

**Universidade Federal Do Rio Grande Do Sul  
Escola de Engenharia  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil: Construção e  
Infraestrutura**

**Isadora Corrêa Hackenhaar**

**Avaliação do Ciclo de Vida para apoiar políticas públicas para o  
desenvolvimento urbano sustentável: um estudo de caso do  
sistema de transporte público coletivo de Porto Alegre**

Porto Alegre  
2020

**ISADORA CÔRREA HACKENHAAR**

**AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA PARA APOIAR  
POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O DESENVOLVIMENTO  
URBANO SUSTENTÁVEL: UM ESTUDO DE CASO DO  
SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO DE  
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

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Ana Carolina Badalotti Passuello**  
Dr<sup>a</sup>. pela Universidade Rovira i Virgili, Espanha  
Orientadora

Porto Alegre  
2020

### CIP - Catalogação na Publicação

Hackenhaar, Isadora Corrêa

Avaliação do Ciclo de Vida para apoiar políticas públicas para o desenvolvimento urbano sustentável: um estudo de caso do sistema de transporte público coletivo de Porto Alegre / Isadora Corrêa Hackenhaar. -- 2020.

145 f.

Orientadora: 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, 2020.

1. Avaliação do Ciclo de Vida. 2. Políticas públicas em sistemas urbanos. 3. Desenvolvimento Urbano Sustentável. 4. Transporte público coletivo. I. Passuello, Ana Carolina Badalotti, orient. II. Título.

# **ISADORA CÔRREA HACKENHAAR**

## **AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA PARA APOIAR POLÍTICAS PÚBLICAS PARA O DESENVOLVIMENTO URBANO SUSTENTÁVEL: UM ESTUDO DE CASO DO SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO COLETIVO DE 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, 2020

**Profª. Drª. Ana Carolina Badalotti Passuello**  
Drª. pela Universidade Rovira i Virgili, Espanha  
Orientadora

**Profª. Drª. Angela Borges Masuero**  
Coordenador do PPGCI/UFRGS

### **BANCA EXAMINADORA**

**Prof. Dr. Fausto Miguel Cereja Seixas Freire (UC)**  
Doutor pela Universidade de Lisboa, Portugal

**Profª. Drª. Cássia Maria Lie Ugaya (UTFPR)**  
Doutora pela Universidade Estadual de Campinas, Brasil

**Prof. Dr. Maurício Carvalho Ayres Torres (UFRGS)**  
Doutor pela Universidade Politécnic da Catalunha, Espanha

**Profª. Drª. Ângela de Moura Ferreira Danilevicz (UFRGS)**  
Doutora pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil

Dedico esse trabalho aos meus pais e ao  
Victor, meus fiéis apoiadores.

## AGRADECIMENTOS

À CAPES pelo apoio financeiro que possibilitou a dedicação para o desenvolvimento deste mestrado.

Agradeço a Prof. Ana Passuello, que como uma mãe, me apoiou e me orientou nessa jornada, transmitindo seu conhecimento e conselhos, me apoiando incondicionalmente nas minhas decisões perante esta pesquisa e esta carreira desafiadora como pesquisadora.

Agradeço aos professores da banca que ajudaram diretamente nas definições dos rumos da dissertação, pelas correções e sugestões. Especialmente agradeço ao Prof. Fausto Freire, por ter me recebido no Centro de Ecologia Industrial (CEI) da Universidade de Coimbra (UC), e pelos aconselhamentos dados por si e pelos demais colegas do CEI: Rita, Yvonne, Pedro, Carlos, Carla, e Fabiana.

Agradeço a disponibilidade e atenção dada pela Empresa Pública de Transporte e Circulação (EPTC), e em especial o coordenador de normatização de transporte da empresa, Rogério, que gentilmente nos recebeu e forneceu alguns dos dados utilizados nessa pesquisa. Da mesma maneira, agradeço a Associação dos Transportadores de Passageiros de Porto Alegre (ATP) pelos dados e informações disponibilizados.

Aos amigos do PPGCI, por dividirem não apenas o espaço, mas todas as batalhas, conquistas e aprendizados dessa etapa. Agradeço principalmente as minhas colegas da sala 104, Janaine, Gabriela, e Deise, e nossas companheiras Natália e Débora, por todas as ideias trocadas e incentivos para realização dessa dissertação. E todos os amigos e colegas que fiz durante esse tempo, Vanessa, Fernanda, Camila, Roberta, Mariana, e vários outros que de alguma maneira contribuíram para esse trabalho. À Lucília e a Lúcia, por toda a assistência.

Agradeço ao grupo Life Cycle and Innovation for the Built Environment (LiFE), pela colaboração e conhecimentos trocados. Com vocês aprendi muito sobre ACV (e não AVC). Em especial, agradeço ao Gustavo, por ter me incentivado e embarcar nessa aventura, à Michele, e à Natália, por terem me acompanhado no início da jornada, e a Michelle, que aceitou me auxiliar e aprender comigo um dos assuntos mais complexos e ainda não tão desbravados da ACV para estudos urbanos.

À minha amiga Gabriela, que dividiu comigo o amor pela pesquisa, ajudou e aconselhou em todos os momentos.

Ao Victor, pelo apoio nas madrugadas a fim. À minha Família pelo amor incondicional.

“É fazendo que se aprende a fazer aquilo que se deve aprender a fazer.”

*(Aristóteles)*

## RESUMO

HACKENHAAR, I. C. **Avaliação do Ciclo de Vida para apoiar políticas públicas para o desenvolvimento urbano sustentável: um estudo de caso do sistema de transporte público coletivo de Porto Alegre.** 2019. Dissertação (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, 2020.

Pesquisas indicam que áreas urbanas são responsáveis por 71 à 76% das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas a consumos energéticos. Devido à sua grande parcela de emissões nas atividades urbanas, as estratégias para o desenvolvimento urbano sustentável geralmente visam os sistemas de transporte de passageiros. A técnica de Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é capaz de gerar informações com base científica, confiáveis, sobre impactos ambientais para apoiar a tomada de decisão de políticas públicas urbanas. Contudo, cidades possuem sistemas multifuncionais, dinâmicos, únicos dentro de seu contexto socioeconômico, e ainda em estudo para análise segundo a ACV. Dessa forma, a presente pesquisa busca definir o perfil ambiental do sistema coletivo de transporte público de Porto Alegre, contemplando especificidades do contexto urbano e diferentes cenários de políticas públicas através da ACV Territorial. Para tanto, primeiramente, uma revisão de literatura sobre escolhas de modelagem para ACVs aplicadas a cidades e sistemas urbanos é realizada, a fim de identificar parâmetros chave no estudo destes sistemas complexos. O estudo de caso é desenvolvido e detalhado para demonstrar o procedimento de aplicação da ferramenta na verificação de impactos ambientais gerados por diferentes variáveis que contribuem com emissões na fase de uso do ciclo de vida, sendo elas: o combustível; as características dos veículos utilizados; e a rotina de operação, que inclui as distâncias percorridas e o número de usuários do transporte coletivo. As projeções de mudança até o ano de 2030 são determinadas de acordo com políticas de diferentes níveis governamentais (nacional e municipal) que influenciam estas variáveis, bem como projeções estatísticas de operação do sistema. Os resultados indicam que o combustível é a primeira fonte de mudanças significativas na busca da mitigação dos impactos no transporte público. A influência do número de passageiros nos valores de emissões é também ressaltada, dada à função do sistema (transporte de pessoas). Verifica-se, por meio dos resultados da revisão de literatura e do estudo de caso, que os impactos ambientais de sistemas urbanos podem ser analisados em função dos seus valores totais - para geração de indicadores globais de emissões ao ano. Contudo, para discussões de mudança no planejamento dos mesmos, a análise da função é imprescindível. Sendo assim, sugere-se que as deliberações sobre o assunto devem considerar ambas as análises. Da mesma forma, verifica-se que resultados de ACV para políticas públicas de longo prazo são melhores representados de maneira dinâmica, demonstrando mudanças ao longo do tempo, para auxiliar os tomadores de decisão no monitoramento e manutenção do planejamento segundo os objetivos de redução de impacto. Além disso, a identificação de diferentes níveis organizacionais envolvidos no ciclo de vida de sistemas urbanos é chave para que os governantes possam entender a extensão das mudanças ambientais causadas pela tomada de decisão no âmbito público.

**Palavras-chave:** Avaliação do Ciclo de Vida. Políticas públicas em sistemas urbanos. Desenvolvimento Urbano Sustentável. Transporte público coletivo.



## ABSTRACT

HACKENHAAR, I. C. **Life Cycle Assessment to support public policies for the urban sustainable development: a case study of the public bus transport in Porto Alegre.** 2019. Dissertation (Master of Science in Civil Engineering) - Postgraduate Program in Civil Engineering: Construction and Infrastructure, Engineering School, Federal University of Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2020.

Researches indicate that urban areas are responsible for 71 to 76% of CO<sub>2</sub> emissions related to energy consumption. Due to their large share of emissions in urban activities, strategies for sustainable urban development generally target passenger transportation systems. The standardized Life Cycle Assessment (LCA) tool is capable of generating scientifically based and reliable information on environmental impacts to support decision-making in urban public policies. However, cities have multifunctional and dynamic systems, unique within their socio-economic context, and still under study according to the LCA perspective. Thus, this research seeks to identify the environmental profile of the public bus transportation system in Porto Alegre, considering specificities of the urban context and different public policy scenarios through the Territorial LCA. For that, first, a literature review on modelling choices for LCAs applied to cities and urban systems is carried out, to identify key parameters in the study of these complex systems. The case study is developed and detailed to demonstrate the procedure for applying the tool in the verification of environmental impacts generated by different variables that contribute to emissions in the use phase of the life cycle, namely: fuel; the characteristics of the vehicles used; and the operation routine, which includes the mileage and the number of users of public bus transportation. The yearly changing projections -up to the year 2030- are determined according to policies of different government levels (national and municipal) that influence these variables, as well as statistical projections of the system's operation routine. The results indicate that fuel is the first source of significant changes in the quest to mitigate impacts on public bus transportation. The influence of the number of passengers on the emission values is also highlighted, given the function of the system (transportation of people). It is verified, through the results of both literature review and case study, that the environmental impacts of urban systems can be assessed according to their total values - to generate global emissions indicators per year. However, for discussions of changes in their planning, analysis of the function is essential. Therefore, it is suggested that the deliberations on the subject should consider both analyzes. Likewise, it appears that LCA results for long-term public policies are better represented dynamically, demonstrating changes over time, to assist decision-makers in monitoring and managing plans for impact reduction. Besides, the identification of different organizational levels involved in the life cycle of urban systems is key for government officials to understand the extent of environmental changes caused by urban public policies.

