículo e bateria)	n/a	n/a	n/a
20	veículo privado, ônibus	Tomadores de decisão	vehicle kilometer traveled (VKT) person-kilometer traveled	cradle-grave ¹	GaBi database	CML, EPD, TRACI	GWP, AP, EP, PMFP
21	ônibus	local and regional public transportation agencies and companies	person x km	well-to-wheel ¹	Ecoinvent	CML, ILCD	GWP, ADP, AP, EP, HT, PMFP, ODP, R
22	veículo privado	n/a	per km driven	Cradle-to-Grave well-to-wheel	n/a	n/a	GHG
23	motocicleta	Cidades que buscam integrar e-scooters em seu sistema de transporte.	Passenger mile traveled.	cradle-to-grave	ecoinvent	TRACI	GWP, AP, PMFP, HH, R, E
24	ferroviário	Autoridades públicas.	ton x km unit	well-to-wheel	Ecoinvent	IMPACT 2002+	HH, R, E, GWP
25	veículo privado		vehicle kilometer traveled	cradle to grave	Ecoinvent	IPCC ¹	GWP
26	ferroviário	Formuladores de políticas	passenger kilometers traveled	gate-to-gate	GaBi database	ReCiPe	GWP, PMFP, HT, AP, WD
27	veículo privado		MJ e km	well-to-wheel	JRC and GREET	IPCC ¹	GWP
28	n/a	Formuladores de políticas	per km driven by an average passenger car	Well-To-Wheels	JRC	IPCC	GWP
29	n/a	n/a	kwh	well-to-tank	ecoinvent	BM4	GWP
30	caminhão	n/a	L/km	Well-to-Wheels Tank-to-Wheels	Ecoinvent	ReCiPe	GWP, ODP, PMFP, HH, AP, ECOT, HT

N°	Modal	Público alvo	Unidade funcional	Fronteiras do sistema	Base de dados	Método	Categoria de impacto**
31	caminhão	n/a	1 kg of hydrogen		ecoinvent	ILCD	GWP, AP, ODP, HT PMFP, EP, IR, POCP, ADP
32	veículo privado	n/a	per kilometer driven	well-to-wheel	U.S. Department of Energy (DOE)	ReCiPe	GWP, POF, HT, PMFP HH, E, R
33	veículo privado	Tomadores de decisão	driving of 1 km	cradle-to-cradle ¹	Ecoinvent	ILCD	ADP, ADP-FF, WP, AP, EP, ODP, POP, HT, F-ECOTP, M-ECOTP, T-ECOTP, CED, HH, E, R
34	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
35	onibus	Formuladores de políticas	1 L of fuel	cradle to gate ¹	Ecoinvent	Impact 2002+	GWP, HT, IR, ECOTP AP, EP, HH, R, E, CC
36	trem		yearly total emissions	cradle to gate ¹	n/a	n/a	GWP
37	veículo	Autoridades Públicas	per inhabitant day distance travelled person kilometre (pkm) and per trip	cradle to grave ¹	Ecoinvent	ReCiPe	GWP, PMFP, POP AP, ADP, ADP -FF, MD, RE, LU
38	veículo privado, ônibus, ferroviário, bicicleta	n/a	100 km	n/a	n/a	n/a	GHG
39	onibus	Tomadores de decisão		well-to-wheel	REET, EPA	n/a	GHG
40	onibus	n/a	g/km. passenger	well-to-wheel	ecoinvent	n/a	GWP, PMFP, HT
41	veículo privado	n/a	one kilometre	well-to-wheel	Ecoinventn	ReCiPe, EI99, Usetox	POF, HT, PMFP
42	veículo privado	n/a			n/a	n/a	n/a
43	onibus	n/a	passenger-km		n/a	n/a	n/a
44	onibus	n/a	providing transit services for Ann Arbor and Ypsilanti area for 12 years with 67 buses, equivalent to 48,034,407 vehicle kilometers in total (on average 716,932 vehicle kilometers per bus).	battery-to-wheel	SimaPro U.S. Life Cycle Inventory's	n/a	GWP
45	ferroviário	n/a	Vehicle Kilometres Travelled	cradle-to-grave	GaBi	Eco- indicator 99 Impact 2002 CML	ADP, AP, EP, F-ECOTP, M- ECOTP, T-ECOTP, GWP, HT, ODP, POCP, TETP
46	veículo privado	Tomadores de decisão de cidades	100 km	well-to-wheel	n/a	n/a	GWP

N°	Modal	Público alvo	Unidade funcional	Fronteiras do sistema	Base de dados	Método	Categoria de impacto**
47	veículo privado	n/a	daily distances	Well-to-Pump Pump-to-Wheel	GREET, JRC	n/a	GWP
48	ferroviário, ônibus	n/a		cradle-to-grave ¹	GREET, Fuel Cycle model (ANL)	TRACI	GWP, AP, PMFP
49	Veículo privado, ônibus, caminhão	Formuladores de políticas	VKT (vehicle kilometres travelled)	cradle to grave ¹	EIO-LCA	n/a	GWP, AP, PMFP
50	ônibus	Organizações de Planejamento Metropolitano	passenger-mile-traveled (PMT)	cradle-to-grave ¹	US Department of Energy, NREL, SimaPro, Ecoinvent, GREET	TRACI	GWP, PMFP
51	ônibus	Tomadores de decisão	1 vehicle-kilometer over a 12 year lifetime	cradle to grave	USLCI, EcoInvent, NREL	IMPACT 2002	GWP, ODP, PMFP, ECOTP, AP
52	veículo privado	n/a	n/a		n/a	n/a	n/a
53	veículo privado	n/a	vkt (vehicle kilometres travelled)	well to wheel	COPERT IV	IPCC ¹	GHG
54	veículo privado	Formuladores de políticas, atores do setor automotivo e do público em geral.	life time driven distance of 209,470 km	well to wheel	Ecoinvent	ReCiPe	ADP, AP, EP, F-ECOTP, M-ECOTP, T-ECOTP, GWP, HT, ODP, POCP, TETP LU
55	ferroviário	Formuladores de políticas	passenger-kilometer-traveled	cradle-to-gate ¹	GaBi database	TRACI	GWP, PMFP, AP
56	ferroviário	Formuladores de políticas	per unit mass-distance	cradle-to-gate ¹	IA, EPA, and USGS, EPA and the U.S. Geological Survey Ecoinvent	IPCC	GHG
57	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
58	veículo privado	Tomadores de decisão	tempo	n/a	Ecoinvent	IPCC	GWP
71	veículo privado	Formuladores de políticas	passenger-kilometer-traveled	cradle to grave	Ecoinvent	CML	ADP, AP, EP, F-ECOTP, M-ECOTP, T-ECOTP, GWP, HT, ODP, POCP, TETP
72	ônibus	Oil and gas company	100 km travelled	well to wheel ¹	YPF S.A database	n/a	GHG ²
73	ônibus	policymakers	MJ/km	cradle-to-grave ¹	GREET	n/a	GHG ²
74	veículo privado	n/a	lifetime driving distance	cradle-to-grave ¹	GaBi	n/a	GHG ²
75	veículo privado	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
76	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a	n/a
77	veículo privado	policy targets	km	well to wheel	Ecoinvent	n/a	GHG ²
78	veículo privado	n/a	100 kW of power and 500 km	well-to-tank tank-to-wheel	n/a	n/a	GWP