**Keywords:** Life Cycle Assessment. Urban systems policies. Sustainable Urban Development. Public bus transport service.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Concentração geográfica dos estudos e número de artigos científicos por país.....	28
Figura 2 - Distribuição de trabalhos científicos de acordo com a classificação por temas e foco de pesquisa. ....	31
Figura 3 - Proporção (em %) de (a) escolha de método de análise (qualitativa ou quantitativa); (b) indicadores de impacto mais utilizados (classificados entre, CO <sub>2</sub> – quando não foram especificadas inclusões de demais gases equivalentes -, GEE, ou vários categorias de impacto sobre caracterização em midpoint ou endpoint); (c) correlação de escolha entre indicadores e as ferramentas utilizadas. ....	32
Figura 4 - Participação (em %) dos métodos de caracterização de impacto do ciclo de vida nas escolhas de abordagem para a ACV.....	33
Figura 5- Evolução e dimensões de pesquisa do ambiente construído.....	35
Figura 6 - Esquema da estrutura da pesquisa. O método do estudo de caso é destacado, e as ferramentas e materiais utilizados em cada etapa citados. ....	46
Figura 7 - Esquema estratégico do novo Plano de Diretor Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre. Revisão de acordo com o Plano Diretor de 1999 e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.....	49
Figura 8 - Histórico de rodagem (em barras) e do número de passageiros transportados (em linha) no período entre 2002 e 2017.....	55
Figura 9 - Etapas do Ciclo de Vida com as respectivas variáveis suscetíveis à mudanças por políticas públicas para fins de mitigação.....	58
Figura 10 - Fronteira tecnológica do sistema. ....	59
Figura 11 - Impactos ambientais por mistura de combustível segundo a porcentagem de biodiesel no combustível a base de diesel: B8 (8% biodiesel); B9 (9% biodiesel); B10 (10% biodiesel); B20 (20% biodiesel); e B30 (30% biodiesel) a partir da unidade de análise de 1 MJ.....	78
Figura 12 - Potencial de aquecimento global (GWP100) em função das características dos veículos da frota no ano de 2017, em que o combustível utilizado era o B8 (em kg CO <sub>2</sub> por km rodado).....	79
Figura 13 - Sistema de transporte público por ônibus em Porto Alegre segundo as bacias de atendimento. ....	81
Figura 14 - Histórico de volume de passageiros por bacia de transporte ao longo dos anos no período entre os anos de 2002 e 2017. ....	83
Figura 15 - Projeções dos impactos totais de aquecimento global do ciclo de vida anual do sistema de transporte de ônibus em Porto Alegre (em kg CO <sub>2</sub> eq/ano).....	87
Figura 16 - Projeções dos impactos absolutos de potencial de acidificação terrestre do ciclo de vida anual do sistema de transporte de ônibus em Porto Alegre (em kg SO <sub>2</sub> eq/ano). Para melhor visualização do gráfico, o eixo de valores de impacto inicia em 3,2E05. ....	87

Figura 17 - Projeções dos impactos de aquecimento global do ciclo de vida anual normalizados segundo a relação de eficiência (km/passageiros transportados) do sistema no ano de 2017 do sistema de transporte de ônibus em Porto Alegre..... 89

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Resumos das características da ACV territorial do Tipo A e Tipo B. ....	41
Tabela 2 - Resultados inventário de gases de efeito estufa para os anos de 2013.....	52
Tabela 3 - Histórico de distância percorrido e passageiro transportado pelo sistema coletivo de ônibus na cidade de Porto Alegre.....	63
Tabela 4 - Opções de composto combustível a serem consumidos no transporte coletivo (por kg de combustível). ....	64
Tabela 5 – Estimativa de mudança com substituição da frota (em unidades de veículos) para o período 2017-2030, e respectiva eficiência do sistema considerando as eficiências médias observadas em 2017. ....	66
Tabela 6 - Cenários de mudanças ao longo do tempo segundo as variáveis propostas neste trabalho.....	67
Tabela 7 - Dados de emissões para combustão dos combustíveis diesel e biodiesel. ....	69
Tabela 8 - Categorias de Impacto segundo e descrição de impacto .....	73
Tabela 9 - Equivalência funcional do combustível segundo o poder calorífico.....	75
Tabela 10 - Razão entre quilômetros rodados e passageiros transportados mensalmente no ano 2017 de acordo com os lotes de veículos. Bacia Norte: 1 e 2; Bacia Sul: 3 e 4; Bacia Leste: 5 e 6; Bacia pública: 7. Intervalo de cor: Vermelho = Menos eficiente; Verde = Mais eficiente. ....	83

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.a. - ao ano  
ABM - Modelagem Baseada em Agente, do inglês *Agent-based modelling*  
ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas  
ACCV - Avaliação do Custo do Ciclo de Vida  
ACV - Avaliação do Ciclo de Vida  
ACVS - Avaliação do Ciclo de Vida Social  
ADP-f - Depleção potencial de recursos abióticos – elementos fósseis  
AFM - Análise do Fluxo de Materiais  
AIA - Avaliação de Impacto Ambiental  
AICV - Avaliação do Impacto do Ciclo de Vida  
ANP - Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis  
AP- Potencial de acidificação de solo e água  
AR4 - 4º Relatório de Avaliação  
ASCV - Avaliação da Sustentabilidade do Ciclo de Vida  
ATP - Associação de Transporte Público  
CNPE - Conselho Nacional de Política Energética  
CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente  
EC - Economia Circular  
EF – Equivalente Funcional  
EIV - Estudo de Impacto de Vizinhança  
EPTC - Empresa Pública de Transporte e Circulação da cidade  
EUA - Estados Unidos da América  
FEPAM - Fundação Estadual de Proteção Ambiental  
GEE - Gases de Efeito Estufa  
GPC - Protocolos Global para os Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Escala Comunitária, do inglês, *Global Protocol for Community-Scale GHG Inventories*  
GWP - Potencial de aquecimento global  
IBGE - Instituto Nacional de Processamento de Dados Estatísticos  
ICV - Inventário do Ciclo de Vida  
MU - Metabolismo Urbano  
ODM - Objetivos de Desenvolvimento do Milênio  
ODS - Objetivos de Desenvolvimento Sustentável  
ONU - Organização das Nações Unidas  
OSD - *Overshoot Day Organization*  
PCV - Pensamento do Ciclo de Vida  
PDDUA - Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental  
PMPA - Prefeitura Municipal de Porto Alegre  
PNAD - Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios  
POCP - Potencial de formação de ozônio fotoquímico  
RCD - Resíduos de Construção e Demolição  
SD - System Dynamics  
SGBD - Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados  
SH-ER – Saúde Humana, Efeitos Respiratórios  
SIG - Sistema de Informação Geográfica  
SIN - Sistema Interligado Nacional  
SMAMS - Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Sustentabilidade  
UA – Unidade de análise  
UC – Unidade Comum  
UF- Unidade Funcional  
UN - United Nations  
WRI - World Resources Institute  
ZISPOA - Zona de Inovação Sustentável

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>17</b>
1.1	CONTEXTO E JUSTIFICATIVA .....	17
1.2	OBJETIVOS DA PESQUISA .....	21
1.3	DELIMITAÇÕES .....	22
1.4	ESTRUTURA DO TRABALHO.....	23
<b>2</b>	<b>AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA</b> .....	<b>25</b>
2.1	ACV APLICADA A CIDADES E SISTEMAS URBANOS.....	26
2.1.1	Concentração e escala geográfica .....	28
2.1.2	Temas abordados .....	29
2.1.3	Métodos e indicadores de caracterização de impacto.....	31
2.1.4	Discussão .....	34
2.2	ACV territorial .....	40
<b>3</b>	<b>MÉTODO E MATERIAIS</b> .....	<b>44</b>
3.1	DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO .....	46
<b>4</b>	<b>RESULTADOS</b> .....	<b>53</b>
4.1	OBJETIVO E ESCOPO.....	53
4.1.1	Contexto de operação do sistema - consulta ao gestor de transporte.....	53
4.1.2	Definição do objetivo .....	56
4.1.3	Definição de escopo .....	57
4.1.3.1	Fronteira tecnológica do sistema de produto .....	58
4.1.3.2	Funções e Unidade Funcional.....	59
4.1.3.3	Cenários .....	61
4.1.3.4	Alocação e modelo de abordagem.....	61
4.2	INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV) .....	62
4.2.1	Dados primários .....	62
4.2.1.1	Cálculos de cenário segundo dados primários.....	63
4.2.2	Dados secundários.....	68
4.2.3	Qualidade dos dados, Sensibilidade e Incertezas .....	70
4.3	AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA .....	71
4.4	INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	74
4.4.1	Caracterização das variáveis do sistema.....	74

4.4.1.1 Biodiesel .....	74
4.4.1.2 Características dos veículos da frota .....	78
4.4.1.3 Variáveis de operação.....	80
<b>4.4.2 Projeções .....</b>	<b>83</b>
<b>5 DISCUSSÃO .....</b>	<b>91</b>
5.1 O CONTEXTO NAS DEFINIÇÕES DE OBJETIVO E ESCOPO .....	91
5.2 DADOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS.....	93
5.3 INDICADORES DE IMPACTO .....	94
5.4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS.....	95
<b>6 CONCLUSÕES .....</b>	<b>97</b>
6.1 TRABALHOS FUTUROS .....	102
<b>APÊNDICE A – Análise qualitativa da revisão bibliográfica .....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE B - Impactos ambientais segundo projeções .....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXO A – Consumo e Média de eficiência de veículos em 2017-2018 ...</b>	<b>137</b>
<b>ANEXO B - Inventários de Viana (2008) para diesel e biodiesel .....</b>	<b>139</b>





# 1 INTRODUÇÃO

Este capítulo apresenta o embasamento e a motivação para o tema de pesquisa proposto. Estão nele expostos: o contexto e justificativa do tema proposto, objetivos, bem como delimitações de pesquisa. No final do capítulo, a estrutura desta dissertação é apresentada.

## 1.1 CONTEXTO E JUSTIFICATIVA

Os processos de urbanização têm sido estudados ao longo das décadas e seus benefícios são incontáveis (UN, 2014). Entre outros, as cidades estão relacionadas à maior mobilidade geográfica, maior expectativa de vida, redução da pobreza, níveis mais altos de alfabetização e educação, melhor saúde e aumento da participação cultural e política (UN, 2014). No entanto, o crescimento urbano rápido e não planejado gera uma série de impactos socioeconômicos e ambientais. Uma expansão não planejada ou inadequadamente gerenciada, que é o modelo global predominante de urbanização, leva a densidades desequilibradas, maior custo de vida nas cidades, pobreza, poluição, degradação ambiental e tendências insustentáveis de produção e consumo (UN-HABITAT, 2012). Hoje, as áreas urbanas são mais desiguais do que as áreas rurais, visto que cerca de um terço da população urbana mundial vive em favelas (UN-HABITAT, 2012).

De acordo com o último *World Urbanization Prospect*, das Nações Unidas (UN, 2014), mais da metade da população mundial vive hoje em áreas urbanas. Nos anos 50, esse número estava próximo de 30%. Até 2050, 66% da população mundial deve viver em áreas urbanas, um aumento de até 2,5 bilhões de pessoas. Noventa por cento do crescimento total deverá estar concentrado na Ásia e na África. No Brasil, o processo de urbanização foi acelerado pelo processo de industrialização ocorrido em meados de 1930 (MARICATO, 2015). Entre 1940 e 1980, as taxas de desenvolvimento do país estavam próximas de 7% ao ano, e as taxas de urbanização eram de 5,5% ao ano. Segundo o censo do IBGE, 44,67% da população brasileira já vivia em áreas urbanas em 1960. Nos anos 80, 67,59% dos brasileiros viviam em cidades (MARICATO, 2015). Os dados da Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) mostram que, em 2015, o percentual da população brasileira em área urbana era de 84,72%, (IBGE, 2018a). Embora esse percentual tenda a aumentar pouco até 2050, a população urbana

no Brasil deve crescer mais de 45 milhões de habitantes, principalmente em cidades de pequeno e médio porte - até 5 milhões de habitantes (UN, 2014).