Legenda:

*Artigos se referem aos revisados no item 2.1; **categorias de impacto são descritas no item 2.1.4 e nomenclatura contida na Lista de abreviaturas; ¹informação suposta através da leitura do artigo, não especificada abertamente pelo autor; ²autor cita apenas GHG e não especifica categoria de impacto em si, foi relevante apontar já que um número considerável de publicações apresenta tal denominação.

APÊNDICE B – Detalhamento inventário

As tabelas de adaptação de inventário do ciclo de vida foram são apresentadas com base nos dados desenvolvidos pelo Ecoinvent versão 3.6. As quantidades de cada fluxo são mostradas quando modificadas. Os autores de cada adaptação de inventário são apresentados no cabeçalho dos relatórios.

Tabela 17 - Relatório de adaptação de ICV: ônibus convencional e elétrico

Dado original: bus production | bus | Cutoff, U (RoW)

Dado adaptado: produção ônibus convencional (BR) e produção ônibus elétrico (BR)

Fluxo	Quantidade			Unidade	Localização		Comentários
	Ecoinvent	Adaptada OC	Adaptada OE		Ecoinvent	Adaptada	
Inputs							
acetic acid, without water, in 98% solution state	6,60E-02			kg	GLO		
alkyd paint, white, without solvent, in 60% solution state	3,00E+01			kg	RoW		
aluminium, cast alloy	1,67E+03	1,46E+03	1,22E+03	kg	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por NORDELOF et al. (2019).
brass	3,00E+00			kg	RoW		
carbon black	0,00E+00	2,60E+02	6,60E+02	kg			Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por NORDELOF et al. (2019).
cast iron	1,03E+03		6,30E+02	kg	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por NORDELOF et al. (2019).
copper	1,09E+02	5,50E+02	7,40E+02	kg	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por NORDELOF et al. (2019).
diesel	3,44E-01			kg	CO	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel	1,43E+02			kg	RoW	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel	7,15E+00			kg	BR		
diesel	1,44E+01			kg	IN	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel	1,46E+00			kg	ZA	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel	1,01E+00			kg	PE	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel, burned in building machine	2,01E+01			MJ	GLO		
electricity, medium voltage	2,78E+03			kWh	RAS	BR - Southern grid	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, medium voltage	3,97E+02			kWh	RLA	BR - Southern grid	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, medium voltage	1,91E+02			kWh	RAF	BR - Southern grid	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, medium voltage	1,30E+03			kWh	RNA	BR - Southern grid	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, medium voltage	1,13E+01			kWh	NZ	BR - Southern grid	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, medium voltage	6,21E+01			kWh	AU	BR	
flat glass, coated	4,90E+02	6,10E+02	6,20E+02	kg	RoW		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por NORDELOF et al. (2019).
heat, district or industrial, natural gas	3,17E+00			MJ	RoW		
heat, district or industrial, natural gas	5,61E+02			MJ	CA-QC	RoW	Modificação de localização para o RoW.

Fluxo	Ecoinvent	Adaptada OC	Adaptada OE	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	Cometários
heat, district or industrial, other than natural gas	8,60E+02			MJ	RoW		
heat, district or industrial, other than natural gas	3,86E-01			MJ	CA-QC	RoW	Modificação de localização para o RoW.
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	1,89E-01			kg	RoW		
lead	9,00E+01			kg	GLO		
lime, hydrated, packed	3,10E-01			kg	RoW		
lubricating oil	8,01E+01			kg	RoW		
nitric acid, without water, in 50% solution state	9,85E-02			kg	RoW		
pig iron	5,02E+02			kg	GLO		
pitch	2,92E+00			kg	BR		
pitch	3,38E-01			kg	PE	BR	Modificação de localização para o Brasil.
pitch	1,66E-01			kg	CO	BR	Modificação de localização para o Brasil.
pitch	4,82E-01			kg	ZA	BR	Modificação de localização para o Brasil.
pitch	7,53E+00			kg	IN	BR	Modificação de localização para o Brasil.
pitch	4,26E+01			kg	RoW	BR	Modificação de localização para o Brasil.
polyethylene, high density, granulate	5,53E+02			kg	GLO		
propylene glycol, liquid	2,60E+01			kg	RoW		
refrigerant R134a	2,00E+00			kg	GLO		
reinforcing steel	4,54E+03			kg	GLO		
road vehicle factory	8,73E-07			Item(s)	GLO		
section bar rolling, steel	5,02E+02			kg	GLO		
sheet rolling, steel	5,68E+02			kg	GLO		
sodium hydroxide, without water, in 50% solution state	3,81E-01			kg	GLO		
steel, chromium steel 18/8, hot rolled	6,90E+02			kg	GLO		
steel, low-alloyed, hot rolled	2,28E+01			kg	GLO		
stone wool, packed	3,96E+02			kg	GLO		
sulfuric acid	3,40E+01			kg	RoW		
synthetic rubber	4,05E+02			kg	GLO		
tap water	3,07E+01			kg	CA-QC	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	1,47E+00			kg	RoW	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	3,33E+01			kg	PE	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	5,08E+01			kg	CO	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	2,55E+02			kg	BR		
tap water	1,28E+03			kg	IN	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	9,48E+01			kg	ZA	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tempering, flat glass	4,90E+02			kg	GLO		
Water, well	6,95E+01			m3			
wire drawing, copper	1,09E+02			kg	GLO		
Outputs							
Ammonia	2,23E-02			kg			