A preocupação é que os hábitos de consumo nas cidades sejam mais intensos do que nas áreas rurais, e sua correlação é observada nos gráficos do Dia da Sobrecarga da Terra. Em 1961, a Terra ainda tinha capacidade de regenerar recursos naturais renováveis consumidos em um ano. Hoje, 170% desses recursos seriam necessários para atender às necessidades da geração atual (OSD, 2017). Esse problema pode ter um impacto significativo se esse número continuar aumentando proporcionalmente ao crescimento populacional.

O próprio setor de construção é uma importante fonte de impactos ambientais na cadeia produtiva devido ao alto consumo de fontes não renováveis e alta demanda de energia. Pesquisas indicam que entre 40 e 75% do total de recursos naturais extraídos da natureza são utilizados para produção e manutenção do ambiente construído (BRIBIÁN; CAPILLA; USÓN, 2011; KEELER; BURKE, 2010; MATOS; WAGNER, 1998). Este setor também representa cerca de três bilhões de toneladas de resíduos anualmente (KEELER; BURKE, 2010). No contexto brasileiro, John e Agopyan (2000) apontam que resíduos de construção e demolição (RCD) podem ser mais expressivos em massa que os resíduos domésticos. Estima-se que o RCD atinja uma produção anual entre 220 e 670 kg hab<sup>-1</sup>, uma média de 510 kg hab<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> (JOHN; AGOPYAN, 2000). Além disso, de acordo com o Painel Internacional para as Alterações Climáticas (IPCC, 2014), áreas urbanas são responsáveis por cerca de 70-76% das emissões de CO<sub>2</sub> relacionadas com a consumos energéticos.

Considerando as demandas relacionadas ao crescimento populacional nas cidades, a necessidade de um desenvolvimento mais sustentável é iminente. Na agenda mundial, campanhas internacionais vêm disseminando esse ideal, como, por exemplo, a campanha para atingir os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Além de abordar de maneira objetiva as tendências dos processos de urbanização, esta campanha também assiste as particularidades do contexto geográfico, socioeconômicos, e níveis de desenvolvimento de cada país, bem como reconhece a importância das dimensões regionais e sub-regionais para a implementação das políticas de desenvolvimento sustentável (UN, 2015). Nos países em desenvolvimento, a falta de acesso às finanças do desenvolvimento e a ausência de cooperação multinível podem dificultar a implementação de tais metas.

No Brasil, por exemplo, o Estatuto Nacional da Cidade prevê o direito à cidade sustentável, entendida como o acesso à terra urbana, habitação, saneamento ambiental, infraestrutura e transporte, bem como ao serviço público, trabalho, lazer e produção industrial, para as gerações presentes e futuras (BRASIL, 2002). Uma lei de proteção ambiental também prevê uma avaliação de impacto ambiental para o licenciamento de atividades de mudanças ambientais. No entanto, toda a informação é qualitativa e deve ser gerada e financiada pelos empresários interessados, criando espaço para interpretações errôneas e irregularidades sobre as quais os órgãos reguladores não têm controle (FARIA, 2011). Igualmente, esse tipo de informação não pode gerar um banco de dados conciso para auxiliar a tomada de decisões sobre políticas ambientais.

Além de preocupações acerca do contexto político ou econômico, a maioria das campanhas e políticas estabelecem metas e indicadores, sem estratégias específicas para alcançá-los (UN, 2016). Devido à sua grande parcela de emissões nas atividades urbanas, as estratégias geralmente visam os sistemas de transporte de passageiros, por exemplo, incluindo melhorias nos dispositivos de economia de combustível e controle de emissões dos veículos, troca de combustível e mudança de modo da viagem pessoal de automóvel para o transporte público, transporte de bicicleta e / ou caminhada (CHESTER; CANO, 2016). No entanto, existem poucas avaliações sistemáticas sobre sua implementação, na medida em que as metas de redução de emissões estão sendo alcançadas ou as emissões são reduzidas (IPCC, 2014). Dessa maneira, visando um planejamento urbano integrado, reconhecendo as mudanças globais para construção sustentável e avanços tecnológicos, informações quantitativas confiáveis sobre impactos ambientais, sociais e econômicos devem ser produzidos para apoiar a tomada de decisões. Assim, como podemos criar informações confiáveis para um ambiente construído sustentável e resiliente?

O Pensamento do Ciclo de Vida (PCV) pode fornecer resultados quantitativos e qualitativos adequados a apoiar tomadas de decisão (LOISEAU *et al.*, 2013). Para Petit-Boix *et al.* (2017), a abordagem do ciclo de vida pode evitar o desequilíbrio nas relações de (a) espacialidade dos processos de um sistema; (b) entre os estágios do ciclo de vida, e (c) indicadores de impacto ambiental, social e econômico.

De acordo com a *Life Cycle Initiative (LC Initiative)*, o PCV indica que o sistema de produção de qualquer material tem elementos entrando e saindo do mesmo (UNEP/SETAC, 2012).

Essas entradas e saídas são energia e outros recursos naturais, sociais e econômicos. Também implica que o processo gera desperdício e impactos, positivos e negativos, em todas as etapas. Os principais objetivos da abordagem são reduzir o uso de recursos de um produto e as emissões para o meio ambiente, à medida que o desempenho social e socioeconômico aumenta ao longo de seu ciclo de vida (UNEP/SETAC, 2012). O propósito final do PCV é promover práticas sustentáveis, mas indicando que elas devem ser embasadas no conhecimento científico (UNEP/SETAC, 2005). Por meio de uma análise PCV, os tomadores de decisão são capazes de identificar e comparar alternativas com base nos inventários de ciclo de vida pré-estimados.

Para a aplicação do PCV na quantificação de impactos, a Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) é um instrumento amplamente aceito. Uma série de normas internacionais já regula a metodologia de ACV, de uma abordagem mais ampla - ISO 14040 (ABNT, 2009a, 2009b) -, para uma abordagem mais específica, como para avaliações de edifícios - série EN 15978 (CEN, 2011). Ainda assim, não há um padrão para o ACV na escala das cidades. Isso porque cidades e território são sistemas multifuncionais, abertos, dinâmicos e complexos. Além disso, estão inseridos em um contexto local específico (LOISEAU *et al.*, 2013; WIGGERING *et al.*, 2003), o que impacta a delimitação do estudo. Portanto, a falta de uma metodologia padronizada internacional unificada é compreensível.

O primeiro impasse é que o objetivo e as funções de um estudo de ACV nesse contexto só são definidos segundo a relação com as partes interessadas (em inglês chamados de *stakeholders*) (LOISEAU *et al.*, 2013). Alguns autores sugerem o uso de indicadores qualitativos e quantitativos e a normalização por comparação com outra referência territorial (LOISEAU *et al.*, 2013; LOTTEAU *et al.*, 2015). Para simplificar as abordagens, Lotteau, Yopez-Salmon e Salmon (2015) propuseram uma ferramenta de ACV para o ambiente construído na escala de vizinhança. No entanto, a Avaliação da Vizinhança para Territórios Sustentáveis (em inglês, *Neighborhood Evaluation for Sustainable Territories*, ou NEST) é, por exemplo, limitada a alguns indicadores ambientais (energia, CO<sub>2</sub>, perda de biodiversidade, resíduos, qualidade do ar e água) e socioeconômicos (satisfação do usuário e custos de investimento do projeto). Muitas outras ferramentas limitam os indicadores às emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE) e ao consumo de energia (HEINONEN; JUNNILA, 2011; HENDRICKSON; NIKOLIC; RAKAS, 2016; RAMASWAMI *et al.*, 2008).

Com a intenção de alcançar uma avaliação mais ampla do território, Loiseau *et al.* (2013) propuseram um quadro de ACV adaptado para a avaliação territorial. A metodologia projetada fornece uma abordagem global com os efeitos cumulativos das atividades do território, a identificação de impactos ambientais e a determinação das atividades mais prejudiciais, a fim de orientar a tomada de decisões. Os autores indicam a importância da alocação de impactos ambientais em várias escalas territoriais (locais, regionais e globais) (LOISEAU *et al.*, 2013). Contudo, até onde sabemos, poucos estudos de ACV sobre o transporte urbano (foco de muitas políticas urbanas por envolver conformidades do uso de energia) abrangem explicitamente essa particularidade de escopo.

Há ainda a necessidade de produzir conteúdo replicável para permitir que os planejadores urbanos utilizem ACV como base para a geração de novas diretrizes do planejamento urbano sustentável. Além disso, ainda existe número limitado de estudos sobre ACV da América Latina e do Brasil publicados em periódicos internacionais. Essa lacuna implica que uma ampla gama de contextos socioeconômicos, culturais e tecnológicos não esteja considerada na literatura. Na maioria desses territórios, as restrições de investimentos locais em infraestrutura de mobilidade urbana, como metrô e trens, e a baixa expectativa de retorno do investimento, limitam as melhorias no desempenho ambiental do serviço. Sendo assim, esta pesquisa propõe auxiliar na identificação de estratégias de intervenção para reduzir os impactos ambientais e na comparação de cenários de tomada de decisão no âmbito organizacional público urbano através de uma diretriz baseada no uso da metodologia da ACV.

## 1.2 OBJETIVOS DA PESQUISA

O objetivo geral desta pesquisa é definir o perfil ambiental, atual e futuro, do sistema coletivo de transporte público de Porto Alegre contemplando especificidades do contexto urbano e diferentes cenários de políticas públicas através da ACV Territorial.

Os objetivos específicos são:

- 1) Investigar as particularidades da metodologia de ACV aplicada à análise de cidades e sistemas urbanos, incluindo, nomeadamente: as definições de objetivo e escopo e de unidade de equivalência de sistemas; escolha de ferramentas complementares; métodos e indicadores de caracterização de impacto, entre outras;

- 2) Definir as variáveis do sistema e suas relações condicionantes através de entrevista junto ao órgão de regulação de transporte e circulação;
- 3) Definir o objetivo e escopo da ACV, bem como cenários futuros de mudanças do sistema, a partir do contexto socioeconômico e políticas públicas;
- 4) Definir o perfil de emissões de combustível, dos veículos, e do sistema considerando os parâmetros simulados;
- 5) Avaliar os impactos ambientais futuros de tomada de decisões no âmbito de políticas públicas do estudo de caso, assumindo possíveis mudanças no uso desse sistema de transporte;
- 6) Analisar quais e como as especificidades do método de ACV Territorial afetam a análise dos resultados.

### 1.3 DELIMITAÇÕES

A pesquisa utiliza ferramentas e escolhas de modelagem a partir de métodos existentes, encontrados na revisão de literatura e adaptados à disponibilidade e contexto de dados do Brasil, considerando as particularidades advindas das condições socioeconômicas e geopolíticas do território. O desenvolvimento de novas ferramentas está fora do escopo da pesquisa.

Da mesma maneira, o trabalho visa investigar instrumentos de planejamento urbano e políticas públicas, infraestrutura e tecnologia já existentes no contexto geográfico e de mercado identificadas durante a revisão de literatura e em entrevista, visando garantir a compreensão dos tomadores de decisão sobre as potenciais reduções de impactos ambientais com poucas, porém efetivas mudanças no sistema. Foge do escopo desta pesquisa propor mudanças que não estejam previstas pelo poder público em curto prazo, seja por razões culturais ou financeiras.

A fim de criar e testar a proposta, esta pesquisa adota a abordagem de estudo de caso, aplicado à cidade de Porto Alegre, no Rio Grande do Sul, Brasil. Conseqüentemente, o escopo é limitado ao contexto das políticas urbanas brasileiras e, em particular, dessa cidade. No entanto, a escolha da ferramenta, metodologia e indicadores é projetada para ser aplicada em

outros lugares, enquanto as adaptações apropriadas podem ser realizadas segundo as observações finais feitas na seção de Discussão (Capítulo 5) desta pesquisa.

#### 1.4 ESTRUTURA DO TRABALHO

Focada na criação de uma contribuição significativa para os principais tópicos da avaliação do ciclo de vida urbano, esta pesquisa segue um programa composto por uma revisão literária exploratória inicial sobre o tema ACV para sistemas urbanos– a fim de contemplar o primeiro objetivo específico desta pesquisa, seguida de um Estudo de Caso – a fim de contemplar os demais objetivos desta pesquisa Assim, os capítulos se dividem da seguinte maneira:

O primeiro capítulo apresenta o embasamento e a motivação para o tema de pesquisa proposto. As premissas da pesquisa são expostas: o problema de pesquisa, objetivos e escopo e limites de pesquisa.

O segundo capítulo contém o estudo das diretrizes metodológicas da ACV. Uma revisão exploratória de literatura é utilizada para identificar as abordagens utilizadas para ACV urbanas. A revisão gerou uma série de análises das ferramentas de pesquisa e das escolhas metodológicas. Os resultados da revisão são discutidos. Ao final, a metodologia adaptada de ACV para territórios, considerada a mais detalhada dentre as disponíveis na literatura, é descrita.

O terceiro capítulo estabelece o método de pesquisa. O texto discute os métodos e ferramentas auxiliares utilizadas em cada etapa da ACV do estudo de caso. A escolha do estudo de caso é justificada e o contexto da cidade é exibido.

No quarto capítulo, as definições da etapa de objetivo e escopo da ACV Territorial são descritas, incluindo: contexto (diagnóstico e prognóstico); objetivo; fronteira tecnológica; funções e unidade funcional; fonte de dados e qualidade; cenários; alocação. Da mesma maneira, são descritos os dados primários e secundários utilizados, e, na sequência, o método de avaliação de impactos ambientais. Os resultados da avaliação são apresentados e discutidos. Os resultados são analisados de maneira a identificar os impactos de cenários alternativos atuais e existentes em função das variáveis relevantes na contribuição dos impactos no sistema escolhido.

O capítulo cinco propõe uma revisão crítica dos resultados de todas as etapas da pesquisa, a fim de concluir sobre a adequação das escolhas de modelagem da ACV no processamento de cenários de impacto ambiental para o desenvolvimento urbano no contexto do sistema de transporte coletivo de Porto Alegre. O último capítulo traz as conclusões e considerações finais sobre os resultados desta pesquisa e sugestões para trabalhos futuros.



## 2 AVALIAÇÃO DO CICLO DE VIDA

A metodologia de ACV possui abordagem regulatória definida pela série de normas internacionais NBR ISO 14040, que pode ser aplicada a qualquer estudo de ACV, mas é principalmente focada em sistemas de produtos e serviços. De acordo com as diretrizes da NBR ISO 14040, os estudos de ACV são exibidos em quatro fases iterativas: definição de objetivo e escopo; Inventário de Ciclo de Vida (ICV); Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV); e Interpretação. A profundidade de detalhes e o período de tempo de um estudo de ACV são escolhas dos pesquisadores. Elas podem variar dependendo da definição do objetivo e escopo (ABNT, 2009a).

Dentro do setor da construção, a série EN 15978 (CEN, 2011) detalha os princípios, requisitos e diretrizes para avaliação de sustentabilidade em edifícios - uma adaptação da norma internacional de ACV para edificações. As principais diferenças entre as avaliações de edifícios para avaliações de produtos são as características de desempenho do objeto de estudo. Portanto, uma atenção especial deve ser dada ao escopo e definições de objetivos do estudo, especialmente às suas limitações (CEN, 2011).

Nas avaliações de edifícios, o equivalente funcional representa as características técnicas e funcionalidades necessárias ao desempenho do edifício ou de seus sistemas (CEN, 2011). Além de um produto com design funcional, os edifícios são compostos por sistemas, compostos por sua vez de componentes. Para um estudo de ACV de determinado edifício, esses componentes ou sistemas podem ter uma grande variedade de combinações, desde que as características técnicas e as funcionalidades exigidas sejam equivalentes quando comparados.

Os estudos sobre a complexidade da ACV de edifícios são considerados recentes. Assim, é compreensível que as associações de normatização ainda não tenham desenvolvido normas para sistemas mais complexos, como cidades e bairros. Ainda assim, já existem esforços científicos para o desenvolvimento de guias para sua aplicação. A seguir, uma análise das metodologias de ACV em escala urbana encontradas na literatura é apresentada, fornecendo uma síntese de ferramentas e opções de avaliação utilizadas em pesquisas em todo o mundo.

## 2.1 ACV APLICADA A CIDADES E SISTEMAS URBANOS

A fim de entender as características de modelagem de estudo que aplicam ACV ao contexto de sistemas urbanos, uma revisão de literatura exploratória foi realizada no mês de Janeiro de 2018. A pesquisa foi desenvolvida de forma que incluísse termos comumente relacionados à ACV em escala urbana: PCV; Economia Circular (EC); cidades sustentáveis e cidades inteligentes. Duas bases de dados foram consultadas, uma nacional (Periódicos Capes) e outra internacional (*Scopus*), buscando compreender pesquisas na língua inglesa e portuguesa. Foram consultados apenas artigos científicos publicados em periódicos ou anais de congressos.

Os resultados foram filtrados por título e resumo, de acordo com a sua relevância para o objetivo desta pesquisa. Os critérios de inclusão são:

- a) que o artigo esteja relacionado à metodologia e ferramentas PCV ou ACV e a cidades ou planejamento urbano,
- b) que podem conter análises qualitativas ou quantitativas,
- c) que podem conter análises teóricas ou empíricas,
- d) pesquisas de 2007-2017 publicadas como artigos (de periódicos ou conferências).

É importante destacar que os resultados são limitados à escolha de termos utilizados na pesquisa, bem como à escolha de bancos de dados da literatura e às opções de filtragem. As limitações foram consideradas parte do processo, não comprometendo a análise pretendida.

Mais de 64 artigos científicos foram encontrados nos campos da ACV aplicada ao planejamento urbano e cidades sustentáveis. Destes artigos, foram extraídas e resumidas as seguintes informações: a concentração geográfica e escala territorial; número de estudos sobre cada tópico; o foco de pesquisa segundo o objetivo de pesquisa; a ferramenta ACV utilizada; os métodos de impacto utilizados para a categorização na etapa de AICV; e as unidades funcionais de medida dos impactos; e classificação de dados de inventário.

Uma série de temas de domínio urbano já foi avaliada segundo a perspectiva de ACV: agricultura urbana, edifícios, energia, áreas verdes, uso da terra, mobilidade, infraestrutura civil, gestão urbana, gestão de resíduos, e tratamento de esgoto. Os trabalhos que abordam a

avaliação de impacto de cidades inteiras, visando a criação de indicadores para futuras mudanças de gestão, ou que considerem características urbanísticas para análise de cenários, são classificados neste resumo como estudos de gestão urbana. Já a infraestrutura civil considera a construção de infraestruturas urbanas, como calçadas, viadutos, entre outros. Água, esgoto, energia e outras classificações representam os estudos que estão focados no próprio sistema destes serviços, incluindo ou não a infraestrutura necessária para o processo de produção na avaliação. Alguns dos trabalhos analisaram os serviços e a infraestrutura das cidades como um sistema integrado, avaliando vários tópicos de uma só vez.

A maioria dos artigos utilizou uma cidade ou sistema de estudo de caso, mas com objetivos diferentes. Os objetivos dos estudos foram classificados como:

- Revisão de literatura: trabalhos em que os autores exploraram as metodologias da PCV por meio de revisão da bibliografia, independentemente da metodologia utilizada para a revisão;
- Nova metodologia ou ferramenta: trabalhos em que os autores utilizaram a ferramenta ACV, propondo uma adição ou uma adaptação da mesma;
- Estudo de caso - Exploratório: trabalhos em que os autores não propuseram alterações na metodologia e simplesmente aplicaram a ferramenta a uma cidade de estudo de caso ou cenário de desenvolvimento;
- Estudo de caso - Comparação: trabalhos que propõem investigar diferentes tecnologias ou métodos por meio de uma comparação;
- Geração de diretrizes para tomada de decisão: trabalhos nos quais os autores pretendiam criar novas diretrizes de gerenciamento e políticas.

As abordagens bibliográficas também são revisadas de acordo com alguns parâmetros-chave da ACV normatizada, a fim de criar discussões sobre: as ferramentas metodológicas aplicadas; os métodos de caracterização do impacto utilizados na avaliação de impacto na terceira fase da ACV; bem como os indicadores, ou categorias de impacto, escolhidos como índices para desenvolvimento sustentável. A relação entre a análise qualitativa ou quantitativa, os indicadores escolhidos e as ferramentas aplicadas são demonstradas.

### 2.1.1 Concentração e escala geográfica

A Figura 1 apresenta a intensidade geográfica dos estudos selecionados. Os estudos europeus são a maioria, seguidos pelos asiáticos e norte-americanos. Estudos nas américas concentraram-se apenas nos Estados Unidos da América (EUA). A figura também mostra um baixo número de estudos no território africano. Como esperado, a maioria dos estudos abrange a escala territorial das cidades. No entanto, os estudos abordam diferentes escalas do território: continental; país; regiões ou áreas metropolitanas; cidades; áreas urbanas, suburbanas, periurbanas ou bairros. Algumas avaliações realizadas nos EUA, por exemplo, abrangem grandes metrópoles (áreas metropolitanas), como as áreas de Los Angeles e São Francisco (CHESTER *et al.*, 2013; HENDRICKSON; NIKOLIC; RAKAS, 2016). Da perspectiva de vizinhança em uma área periurbana na França, Lotteau *et al.* (2015) apresentam uma ferramenta para planejamento de bairros baseada em ACV. Por outro lado, países e territórios em escalas continentais também foram avaliados, com o objetivo de propor diretrizes para políticas de desenvolvimento sustentável (LAZAREVIC; BUCLET; BRANDT, 2012; MANFREDI; PANT, 2013). Os resultados mostram, ainda, que os estudos de escala urbana baseados em ACV não estão restritos aos limites geográficos das cidades.