Fluxo	Ecoinvent	Adaptada OC	Adaptada OE	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	Comentários
Benzene	1,31E-02			kg			
BOD5, Biological Oxygen Demand	1,26E-01			kg			
bus	1,00E+00			Item(s)			
Cadmium	1,73E-06			kg			
Carbon dioxide, fossil	6,33E+02			kg			
Carbon monoxide, fossil	9,73E-01			kg			
Chromium	2,93E-04			kg			
COD, Chemical Oxygen Demand	1,26E-01			kg			
Copper	2,93E-04			kg			
Dinitrogen monoxide	2,23E-02			kg			
DOC, Dissolved Organic Carbon	5,51E-02			kg			
Lead	1,90E-08			kg			
Mercury	3,45E-09			kg			
Methane, fossil	1,65E-02			kg			
Nickel	1,21E-05			kg			
Nitrogen oxides	6,00E+00			kg			
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	7,87E+00			kg			
Particulates, < 2.5 um	2,54E-01			kg			
Particulates, > 10 um	1,09E-02			kg			
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	2,12E-02			kg			
Selenium	1,73E-06			kg			
Sulfur dioxide	1,20E-01			kg			
TOC, Total Organic Carbon	5,51E-02			kg			
Toluene	5,51E-03			kg			
used bus	1,00E+00			Item(s)	GLO		
wastewater from lorry production	2,18E+00			m3	GLO		
wastewater, average	1,59E+01			m3	RoW		
Water	1,29E+01			m3			
Water	5,49E+01			m3			
Xylene	5,51E-03			kg			
Zinc	1,73E-04			kg			

Tabela 18 - Relatório de adaptação de ICV: bateria

Dado original: battery production, Li-ion, rechargeable, prismatic | battery, Li-ion, rechargeable, prismatic | Cutoff, U (GLO)

Dado adaptado: bateria 32 células, Li-ion recarregável (BR)

Fluxo	Quantidade			Comentários		Comentários
	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	
Inputs						
battery cell, Li-ion	7,99E-01	1,83E+00	kg	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
cable, data cable in infrastructure	3,73E-01	8,52E-01	m	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
cable, three-conductor cable	2,50E-02	5,70E-02	m	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
electricity, low voltage	1,08E-01	2,46E-01	kWh	GLO	BR	Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015). Modificação de localização para o Brasil.
metal working factory	4,58E-10	1,05E-09	Item(s)	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing	1,02E-03	2,32E-03	kg	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free	2,37E-03	5,41E-03	kg	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
reinforcing steel	1,45E-01	3,32E-01	kg	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
sheet rolling, steel	1,45E-01	3,32E-01	kg	GLO		Dado adaptado conforme quantidade esepcificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
Outputs						
battery, Li-ion, rechargeable, prismatic	1,00E+00	2,29E+00	kg			Dado adaptado conforme quantidade especificada por (ERCAN; TATARI, 2015).
used Li-ion battery	1,00E+00	2,29E+00	kg			Dado adaptado conforme quantidade especificada por (ERCAN; TATARI, 2015).

Tabela 19 - Relatório de adaptação de ICV: transporte

Dado original: transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 | transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 | Cutoff, U (RoW)

Dado adaptado: transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6 (BR)

Fluxo	Quantidade			Comentários		Comentários
	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	
Inputs						
diesel, low-sulfur	1,29E-03		kg	RoW	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel, low-sulfur	1,28E-03		kg	PE	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel, low-sulfur	2,58E-03		kg	CO	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel, low-sulfur	5,79E+10		kg	IN	BR	Modificação de localização para o Brasil.
diesel, low-sulfur	3,08E-02		kg	BR		
diesel, low-sulfur	8,56E+09		kg	ZA	BR	
lorry, 16 metric ton	3,20E-07		Item(s)	GLO		
maintenance, lorry 16 metric ton	3,20E-07		Item(s)	RoW		
road	1,05E-03		m*a	GLO		
road maintenance	2,23E+10		m*a	RoW		
Outputs						
Acetaldehyde	1,51E-02		kg			
Acrolein	5,83E-03		kg			
Ammonia	5,18E-02		kg			
Arsenic	3,66E-07		kg			
Benzaldehyde	4,52E-03		kg			
Benzene	2,31E-04		kg			
brake wear emissions, lorry	2,22E+09		kg	GLO		
Butane	4,94E-04		kg			
Cadmium	3,19E-05		kg			
Carbon dioxide, fossil	1,15E-01		kg			
Carbon monoxide, fossil	1,13E+01		kg			
Chromium	1,10E-04		kg			
Chromium VI	2,20E-07		kg			
Copper	7,77E-05		kg			
Dinitrogen monoxide	6,14E-01		kg			
Ethane	9,89E-05		kg			
Formaldehyde	2,77E-02		kg			
Heptane	9,89E-04		kg			
Lead	1,91E-04		kg			
m-Xylene	3,23E-03		kg			
Mercury	1,94E-05		kg			
Methane, fossil	8,11E-03		kg			
Nickel	3,22E-05		kg			
Nitrogen oxides	5,22E+00		kg			

Fluxo	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	Comentários
NMVOG, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	2,68E-01		kg			
o-Xylene	1,32E-03		kg			
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	2,87E-04		kg			
Particulates, < 2.5 um	4,94E-04		kg			
Pentane	1,98E-05		kg			
Propane	3,30E-04		kg			
road wear emissions, lorry	1,91E+09		kg	GLO		
Selenium	3,66E-07		kg			
Styrene	1,85E-03		kg			
Sulfur dioxide	5,67E-02		kg			
Toluene	3,30E-05		kg			
transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO6	1,00E+00		t*km			
tyre wear emissions, lorry	2,20E+10		kg	GLO		
Zinc	6,37E-03		kg			

Tabela 20 - Relatório de adaptação de ICV: manutenção

Dado original: maintenance, bus | maintenance, bus | Cutoff, U (RoW)

Dado adaptado: manutenção ônibus (BR)