Figura 1 - Concentração geográfica dos estudos e número de artigos científicos por país.



Fonte: elaborado pelo autor.

### 2.1.2 Temas abordados

A Figura 2 apresenta um resumo dos resultados para o número de artigos por tema e foco, ou objetivo de pesquisa. A relação entre títulos e classificação, além da classificação de escala geográfica e uma breve descrição sobre os trabalhos científicos, é apresentada na tabela do Apêndice A.

A gestão urbana, os resíduos e a mobilidade foram os temas mais estudados no período contemplado por esta revisão (2007-2017). Entre os tópicos propostos e identificados, um maior número de trabalhos está relacionado à gestão urbana, abordando desde a revisão da literatura até a geração de diretrizes.

Com a intenção de alcançar uma avaliação mais ampla do escopo, alguns autores combinaram as ferramentas do PCV com outras metodologias, como EC (FANG *et al.*, 2017; RAMASWAMI *et al.*, 2012). Conforme definido pelo relatório de CIRAIG (2015), a EC é sistêmica, fechada, restauradora, livre de resíduos, baseada na eficácia. O principal princípio é transformar a economia linear, baseada em resíduos, em um sistema econômico regenerativo, maximizando os potenciais dos recursos naturais (Esa; Halog; Rigamonti, 2017). Fang *et al.* (2017), Geng *et al.* (2009) e Liu *et al.* (2012) utilizaram a EC para analisar a sustentabilidade nas cidades chinesas. Enquanto Fang *et al.* (2017) utilizaram um modelo híbrido para avaliar a pegada ecológica da cidade de Guiyang, Geng *et al.* (2009) analisaram a aplicação do conceito de EC nas políticas de administração da cidade de Dalian. Liu *et al.* (2012) propuseram uma análise evolutiva do cenário do construtivismo na Área Piloto da Economia Circular de Qaidam.

A ferramenta de ACV também foi aplicada na pesquisa de gestão urbana. Säynäjoki *et al.* (2015) aplicaram a ACV a uma análise baseada no consumo e na utilização de recursos em várias cidades finlandesas. Roldán-Fontana *et al.* (2015) avaliaram as emissões de CO<sub>2</sub> e consumo de energia de seis tipologias de habitações e da infraestrutura necessária para o funcionamento das mesmas, em Granada, Espanha. Salvati e Carlucci (2016) usaram a teoria do ciclo de vida urbano (do inglês, *urban lifecycle*, ou ULC) para estudar o crescimento populacional e a redistribuição ao longo do gradiente urbano em Roma, Itália. Finalmente, Slagstad e Brattebo (2013) usaram a ACV para avaliar água, esgoto e resíduos em novos assentamentos urbanos na Noruega.

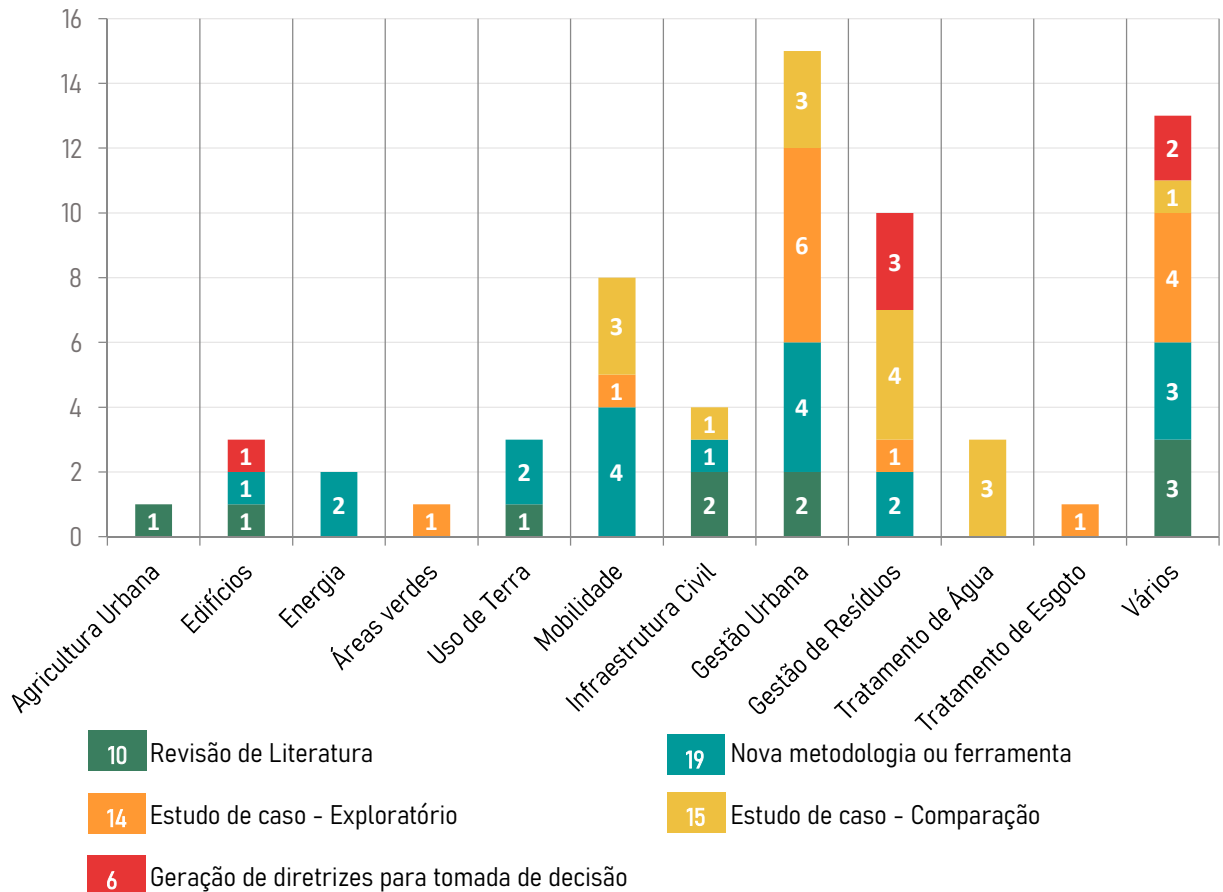
Os tópicos menos observados foram agricultura urbana, uso da terra e áreas verdes urbanas. Apenas um estudo foi encontrado sobre o tratamento e distribuição de água (JEONG et al., 2016), porém duas outras avaliações foram encontradas em todo o ciclo da água, incluindo sistemas de tratamento de água e esgoto (EL-SAYED MOHAMED MAHGOUB et al., 2010; LANE; DE HAAS; LANT, 2015). A única pesquisa relacionada à agricultura urbana encontrada neste trabalho é uma revisão da literatura relacionada ao PCV. Na análise do uso da terra, Chen *et al.* (2016) determinaram a viabilidade de redesenvolvimento sustentável relevante aos diferentes cenários de reutilização de terras com uma abordagem híbrida na China, enquanto Hou *et al.* (2018) desenvolveram uma avaliação do potencial de redução de GEE por redesenvolvimento de terrenos desocupados em São Francisco. Breure *et al.* (2018) apresentaram a abordagem de avaliação do uso da terra e seu impacto com base no conceito de EC a partir de revisão da literatura. Apenas um artigo foi encontrado sobre o tema das áreas verdes em espaços urbanos que consideravam o PCV para avaliar a pegada de carbono para o desempenho ambiental de longo prazo dos espaços verdes urbanos (STROHBACH; ARNOLD; HAASE, 2012).

Um grande número de pesquisas objetiva introduzir novas metodologias baseadas no PCV, ACV e EC para melhorar a sustentabilidade - desempenho ambiental, econômico e/ou social - dos serviços, infraestrutura, consumo e produção de bens em diferentes cidades. Estas pesquisas têm sido aplicadas em um ou mais estudos de caso para testar sua eficiência e promover resultados. Sete dos artigos encontrados abordam vários tópicos em uma visão mais ampla dos serviços e infraestrutura das cidades. Entre eles, ferramentas inovadoras baseadas em ACV são propostas. A Avaliação de Vizinhança para Territórios Sustentáveis (do inglês, *Neighborhood Evaluation for Sustainable Territories*, ou, NEST) é um *PlugIn* para o *Trimble SketchUp* para um projeto de estágio inicial de vizinhança sustentável (LOTTEAU; YEPEZ-SALMON; SALMON, 2015). A ferramenta de sistemas socio-ecológicos-infraestruturais (do inglês, *social-ecological-infrastructural systems*, ou, SEIS), combina o metabolismo urbano (MU) e ACV em um estudo interdisciplinar da avaliação de sistemas urbanos sustentáveis (RAMASWAMI *et al.*, 2012).

Poucos artigos encontrados estão baseados na geração de diretrizes para cidades e sistemas urbanos mais sustentáveis. Estas estão principalmente relacionadas ao gerenciamento de resíduos e energia. Lazarevic *et al.* (2012) e Manfredi e Pant (2013) usam as abordagens do PCV e ACV para propor novas metodologias para o gerenciamento de resíduos urbanos.

Tunesi *et al.* (2016) executaram a ACV do gerenciamento integrado de resíduos, em uma revisão de literatura sobre sistemas de gestão de resíduos e energia em Bolonha, Itália, enquanto Pan *et al.* (2014) propuseram estratégias para a implementação baseada na EC usando tecnologias de transformação de resíduo-para-energia (do inglês, *waste-to-energy technologies*), e outras técnicas de gestão de resíduos e energia.

Figura 2 - Distribuição de trabalhos científicos de acordo com a classificação por temas e foco de pesquisa.