Fluxo	Quantidade			Comentários		Comentários
	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	
Inputs						
electricity, low voltage	2,88E+03		kWh	RU	BR	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, low voltage	1,27E+02		kWh	NZ	BR	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, low voltage	1,03E+04		kWh	EwS	BR	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, low voltage	5,21E+03		kWh	RLA	BR	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, low voltage	3,16E+04		kWh	RAS	BR	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, low voltage	1,48E+04		kWh	RNA	BR	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, low voltage	7,25E+02		kWh	AU	BR	Modificação de localização para o Brasil.
electricity, low voltage	2,09E+03		kWh	RAF	BR	Modificação de localização para o Brasil.
heat, district or industrial, natural gas	2,70E+04		MJ	RoW		
heat, district or industrial, natural gas	1,09E+14		MJ	EwS	RoW	Modificação de localização para o RoW.
heat, district or industrial, natural gas	4,78E+02		MJ	CA-QC	RoW	Modificação de localização para o RoW.
heat, district or industrial, other than natural gas	1,68E+01		MJ	CA-QC	RoW	Modificação de localização para o RoW.
heat, district or industrial, other than natural gas	1,00E+03		MJ	EwS	RoW	Modificação de localização para o RoW.
heat, district or industrial, other than natural gas	3,74E+04		MJ	RoW		
lead	1,79E+01		kg	GLO		
lubricating oil	8,24E+02		kg	RoW		
paper, woodfree, uncoated	3,15E+00		kg	RoW		
polyethylene, high density, granulate	1,40E+00		kg	GLO		
reinforcing steel	5,49E+01		kg	GLO		
synthetic rubber	1,33E+02		kg	GLO		
sulphuric acid, liquid	0,00E+00	1,05E+02	kg			Dado adaptado apenas para manutenção de ônibus elétricos conforme quantidade especificada por FELLER, 2016).
tap water	2,60E+05		kg	RoW	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	1,68E+03		kg	ZA	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	9,00E+02		kg	CO	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	5,44E+02		kg	CA-QC	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	2,27E+04		kg	IN	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	1,93E+05		kg	EwS	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	5,90E+02		kg	PE	BR	Modificação de localização para o Brasil.
tap water	4,52E+03		kg	BR		
Outputs						

Fluxo	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	Comentários
maintenance, bus	1,00E+00		Item(s)			
waste mineral oil	6,17E+02		kg	RoW		
waste mineral oil	2,07E+02		kg	EwS	RoW	Modificação de localização para o RoW.
waste plastic, mixture	5,20E+00		kg	EwS	BR	Modificação de localização para o Brasil.
waste plastic, mixture	3,09E-02		kg	CY	BR	Modificação de localização para o Brasil.
waste plastic, mixture	6,11E+00		kg	BR		
waste plastic, mixture	4,08E-01		kg	CO	BR	Modificação de localização para o Brasil.
waste plastic, mixture	1,69E-01		kg	IN	BR	Modificação de localização para o Brasil.
waste plastic, mixture	4,28E+01		kg	RoW	BR	Modificação de localização para o Brasil.
waste plastic, mixture	1,60E-01		kg	ZA	BR	Modificação de localização para o Brasil.
waste plastic, mixture	6,81E-02		kg	PE	BR	Modificação de localização para o Brasil.
wastewater, average	1,57E+02		m3	EwS	RoW	Modificação de localização para o RoW.
wastewater, average	3,27E+02		m3	RoW		
Water	7,26E+01		m3			

Tabela 21 - Relatório de adaptação de ICV: diesel

Dado original: diesel production, low-sulphur, petroleum refinery operation | diesel, low-sulfur | Cutoff, U (BR) // Dado adaptado: diesel production, combustion (BR)

Fluxo	Quantidade			Comentários		Comentários
	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	
Inputs						
aluminium oxide, non-metallurgical	8,68E-05		kg	RoW		
cobalt	1,81E-06		kg	GLO		
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	1,20E-04		kg	RoW		
kaolin	1,81E-05		kg	GLO		
lanthanum oxide	1,81E-06		kg	GLO		
lime, hydrated, packed	5,70E-04		kg	RoW		
molybdenum trioxide	1,81E-06		kg	GLO		
nickel, 99.5%	1,81E-06		kg	GLO		
petroleum	1,13E+00		kg	GLO		
petroleum refinery	6,14E-12		Item(s)	GLO		
platinum	2,71E-08		kg	GLO		
quicklime, milled, packed	1,30E-04		kg	RoW		
silicone product	1,81E-05		kg	RoW		
sodium hydroxide, without water, in 50% s.s.	6,01E-05		kg	GLO		
Water, cooling, unspecified natural origin	9,91E-03		m3			
Water, unspecified natural origin	5,40E-04		m3			
zeolite, powder	5,07E-05		kg	GLO		
Outputs						
diesel, low-sulfur	1,29E-03		kg	RoW	BR	Modificação de localização para o Brasil.
Aluminium	3,35E+05		kg			
Ammonia	4,27E+07		kg			
Ammonium, ion	8,33E+07		kg			
Antimony	1,53E+06		kg			
AOX, Adsorbable Organic Halogen as Cl	7,93E+06		kg			
Arsenic	2,57E+06		kg			
Arsenic, ion	1,19E+05		kg			
Barium	7,97E+06		kg			
Benzene	3,50E+08		kg			
Benzene	3,97E+04		kg			
Benzo(a)pyrene	1,32E+04		kg			
Beryllium	3,44E+04		kg			
BOD5, Biological Oxygen Demand	3,97E+08		kg			
Boron	1,59E+07		kg			
Cadmium	2,89E+06		kg			
Cadmium, ion	3,97E+04		kg			

Fluxo	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	Comentários
Carbon dioxide, biogenic	1,20E-04		kg			
Carbon dioxide, fossil	2,37E-01	3,10E+03	kg			Dado adaptado conforme quantidade especificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2017).
Carbon monoxide, fossil	9,45E+09		kg			
Chloride	2,78E+10		kg			
Chromium	3,63E+06		kg			
Chromium VI	7,93E+04		kg			
Chromium, ion	3,97E+04		kg			
Cobalt	7,26E+06		kg			
Cobalt	3,97E+04		kg			
COD, Chemical Oxygen Demand	2,62E+09		kg			
Copper	1,10E+07		kg			
Copper, ion	1,98E+06		kg			
Cyanide	5,95E+05		kg			
diesel, low-sulfur	1,00E+00		kg			
Dinitrogen monoxide	9,30E+08		kg			
Dioxins, measured as 2,3,7,8-tetrachlorodibenzo-p-dioxin	3,20E+00		kg			
DOC, Dissolved Organic Carbon	5,44E+08		kg			
Fluoride	3,17E+07		kg			
Formaldehyde	1,25E+08		kg			
hazardous waste, for incineration	3,14E+10		kg	RoW		
hazardous waste, for underground deposit	1,77E+10		kg	GLO		
Heat, waste	6,39E-01		MJ			
Heat, waste	1,47E-01		MJ			
Hydrocarbons, unspecified	5,95E+07	5,85E+09	kg			Dado adaptado conforme quantidade especificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
Hydrogen chloride	4,84E+08		kg			
Hydrogen fluoride	4,94E+07		kg			
Hydrogen sulfide	1,83E+07		kg			
Iron, ion	1,59E+07		kg			
Lead	1,42E+07		kg			
Lead	3,97E+04		kg			
Manganese	1,80E+06		kg			
Manganese	3,17E+06		kg			
Mercury	1,96E+05		kg			
Mercury	7,93E+03		kg			
Methane, fossil	2,70E-05	1,70E-03	kg			Dado adaptado conforme quantidade especificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
Molybdenum	3,97E+05		kg			
Nickel	1,47E+08		kg			
Nickel, ion	3,97E+05		kg			
Nitrate	1,52E+07		kg			
Nitrite	2,41E+04		kg			
Nitrogen	2,16E+08		kg			
Nitrogen oxides	3,20E+10		kg			
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	1,10E+05		kg			

Fluxo	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	Comentários
nitrous oxide	0,00E+00	1,65E+09	kg			Dado adaptado conforme quantidade esepcificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
NMVOOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	2,68E+10		kg			
PAH, polycyclic aromatic hydrocarbons	2,78E+03		kg			
Palladium	3,33E+04		kg			
Particulates, < 2.5 um	4,18E+07		kg			
Particulates, > 10 um	2,11E+10		kg			
Particulates, > 2.5 um, and < 10um	8,86E+08		kg			
Particulates, unspecified	0,00E+00	5,85E+09	kg			Dado adaptado conforme quantidade esepcificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
Phenol	3,97E+06		kg			
Phosphorus	2,38E+07		kg			
Platinum	3,33E+04		kg			
refinery sludge	6,65E+10		kg	RoW		
Rhodium	3,33E+04		kg			
Selenium	3,14E+06		kg			
Selenium	1,59E+06		kg			
Sodium, ion	3,46E+08		kg			
Sulfate	2,07E+10		kg			
Sulfide	1,98E+06		kg			
Sulfur dioxide	8,00E+10		kg			
Suspended solids, unspecified	5,95E+08		kg			
t-Butyl methyl ether	7,93E+05		kg			
Tellurium	4,19E+04		kg			
Thallium	1,05E+06		kg			
Tin	3,70E+06		kg			
Tin, ion	3,97E+05		kg			
TOC, Total Organic Carbon	5,55E+08		kg			
Toluene	3,30E+08		kg			
Toluene	1,19E+05		kg			
Vanadium	3,47E+08		kg			
Vanadium, ion	7,93E+05		kg			
waste gypsum	4,60E+10		kg	RoW		
Water	4,32E+10		m3			
Water	8,18E-03		m3			
Water	2,04E-03		m3			
Xylene	4,30E+08		kg			
Xylene	3,97E+04		kg			
Zinc	9,06E+06		kg			
Zinc, ion	1,19E+06		kg			

Tabela 22 - Relatório de adaptação de ICV: biodiesel

Dado original: esterification of soybean oil | vegetable oil methyl ester | Cutoff, U (BR)

Dado adaptado: biodiesel production, combustion (BR)

Fluxo	Quantidade			Comentários		Comentários
	Ecoinvent	Adaptada	Unidade	Ecoinvent	Adaptada	
Inputs						
electricity, medium voltage	3,83E-02		kWh	BR		
heat, district or industrial, natural gas	6,84E-01		MJ	RoW		
heat, district or industrial, other than natural gas	1,51E-01		MJ	RoW		
hydrochloric acid, without water, in 30% solution state	4,16E-03		kg	RoW		
methanol	1,03E-01		kg	GLO		
phosphoric acid, industrial grade, without water, in 85% solution state	8,23E-02		kg	GLO		
soybean oil, crude	9,30E-01		kg	BR		
tap water	1,52E-02		kg	BR		
vegetable oil esterification facility	8,45E-10		Item(s)	GLO		
Water, cooling, unspecified natural origin	2,90E-04		m3			
Outputs						
Carbon dioxide, biogenic	0,00E+00	2,76E+00	kg			Dado adaptado conforme quantidade esepcificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
Hydrocarbons, unspecified	0,00E+00	6,48E-05	kg			Dado adaptado conforme quantidade esepcificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
Methane, biogenic	0,00E+00	3,77E+10	kg			Dado adaptado conforme quantidade esepcificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
nitrous oxide	0,00E+00	2,27E+09	kg			Dado adaptado conforme quantidade esepcificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
Particulates, unspecified	0,00E+00	1,70E-04	kg			Dado adaptado conforme quantidade esepcificado por CETESB (2021), (BEN, 2021) e EAESP (2020).
vegetable oil methyl ester	1,00E+00		kg			
wastewater, average	5,66E+09		m3	RoW		
Water	1,15E+10		m3			
Water	1,89E+10		m3			

Tabela 23 - Relatório de adaptação de ICV: eletricidade

Dado original: market for electricity, high voltage | electricity, high voltage | Cutoff, U