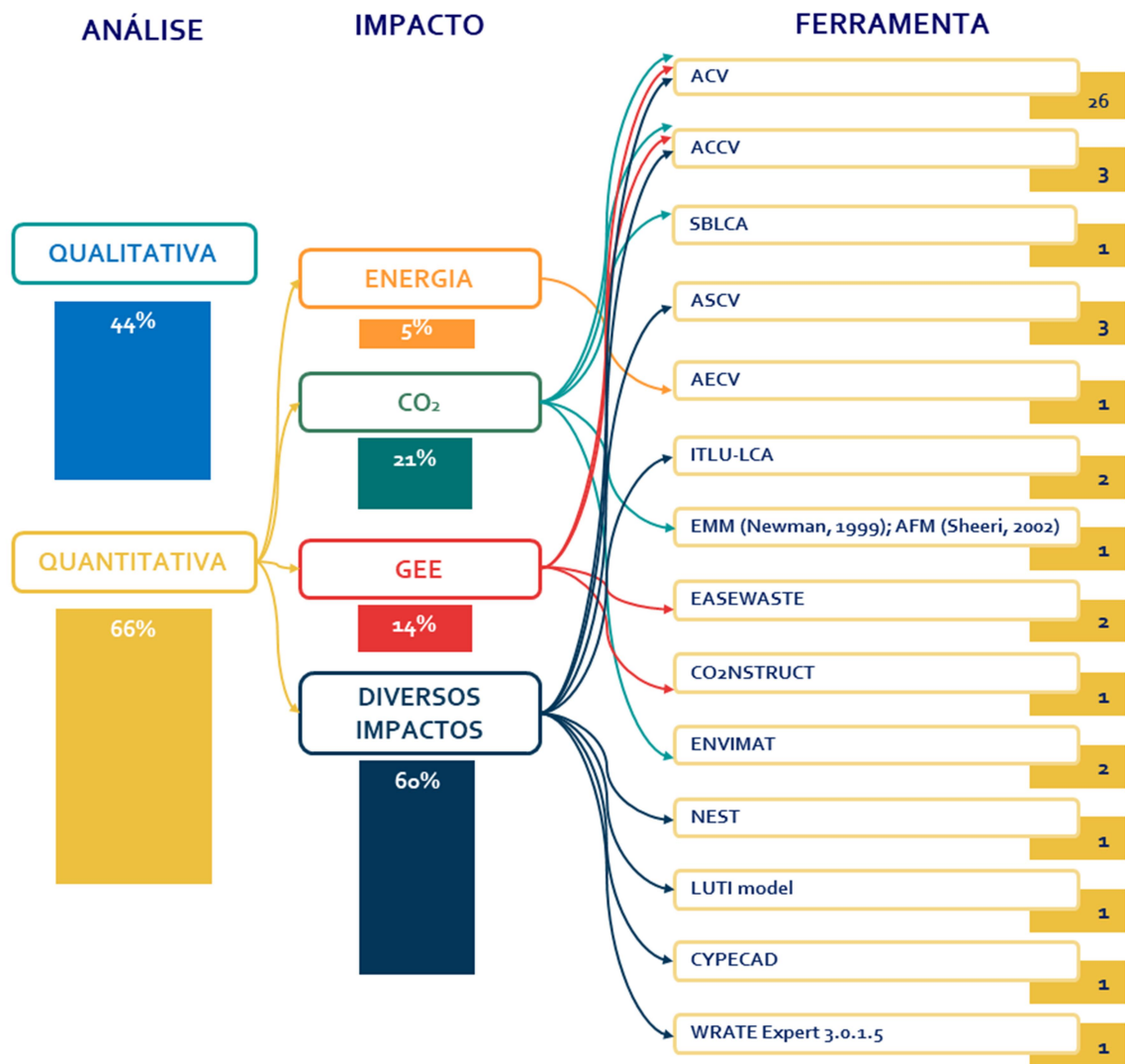
Fonte: elaborado pelo autor.

### 2.1.3 Métodos e indicadores de caracterização de impacto

Os resultados da avaliação de impacto do ciclo de vida, aqui denominados indicadores, utilizados nas pesquisas, são analisados. Os indicadores são classificados pela unidade de medida de impacto, ou categoria de impacto, e pelo método de caracterização do impacto utilizado para obter os resultados. A Figura 3 mostra que a maioria dos artigos (66%) aplicou resultados quantitativos, enquanto 34% foram estudos qualitativos. Dos 42 estudos quantitativos, 35% são avaliações de CO<sub>2</sub> ou GEE, 5% expressam consumo de energia e 60% usam mais de uma categoria de impacto. Além disso, 76% utilizaram o valor do impacto de

ponto médio (do inglês, *midpoint*) como resultado final, enquanto outros 24% preferiram expressá-lo como um valor normalizado, ou seja, kg CO<sub>2</sub>-eq. por pessoa ao ano (SLAGSTAD; BRATTEBØ, 2013) ou como impactos para milha viajada por passageiro (em inglês, PMT) por modal (CHESTER et al., 2013), de acordo com os objetivos da pesquisa.

Figura 3 - Proporção (em %) de (a) escolha de método de análise (qualitativa ou quantitativa); (b) indicadores de impacto mais utilizados (classificados entre, CO<sub>2</sub> – quando não foram especificadas inclusões de demais gases equivalentes -, GEE, ou vários categorias de impacto sobre caracterização em *midpoint* ou *endpoint*); (c) correlação de escolha entre indicadores e as ferramentas utilizadas.



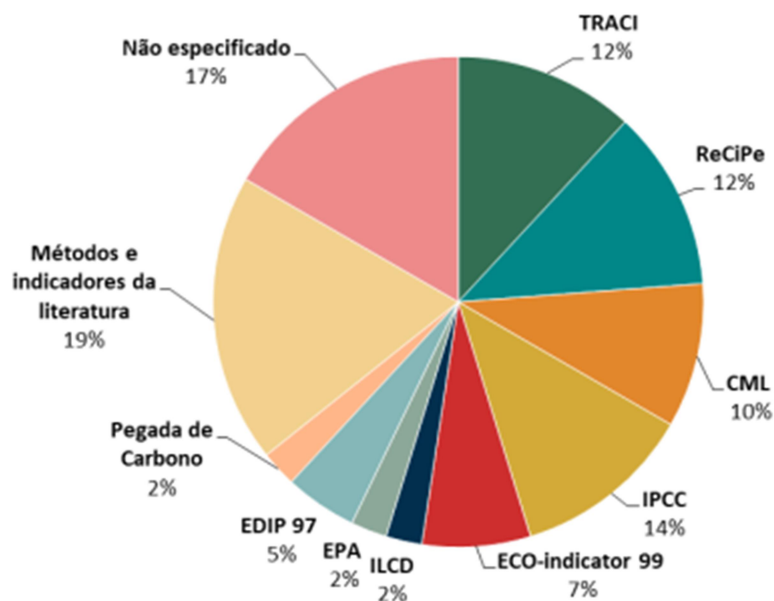
Fonte: elaborado pelo autor.



Considerando que os tomadores de decisão estão envolvidos na escolha dos indicadores, e a seleção do método de avaliação depende do especialista em ACV, é apresentada uma correlação da escolha de ferramentas para a análise quantitativa. A Figura 3 mostra que as ferramentas padronizadas, ou seja, aquelas que seguem um padrão internacional (por exemplo, ACV segundo a norma ISO 14040), são preferidas para a maioria das avaliações de impacto. Outras ferramentas, principalmente inspiradas na metodologia ACV (por exemplo, ITLU e ENVIMAT), são preferidas quando mais de uma categoria de impacto é considerada. Esse resultado indica que, de fato, as ferramentas padronizadas não compreendem a complexidade ou as particularidades dos sistemas e planejamento urbano das cidades.

Cerca de um terço dos artigos de ACV usaram métodos de caracterização de impacto baseados na literatura ou nenhum método de avaliação de impacto especificado (usualmente, utilizando apenas dados de emissões), e a maioria desses artigos trata do planejamento e gestão urbanos. A **Erro! Autoreferência de indicador não válida.** mostra que 55% dos artigos utilizam métodos comuns de avaliação da ACV: IPCC, TRACI, ReCiPe, CML e ECO-indicator 99.

Figura 4 - Participação (em %) dos métodos de caracterização de impacto do ciclo de vida nas escolhas de abordagem para a ACV.



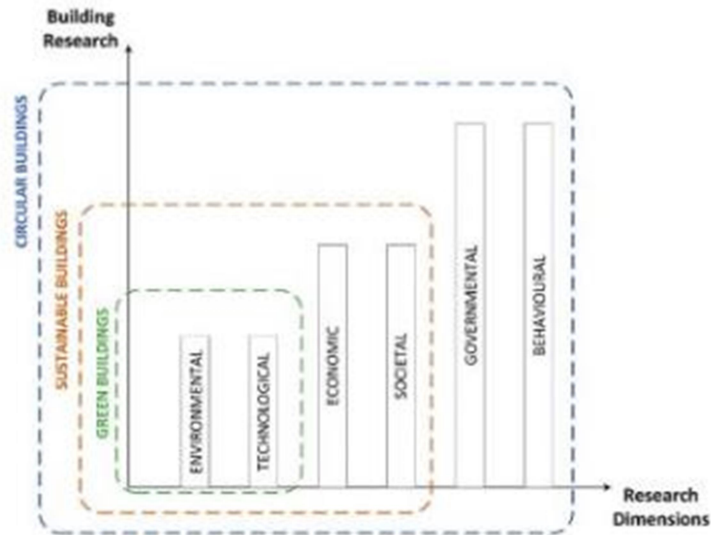
Fonte: elaborado pelo autor.

#### 2.1.4 Discussão

A análise da literatura apresentou as características dos estudos sobre ACV, e conceitos relacionados (PCV e EC), a fim de encontrar bases científicas para estruturar a avaliação do ciclo de vida de cidades e sistemas urbanos. O crescente número de pesquisas nos últimos anos confirma que os esforços internacionais para o desenvolvimento sustentável através da formulação de políticas são importantes e estão atualmente em desenvolvimento. Não coincidentemente, as regiões que apresentaram maior número de estudos (Figura 1) são Europa, China e EUA. A EC foi adotada pela primeira vez como lei em seus termos na China em 2008 (CIRAIG, 2015; GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). O país também é responsável pelo maior número de estudos de casos encontrados na literatura sobre o tema (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016). De fato, as ações são bem fundamentadas, devido ao rápido e contínuo desenvolvimento econômico da China, que já causou danos ambientais e à saúde humana e social (FANG et al., 2017), servindo como um exemplo para outras nações. Além disso, a EC também é o foco de um plano de ação europeu (Comissão Europeia, 2015, *apud* PETIT-BOIX; LEIPOLD, 2018) e ações europeias já utilizam padrões baseados em ACV para Pegadas Ambientais de Produtos, entre outras organizações focalizadas (ALBERTÍ et al., 2017).

Com base nos objetivos da pesquisa de sustentabilidade, Pomponi e Moncaster (2017) propuseram uma estrutura transdisciplinar de “seis pilares” para a economia circular aplicada ao ambiente construído. A estrutura baseia-se na evolução da pesquisa do ambiente construído, desde construções verdes até edifícios sustentáveis e, finalmente, construções circulares. A estrutura implica o uso de métodos diferentes para avaliar cada dimensão de pesquisa (Figura 5). Alguns estudos (GHISELLINI; CIALANI; ULGIATI, 2016; HAUPT; ZSCHOKKE, 2017; IACOVIDOU et al., 2017; POMPONI; MONCASTER, 2017), como muitos simpósios e fórum, discutem essa abordagem e que ferramentas do PCV (por exemplo, ACV, análise LCC e MFA) podem ser adequadas para a criação de uma economia circular no ambiente construído, particularmente pela viabilidade de apoiar a tomada de decisão em diferentes contextos e escalas (IACOVIDOU et al., 2017).

Figura 5- Evolução e dimensões de pesquisa do ambiente construído



Fonte: POMPONI; MONCASTER (2017, fig. 4).

O estudo sobre concentração geográfica da literatura revisada ainda demonstra a falta de estudos em regiões da América Latina, na África, e parte da Ásia. A falta de estudos nestas regiões, captados por esta revisão, significa não apenas uma lacuna científica, mas um “ponto cego” da compreensão da aplicabilidade do método nestes diferentes contextos sócio-econômico-culturais. Não é possível aferir, contudo, qual a razão exata desta lacuna, uma vez que pode se tratar da falta de incentivos para pesquisas ou políticas na área, bem como pode se tratar da falta de dados, a exemplo da falta de dados a serem utilizados para a avaliação de 38 dos 244 indicadores dos ODS no Brasil (IBGE, 2018b).

Uma discussão importante é trazida por Alberti et al. (2017) sobre a definição dos termos “ambiente construído”, “cidades” e “urbano”, que de fato poderiam criar divergências entre as avaliações. Nesse sentido, projetos em escala nacional / continental, como aqueles baseados em acordos internacionais (por exemplo, Comissão Europeia), que geram metas para políticas em nível regional e local, foram mantidos nesta revisão quando apresentaram pesquisas sobre sustentabilidade para políticas urbanas. O estudo das escalas territoriais demonstra que a aplicabilidade da ACV pensada para políticas urbana abrange não apenas os limites físicos, geográficos ou administrativos das cidades. Estudos direcionados à avaliação do impacto urbano compartilham decisões tomadas em diferentes níveis organizacionais, e envolvendo

órgãos públicos e privados. Portanto, diferentes estudos de escala territorial não são apenas justificados, mas necessários para avaliar o efeito de políticas em diferentes escalas territoriais.

Estudos de ACV urbana envolvem sistemas multifuncionais, dinâmicos e complexos, como demonstrados na literatura. Além disso, um sistema de serviço está inserido em um contexto local específico (LOISEAU et al., 2013; WIGGERING et al., 2003). Essas características dificultam a definição de algumas escolhas de ACV no método tradicional (discutidos no início do Capítulo 2), como, por exemplo, a unidade funcional e o limite do sistema. Devido à sua complexidade, a maioria dos estudos existentes está focada em encontrar alternativas para sistemas específicos de cidades, por exemplo, transporte e tratamento de água (PETIT-BOIX et al., 2017).

Entre os métodos de pesquisa, não há consenso na literatura sobre qual método deve ser utilizado para avaliar os impactos das cidades, seja sobre o escopo, dados de inventário ou indicadores de sustentabilidade, ao realizar uma análise de território ou cidade. Do ponto de vista das políticas existentes, Alberti e seus colegas discutiram pontos chave para as definições de uma ACV de cidades (ALBERTÍ et al., 2017, 2019a, 2019b). Os autores revisaram os métodos baseados no ciclo de vida no setor de construção, os métodos de avaliação de sustentabilidade aplicados a sistemas complexos, bem como os índices existentes, concluindo que os critérios mais adequados são os baseados em Avaliação de Sustentabilidade do Ciclo de Vida (ASCV) para as cidades. Eles destacam que, seguindo a hierarquia do ambiente construído, a complexidade do elemento é aumentada. Porém, as avaliações existentes parecem refletir o mesmo padrão inicialmente pensado para produtos. Contudo, estudos de ACV dos edifícios indicam que, por exemplo, o tempo do estudo e a vida útil exigida dos edifícios, de seus sistemas e componentes (CEN, 2011) criam incertezas para estimar cenários de operação e manutenção, bem como cenários de fim de vida e reciclagem (MORAGA, 2017), diferentemente de estudos voltados para produtos.

Diferentes sistemas urbanos ou áreas de estudo, então, exigem definições específicas de modelagem, como unidades funcionais e avaliação de impacto, devido a demandas de desempenho geográficas, setoriais e específicas relacionadas (WEIDEMA, 2014). Percebe-se que, conforme a complexidade dos sistemas estudados aumenta, como entre produtos, edifícios, serviços e cidades como um todo, aumenta igualmente a complexidade da primeira

etapa da ACV. Em ACVs de produtos, de maneira geral, a etapa de uma ACV que ocupa maior tempo de dedicação de estudo é a parte de inventário, dado o nível de detalhamento (VIANA, 2008). Com diminuição do nível de detalhamento do inventário, a parte da ACV territorial que passa a inferir maiores sensibilidades ou incertezas ao estudo é a etapa de definições de objetivo, escopo e cenários futuros, já que a complexidade do inventário se traduz também na análise mais aprofundada do contexto onde se insere o sistema de serviço ou cidade (HEINONEN et al., 2013a; LOISEAU et al., 2013).

Uma estratégia possível para agregar variáveis de contexto à análise é o uso de modelagem de sistemas baseadas em agentes. Querini e Benetto (2015) identificaram que o comportamento humano é intrínseco aos cálculos das consequências dos sistemas de mobilidade e sugerem o uso da modelagem baseada em agente (do inglês, *Agent-Based Modelling*, ABM). O ABM é caracterizado pelo estudo descentralizado de entidades autônomas chamadas agentes, que atuam no ambiente do sistema analisado e são motivados por um conjunto de tendências. Mais recentemente, Baustert *et al.* (2019), indicam que estudos de políticas voltadas para transporte deveriam ser apoiadas pela modelagem de demanda de viagens com base em atividades (do inglês, *activity-based travel demand modeling*). Ambos os métodos de modelagem permitem gerar padrões de atividades individuais, levando em consideração as restrições de tempo e espaço, bem como as relações entre atividades e viagens para cada indivíduo, além da modelagem econômica e de padrões de escolhas.

Loiseau *et al.* (2013) propõe um quadro de ACV adaptado para uma avaliação territorial. A metodologia projetada fornece uma abordagem global com os efeitos cumulativos das atividades do território, a identificação de impactos ambientais e a determinação das atividades mais prejudiciais, a fim de orientar a tomada de decisões. Estes autores indicam a importância da alocação de impactos ambientais em várias escalas territoriais (loais, regionais e globais) (LOISEAU et al., 2013). As categorias de impacto escolhidas, segundo eles, também devem estar relacionadas com a escala territorial para alocação de impactos. A alocação baseada em categorias proposta por Alberti *et al.* (2019b) compartilha as responsabilidades do produtor e do consumidor de acordo com a diferenciação dos impactos globais, regionais e locais. No entanto, a discussão da alocação ainda não deliberou se o impacto local dos serviços terciários que ocorrem nas cidades vizinhas deve ser alocado para o “produtor” ou “consumidor”, por exemplo, em serviços de tratamento de resíduos.

A disponibilidade de dados, no entanto, é outra questão relevante. Conforme descrito por Loiseau *et al.* (2013), a complexidade do sistema pode dificultar a compilação de dados. Segundo os resultados da revisão, pode-se usar um dado baseado no processo, ou um banco de dados local ou nacional econômico de entrada-saída (LOISEAU *et al.*, 2013). Alguns autores na literatura optam por usar um inventário de banco de dados híbrido, misturando os dois bancos de dados econômicos de fluxo de material (BERGESEN *et al.*, 2017; FANG *et al.*, 2017; HENDRICKSON; NIKOLIC; RAKAS, 2016). A avaliação baseada em processos é mais precisa, mas depende da capacidade de acessar dados específicos, que muitos subsetores não possuem (LOISEAU *et al.*, 2013). Além disso, a avaliação baseada em processos para uma análise em larga escala consome muito tempo. Por outro lado, a avaliação baseada em dados econômicos (*input-output*) (HEINONEN *et al.*, 2013b, 2013a), embora seja dependente do tempo, pode cobrir a carência de dados dos países em desenvolvimento, onde conjunto de dados de ICV não estão amplamente disponíveis. Assim, uma avaliação híbrida se ajustaria ao propósito de políticas para sustentabilidade de longo prazo para qualquer método de impacto escolhido.

Deste modo, a melhor abordagem provavelmente seria a que melhor se adequasse ao contexto político, social e cultural de cada país ou estado - com base nos principais regulamentos. Além disso, alguns autores sustentam que as características urbanas (ex., expansão urbana) são fundamentais para as avaliações das cidades com perspectiva de ciclo de vida (HEINONEN; JUNNILA, 2011; LOISEAU *et al.*, 2013; NORMAN; MACLEAN; KENNEDY, 2006; PETIT-BOIX *et al.*, 2017). As especificidades de cada estudo de caso devem ser avaliadas e discutidas pelos pesquisadores em conjunto com as partes interessadas. O objetivo e as funções de um estudo de ACV nesse contexto, por exemplo, deveriam ser determinados pelas partes interessadas (ALBERTÍ *et al.*, 2019b; LOISEAU *et al.*, 2013) ou mesmo por uma avaliação da percepção das mesmas. Quanto ao escopo e avaliação de impacto, alguns autores sugerem o uso de indicadores, qualitativos e quantitativos, e a realização de normalização por comparação com outra referência territorial (LOISEAU *et al.*, 2013; LOTTEAU; YEPEZ-SALMON; SALMON, 2015). Em relação aos indicadores, para fins de comparação, é necessário um indicador padronizado unificado de múltiplos impactos (ALBERTÍ; BRODHAG; FULLANA-I-PALMER, 2019). Indicadores dos ODS da ONU, ou da NBR ISO 37120 (ABNT, 2017), podem ser considerados.

Devido à relativa novidade do tema e a aspiração demonstrada pela comunidade científica em alcançar uma metodologia ampla e replicável, pouca robustez metodológica é encontrada na literatura revisada. Quase um terço da literatura revisada (Figura 3) apresenta novas metodologias a serem aplicadas para a ACV urbana. Muitos parâmetros de análise ainda precisam ser avaliados. Alberti *et al.* (2017) sugerem que o primeiro passo para o desenvolvimento metodológico da ACV de cidades deve ser a definição da função cidade, a unidade funcional, incluindo os aspectos de sustentabilidade total, bem como o fluxo de referência para quantificar os impactos. Mirabella, Allacker e Sala (2018) e seus colegas acrescentam a necessidade de refinamentos metodológicos específicos em ACCV, ASCV e Avaliação do Ciclo de Vida Social (ACVS) aplicáveis ao nível da cidade. A estrutura de metodologias futuras deve ser capaz de (MIRABELLA; ALLACKER; SALA, 2018): (i) quantificar o impacto dos contextos urbanos de uma forma holística, (ii) identificar pontos de acesso e os principais responsáveis pelos encargos ambientais, e (iii) testar e comparar soluções sustentáveis propostas para melhoria. No entanto, o amplo uso da ferramenta ACV mostra sua confiabilidade, o que pode significar que a normatização deve surgir em um futuro próximo.

Embora a literatura atual mostre que ainda não há consenso sobre as particularidades da ACV para estratégias e políticas urbanas, houve importantes avanços no campo. A investigação se concentra principalmente na discriminação da multifuncionalidade dos projetos de um sistema a ser levada em consideração durante a definição do escopo na ACV (LOISEAU *et al.*, 2018), bem como na alocação de impacto devido ao contexto territorial e às fronteiras geográficas (ALBERTÍ *et al.*, 2019b; LOISEAU *et al.*, 2018), incluindo todas as características socioeconômicas e culturais incorporadas nesta tecnosfera. A ACV Territorial confere à ferramenta ACV a capacidade analítica qualitativa para além das capacidades pontuais e objetivas das definições de modelagem da ACV tradicionalmente aplicada. A metodologia tem o potencial de conectar os instrumentos práticos do planejamento urbano e a metodologia de análise quantitativa, a fim de gerar informações confiáveis para a tomada de decisão levando em consideração limitações intrínsecas as características morfológicas, geopolíticas e socioculturais do território em questão. Nesse sentido, a diferença central da ACV territorial (TLCA, conforme definida por Loiseau *et al.* (2018)) para a ACV "convencional" (a definida pela NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a)) seria então a cuidadosa definição de objetivo e escopo do estudo por delimitação de contexto.