Dado adaptado: electricity, high voltage divided (BR)*

Fluxo	Fonte	Quantidade¹	Unidade
Electricity, high voltage {BR} sugarcane processing, modern annexed plant Cut-off, U	Cana-de-açúcar	3,15E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR} sugarcane processing, modern autonomous plant Cut-off, U	Cana-de-açúcar	7,20E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-Mid-western grid} treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal Cut-off, U	Bagaço	1,36E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal Cut-off, U	Bagaço	1,36E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-South-eastern grid} treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal Cut-off, U	Bagaço	7,89E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} treatment of bagasse, from sugarcane, in heat and power co-generation unit, 6400kW thermal Cut-off, U	Bagaço	4,88E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-Mid-western grid} electricity production, hydro, reservoir, tropical region Cut-off, U	Hidrelétrica	1,47E-01	kWh
Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} electricity production, hydro, reservoir, tropical region Cut-off, U	Hidrelétrica	5,98E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-Northern grid} electricity production, hydro, reservoir, tropical region Cut-off, U	Hidrelétrica	1,98E-01	kWh
Electricity, high voltage {BR-South-eastern grid} electricity production, hydro, reservoir, tropical region Cut-off, U	Hidrelétrica	4,84E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity production, hydro, reservoir, tropical region Cut-off, U	Hidrelétrica	1,75E-01	kWh
Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore Cut-off, U	Eólica	3,79E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity production, wind, 1-3MW turbine, onshore Cut-off, U	Eólica	4,03E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-Mid-western grid} electricity production, natural gas, combined cycle power plant Cut-off, U	Gás natural	1,05E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-Mid-western grid} electricity production, natural gas, conventional power plant Cut-off, U	Gás natural	1,18E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} electricity production, natural gas, combined cycle power plant Cut-off, U	Gás natural	1,75E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} electricity production, natural gas, conventional power plant Cut-off, U	Gás natural	1,82E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-Northern grid} electricity production, natural gas, combined cycle power plant Cut-off, U	Gás natural	1,16E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-South-eastern grid} electricity production, natural gas, combined cycle power plant Cut-off, U	Gás natural	2,15E-02	kWh

Fluxo	Fonte	Quantidade¹	Unidade
Electricity, high voltage {BR-South-eastern grid} electricity production, natural gas, conventional power plant Cut-off, U	Gás natural	1,32E-02	kWh
Fluxo	Fonte	Quantidade¹	Unidade
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity production, natural gas, combined cycle power plant Cut-off, U	Gás natural	4,01E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-Mid-western grid} electricity production, oil Cut-off, U	Óleo	4,06E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} electricity production, oil Cut-off, U	Óleo	2,78E-02	kWh
Fluxo	Fonte	Quantidade¹	Unidade
Electricity, high voltage {BR-Northern grid} electricity production, oil Cut-off, U	Óleo	2,09E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-South-eastern grid} electricity production, oil Cut-off, U	Óleo	2,47E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity production, oil Cut-off, U	Óleo	2,00E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-North-eastern grid} electricity production, hard coal Cut-off, U	Carvão	2,19E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity production, hard coal Cut-off, U	Carvão	8,03E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-South-eastern grid} electricity production, nuclear, pressure water reactor Cut-off, U	Nuclear	1,12E-02	kWh
Electricity production {RoW}, solar tower power plant, 20 MW electricity, high voltage Cutoff, U	Solar	1,00E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-Northern grid} electricity, high voltage, import from VE Cut-off, U	Importação	2,24E-03	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity, high voltage, import from AR Cut-off, U	Importação	1,14E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity, high voltage, import from PY Cut-off, U	Importação	2,86E-02	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity, high voltage, import from UY Cut-off, U	Importação	3,54E-04	kWh
Electricity, high voltage {BR-Southern grid} electricity, high voltage, import from VE Cut-off, U	Importação	1,01E-03	kWh

Legenda:

*os valores do dataset original foram abertos em nível nacional e região buscando um entendimento mais amplo da diferenciação por fonte dentro do território nacional; ¹os valores foram extraídos de duas fontes a contida no próprio dataset (MME, 2016) e do percentual de contribuição por fonte Centro Clima (2017).

APÊNDICE C – Impactos ambientais segundo avaliação de cenários

Resultados de avaliação de impacto do ciclo de vida para os três cenários analisados (BAU, EL1 e EL2).

Tabela 24 - Cenário 1 (BAU)

Ano	GWP (kg CO2 eq.)	FD (kg oil-eq.)	HT (kg 1,4 DCB eq.)	PMFP (kg PM10 eq.)
2020	3,69E+07	1,19E+07	3,50E+06	3,64E+04
2021	3,62E+07	1,15E+07	2,39E+06	3,19E+04
2022	3,78E+07	1,19E+07	3,67E+06	3,93E+04
2023	3,71E+07	1,15E+07	2,70E+06	3,53E+04
2024	3,89E+07	1,21E+07	4,69E+06	4,53E+04
2025	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2026	3,71E+07	1,15E+07	2,60E+06	3,48E+04
2027	3,62E+07	1,12E+07	1,69E+06	3,03E+04
2028	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2029	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2030	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2031	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2032	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2033	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2034	3,80E+07	1,18E+07	3,65E+06	4,01E+04
2035	3,70E+07	1,15E+07	2,49E+06	3,43E+04
2036	3,81E+07	1,18E+07	3,72E+06	4,04E+04
2037	3,72E+07	1,15E+07	2,70E+06	3,53E+04
2038	3,89E+07	1,21E+07	4,69E+06	4,53E+04
2039	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2040	3,71E+07	1,15E+07	2,60E+06	3,48E+04
2041	3,62E+07	1,12E+07	1,69E+06	3,03E+04
2042	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2043	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2044	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2045	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2046	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2047	3,62E+07	1,12E+07	1,62E+06	2,99E+04
2048	3,80E+07	1,18E+07	3,65E+06	4,01E+04
2049	3,70E+07	1,15E+07	2,49E+06	3,43E+04
2050	3,81E+07	1,18E+07	3,72E+06	4,04E+04

Legenda:

Potencial de aquecimento global (GWP) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Potencial de depleção de recursos abióticos fósseis (FD) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Toxicidade humana (HT) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Formação de material particulado (PMFP) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Tabela 25 - Cenário 2 (EL1)

Ano	GWP (kg CO2 eq.)	FD (kg oil-eq.)	HT (kg 1,4 DCB eq.)	PMFP (kg PM10 eq.)
2020	3,23E+07	1,02E+07	3,40E+06	3,52E+04
2021	2,98E+07	9,19E+06	2,25E+06	2,84E+04
2022	2,52E+07	7,64E+06	3,36E+06	3,26E+04
2023	2,15E+07	5,96E+06	2,26E+06	2,45E+04
2024	1,46E+07	4,19E+06	4,04E+06	3,10E+04
2025	1,17E+07	2,85E+06	9,20E+05	1,22E+04
2026	9,51E+06	2,49E+06	1,84E+06	1,66E+04
2027	8,68E+06	2,24E+06	9,45E+05	1,15E+04
2028	8,34E+06	6,50E+05	7,56E+05	7,98E+03
2029	3,01E+06	6,65E+05	7,64E+05	8,28E+03
2030	3,02E+06	6,74E+05	7,70E+05	8,49E+03
2031	2,93E+06	6,45E+05	7,36E+05	8,18E+03
2032	2,89E+06	6,37E+05	7,31E+05	8,08E+03
2033	2,82E+06	6,22E+05	6,91E+05	7,78E+03
2034	4,69E+06	1,21E+06	2,70E+06	1,94E+04
2035	3,55E+06	8,59E+05	1,53E+06	1,25E+04
2036	4,77E+06	1,24E+06	2,77E+06	1,97E+04
2037	3,86E+06	9,58E+05	1,76E+06	1,39E+04
2038	5,77E+06	1,56E+06	3,76E+06	2,54E+04
2039	2,90E+06	6,68E+05	6,99E+05	7,64E+03
2040	3,90E+06	9,79E+05	1,70E+06	1,34E+04
2041	3,06E+06	7,18E+05	7,96E+05	8,29E+03
2042	3,01E+06	7,04E+05	7,36E+05	7,92E+03
2043	3,02E+06	7,16E+05	7,36E+05	8,01E+03
2044	3,04E+06	7,24E+05	7,54E+05	8,07E+03
2045	3,06E+06	7,30E+05	7,55E+05	8,17E+03
2046	2,97E+06	6,99E+05	7,39E+05	8,08E+03
2047	2,91E+06	6,76E+05	7,35E+05	8,11E+03
2048	4,73E+06	1,24E+06	2,75E+06	1,98E+04
2049	3,60E+06	8,86E+05	1,59E+06	1,31E+04
2050	4,67E+06	1,21E+06	2,79E+06	2,01E+04

Legenda:

Potencial de aquecimento global (GWP) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Potencial de depleção de recursos abióticos fósseis (FD) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Toxicidade humana (HT) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Formação de material particulado (PMFP) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Tabela 26 - Cenário 3 (EL2)

Ano	GWP (kg CO2 eq.)	FD (kg oil-eq.)	HT (kg 1,4 DCB eq.)	PMFP (kg PM10 eq.)
2020	2,90E+07	9,31E+06	2,44E+06	2,84E+04
2021	2,68E+07	8,47E+06	2,33E+06	2,74E+04
2022	2,47E+07	7,68E+06	2,21E+06	2,62E+04
2023	2,27E+07	6,96E+06	2,08E+06	2,50E+04
2024	2,09E+07	6,37E+06	1,93E+06	2,32E+04
2025	1,92E+07	5,82E+06	1,82E+06	2,17E+04
2026	1,76E+07	5,32E+06	1,71E+06	2,04E+04
2027	1,62E+07	4,87E+06	1,61E+06	1,93E+04
2028	1,49E+07	4,45E+06	1,55E+06	1,83E+04
2029	1,38E+07	4,09E+06	1,47E+06	1,74E+04
2030	1,27E+07	3,76E+06	1,41E+06	1,67E+04
2031	1,17E+07	3,45E+06	1,33E+06	1,57E+04
2032	1,08E+07	3,16E+06	1,27E+06	1,49E+04
2033	9,96E+06	2,90E+06	1,19E+06	1,40E+04
2034	1,01E+07	3,02E+06	2,32E+06	2,02E+04
2035	9,47E+06	2,78E+06	2,16E+06	1,88E+04
2036	8,97E+06	2,58E+06	2,03E+06	1,79E+04
2037	8,53E+06	2,41E+06	1,90E+06	1,69E+04
2038	8,10E+06	2,24E+06	1,77E+06	1,59E+04
2039	7,76E+06	2,11E+06	1,69E+06	1,52E+04
2040	7,47E+06	1,99E+06	1,61E+06	1,45E+04
2041	7,16E+06	1,87E+06	1,53E+06	1,40E+04
2042	6,89E+06	1,77E+06	1,48E+06	1,36E+04
2043	6,65E+06	1,68E+06	1,40E+06	1,30E+04
2044	6,44E+06	1,60E+06	1,36E+06	1,26E+04
2045	6,25E+06	1,53E+06	1,31E+06	1,23E+04
2046	5,98E+06	1,43E+06	1,25E+06	1,19E+04
2047	5,76E+06	1,34E+06	1,20E+06	1,16E+04
2048	5,51E+06	1,60E+06	2,33E+06	1,81E+04
2049	5,34E+06	1,51E+06	2,19E+06	1,72E+04
2050	5,14E+06	1,40E+06	2,04E+06	1,63E+04

Legenda:

Potencial de aquecimento global (GWP) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Potencial de depleção de recursos abióticos fósseis (FD) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Toxicidade humana (HT) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

Formação de material particulado (PMFP) – ReCiPe Midpoint (H) V1.13

APÊNDICE D – Mapeamento linhas Carris

Mapeamento de todas as linhas em circulação no ano base. Destaque para a junção dos percursos que continham rotas de ida e volta.

Figura 33 - Mapeamento linhas Carris

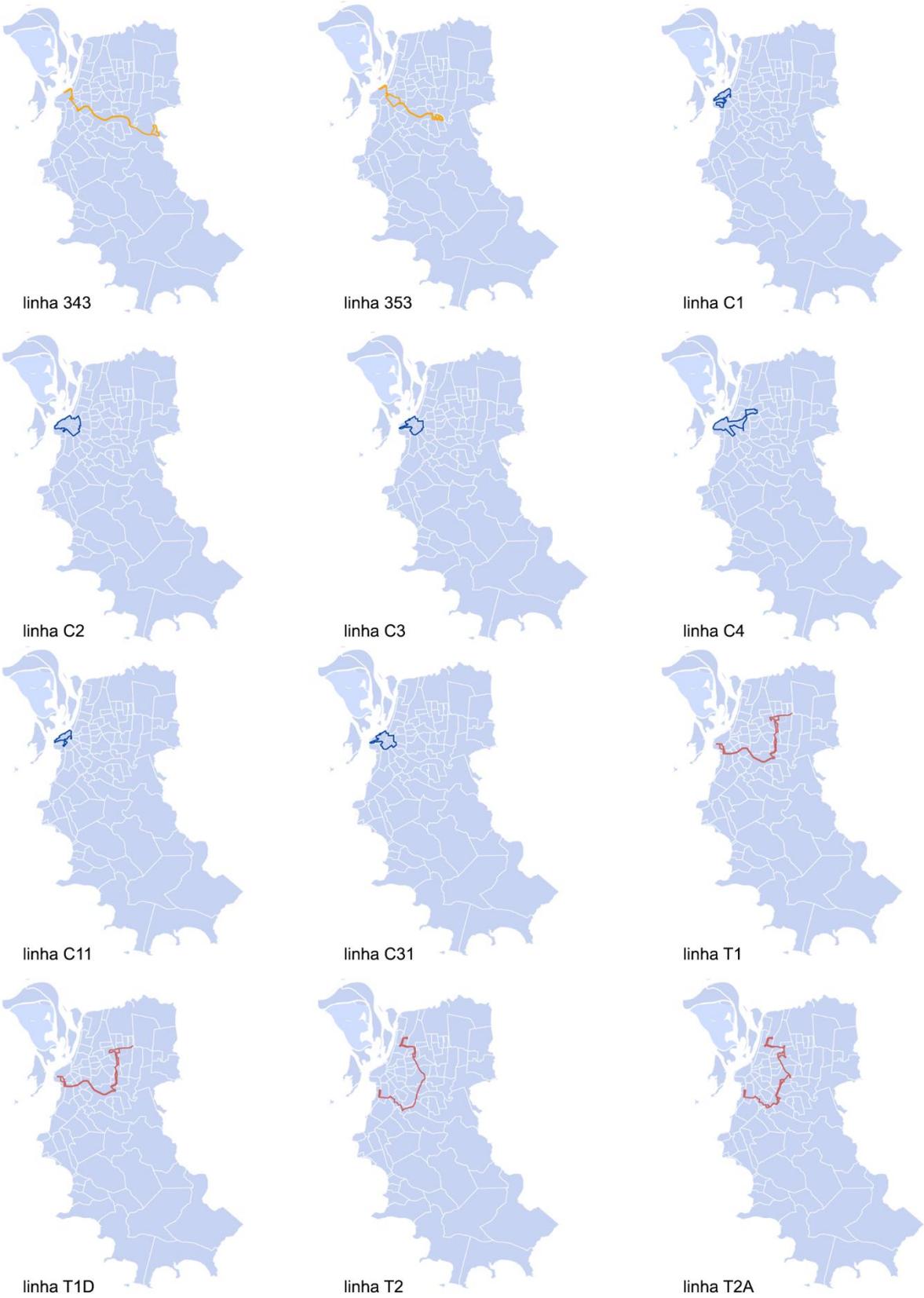


Figura 33 - Mapeamento linhas Carris

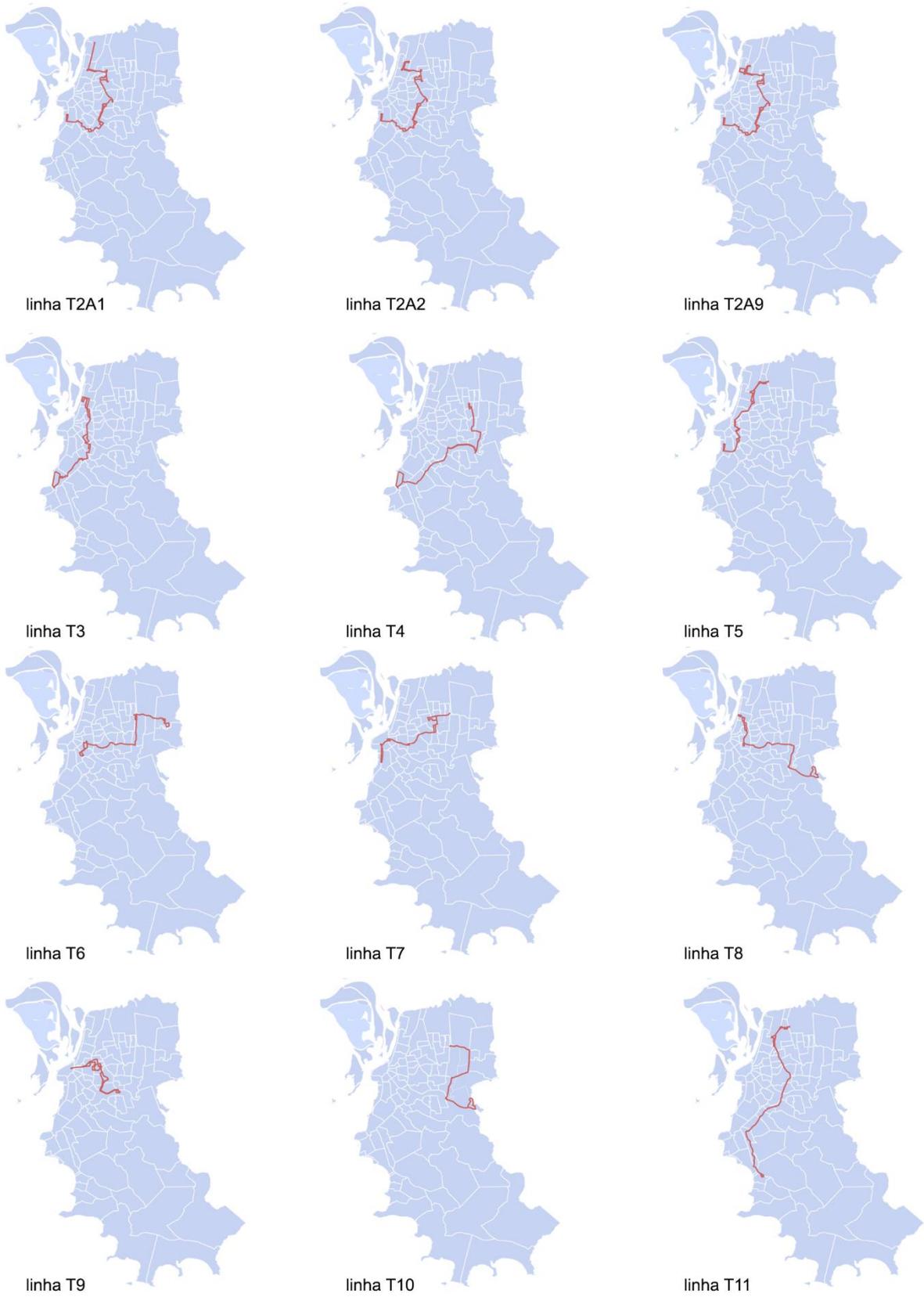


Figura 33 - Mapeamento linhas Carris



linha T11A



linha T12



linha T12A



linha T22



linha T23



linha T29



linha T39



linha T51



linha T52



linha T89



linha T121