## 2.2 ACV territorial

Como sugere a diferenciação de temas e objetivos nesta revisão, são identificados dois principais escopos: análises de sistemas urbanos; e avaliações de cidades ou espaços urbanos segundo a totalidade dos processos que nele ocorrem, incluindo todos os sistemas utilizados. Todos os artigos classificados com “Gestão urbana” abordam algum aspecto de configuração da cidade como um todo, a exemplo de Heinonen *et al.* (2013b, 2013a) e Salvati e Carlucci (2016); enquanto os demais tópicos se referem à análise de sistemas específicos, com as análises de Chester *et al.* (2013) e Chester e Cano (2016) sobre mobilidade urbana, e de Barandica *et al.* (2013) sobre projeto de estradas. Loiseau *et al.* (2018) sumarizaram o método para avaliação de territórios a partir desse entendimento. Loiseau *et al.* (2018) determinam a particularidade da ACV em territórios com base nos estudos de caso apresentados em Loiseau *et al.* (2012, 2014) e Laurent (2015, *apud* LOISEAU *et al.*, 2018). O método é denominado Avaliação do Ciclo de Vida Territorial (do inglês, *Territorial Life Cycle Assessment*. TLCA), posteriormente referido neste trabalho como ACV territorial.

Segundo Loiseau *et al.* (2018, pg. 475), o território é “um sistema multifuncional através das funções territoriais que fornecem bens e serviços dependendo da natureza da terra e do modo como é explorada”. Pode abranger cidades, áreas metropolitanas, regiões e qualquer outra área que segue essa descrição, como mostrado anteriormente no subcapítulo 2.1.1. Também discutida nos resultados da revisão, a literatura de ACV tende a avaliar os setores de atividade específicos de um território. No entanto, estudos de ACV territoriais mais recentes também avaliam a eficiência ambiental de um território através da análise dos impactos do inventário de todas as atividades de produção e consumo. Assim, quando formalizaram pela primeira vez as propostas de definição em ACVs territoriais, os autores classificaram as ACVs territoriais como Tipo A – orientadas para avaliação de sistemas de serviços- e Tipo B – orientadas para a avaliação de consumo e produção (LOISEAU *et al.*, 2018). Em referência à ISO 14.040 (ABNT, 2009a) e ISO 14.044 (ABNT, 2009b), as principais características de cada tipo de ACV Territorial estão listadas na Tabela 1.



Tabela 1- Resumos das características da ACV territorial do Tipo A e Tipo B.

Etapas	Definições	Tipo A	Tipo B
Definições de objetivo e de escopo	Sistema	Setores de atividade específicos contidos em um dado território;	Todas as atividades de produção e consumo localizadas em um dado território e definidas pelo cenário de planejamento espacial (reponsabilidade territorial total);
	Audiência	Tomadores de decisão nos níveis políticos e administrativos e todas as partes interessadas que gostariam de gerenciar e desenvolver seus territórios;	
	Aplicação	Comparação de cenários;	Diagnóstico territorial, comparação de cenários de planejamento espacial;
	Razões	Para avaliar o desempenho ambiental de um projeto ou plano territorial para suportar os tomadores de decisão locais;	Para avaliar a eco eficiência dos processos de tomada de decisão;
	Contexto de decisão	Autoridades, organizações e comunidade local;	Autoridades, organizações e comunidade local. Foco na geração de indicadores de ecoeficiência do território;
	Funções	Funções designadas pelo projeto ou plano implementado no território; Multifuncionalidade é possível;	Multifuncionalidade (funções econômica, social e ambiental);
	Unidade funcional	Unidade funcional construída de acordo com o contexto territorial;	Consideração das funções e serviços oferecidos pelo território. Avaliação de uma série de indicadores funcionais territoriais;
	Limites	Do berço ao portão (para agricultura, por exemplo), do portão ao berço, ou do berço ao túmulo dependendo do ponto estudado;	Do berço ao portão (para agricultura, por exemplo) ou ao túmulo (para atividades consumidoras);
	Cenários	Definidos de acordo com o contexto territorial;	Cenários de planejamento especial definidos pelas partes interessadas /especialistas;
	Regras de alocação do sistema primário	Substituições determinadas de acordo com o contexto territorial;	Não há alocação;
ICV	Coleta de dados	Processo ICV baseado em dados específicos do local e bases de dados espaciais para sistemas primários e bases de dados genéricas para sistemas de fundo;	Combinando fluxos físicos e monetários para computar um ICV híbrido;
	Balço de energia e massa	Sim, considerando todas as trocas de fluxos elementares que ocorrem entre atividades que ocorrem no território;	Ainda não, pois ainda não são consideradas trocas entre territórios através desta metodologia;

AICV	Fatores de caracterização	Quando necessário, deve conter condições locais (clima, tipologia, ambiente receptor, fauna, flora, etc) para que se adaptem estes fatores ao contexto territorial;	
Interpretação	Apresentação dos resultados	A distinção entre impactos diretos (no local) e indireto (fora do local). Mapeamento dos resultados.	A distinção entre impactos diretos (no local) e indireto (fora do local). Mapeamento dos resultados. Uma distinção clara entre contribuições de produção e de consumo é necessária para evitar dupla contagem dos impactos.

Fonte: Adaptado de Loiseau *et al.* (2018, Table 1).

Na ACV Territorial Tipo A, o objetivo e o escopo podem ser definidos de acordo com a análise consistente do histórico do território. Antes das definições, o primeiro passo nesse tipo de avaliação é executar uma análise territorial usando o Sistema de Gerenciamento de Banco de Dados (SGBD) e o Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os resultados da análise são uma lista dos principais itens e características do sistema (por exemplo, partes interessadas, estoques, redes e variáveis ambientais), quantificados e georreferenciados. Depois disso, o sistema pode ser projetado. As informações classificadas anteriormente são usadas para criar indicadores de função, cenário e geografia. Esses indicadores, somados às opiniões dos tomadores de decisão, alimentarão a meta e o escopo e a decisão e, conseqüentemente, as fases de ICV e AICV.

Na ACV Territorial Tipo B, esta análise não pode ser realizada, uma vez que uma diversidade de atividades humanas é avaliada de uma só vez - todas as atividades de produção e consumo no território em questão (LOISEAU *et al.*, 2018). O procedimento para essa avaliação é semelhante ao dos Protocolos Global para os Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa em Escala Comunitária (do inglês, *Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories*, GPC)(WRI; C40; ICLEI, 2014). Também pode ser comparado com estudos de metabolismo urbano (MU) e regional, podendo-se utilizar Análise do Fluxo de Materiais (AFM), por exemplo, como métodos de inventário (LOISEAU *et al.*, 2018).

A pesquisa mostra que, de fato, pesquisas de ACV para espaços urbanos podem seguir diferentes focos. De maneira geral, pesquisas com estudos de caso em escalas territoriais de cidades ou espaço geográficos menores em área tendem a ser relacionadas a análises de sistemas, enquanto análises em territórios em escala continental tendem a estar relacionadas a análises de consumo e produção como um todo, como em análise para a EC. Dessa maneira, quando relacionadas as abordagem ao contexto de atuação em políticas no Brasil, verifica-se a

ACV Territorial Tipo B seria mais adequada para análises do Plano Diretor, uma vez o que o mesmo trata das relações do território como um todo. Já para o Plano integrado de transporte urbano, por se trata de um plano para um sistema específico, contudo relacionado às características do Plano Diretor, uma abordagem híbrida considerando aspectos importantes de indicadores globais do contexto socioeconômico, porém com a função específica de mobilidade seria mais adequada.

Loiseau *et al.* (2018) também destacam algumas questões para o desenvolvimento da ACV territorial. Por exemplo, dimensões organizacionais e de contexto são parcialmente consideradas na definição de objetivo e escopo e na fase de LCI. No entanto, essas dimensões 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, como eutrofização, acidificação, oxidação fotoquímica, toxicidade e ecotoxicidade. Finalmente, os autores sugerem que o método pode ser aprofundado e ampliado através da integração de outras ferramentas e métodos existentes, como por exemplo, com entrevistas e levantamentos de campo para cenários de uso da terra.

### 3 MÉTODO E MATERIAIS

Esta pesquisa foi desenvolvida em um programa experimental que une a literatura revisada a um estudo de caso para explorar especificações da ACV de um sistema urbano gerido por políticas públicas. O estudo de caso é desenvolvido com base nas metodologias de ACV segundo a NBR ISO 14040, com especificações metodológicas sugeridas por Loiseau *et al.* (2018) quanto à ACV territorial tipo A – orientada para análise de sistemas urbanos. Bem como descrito no Capítulo 2, a avaliação do ciclo de vida do sistema estudado é composta por quatro etapas: i) definição de objetivo e escopo; ii) Inventário de Ciclo de Vida (ICV); iii) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV); e iv) Interpretação. As recomendações adotadas se limitam às diretrizes indicadas por Loiseau *et al.* (2018) para as etapas de “i” e “ii”. Por insuficiência de dados e informações locais, não foram considerados fatores de caracterização local, ou mapeamento dos impactos no local. A Figura 6 apresenta a visão geral do método como parte da estrutura da pesquisa.

Na ACV Territorial do Tipo A, o objetivo e o escopo podem ser definidos de acordo com uma análise consistente da história do território suportada por bancos de dados locais e potencialmente pelo uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os resultados da análise são uma lista dos principais itens e características do sistema (por exemplo, partes interessadas, estoques, redes e variáveis ambientais), quantificados e georreferenciados. Depois disso, o sistema pode ser projetado. Informações previamente classificadas foram usadas para criar indicadores de função, cenário e geografia. Esses indicadores, somados às opiniões dos envolvidos com as informações dos tomadores de decisão, alimentaram a meta e o escopo e, conseqüentemente, as fases de LCI e LCIA.

A primeira etapa do estudo é a definição do cenário de pesquisa: a cidade de Porto Alegre (descrita neste mesmo subcapítulo 3.1). De maneira mais específica, a primeira parte da etapa “i) Objetivo e Escopo”, detalha as características do sistema de transporte público de ônibus na cidade estudada. Este detalhamento é desenvolvido através da transcrição de uma entrevista feita com a gestora do transporte público da cidade. Os resultados da entrevista fornecem base para as definições da sequência: objetivo da pesquisa; escopo; fronteira do sistema; a definição da função e unidade funcional; cenários; e modelo de abordagem de

inventário. Todas as definições seguem indicações e discussões do referencial teórico. Uma vez que o número e variedade de cenários possíveis para um estudo de caso podem ser infinitos, segundo Weidema et al (2004), uma possível solução é o uso de cenários extremos, que podem auxiliar na definição de outros cenários plausíveis, ou quando não existam dados suficientes sobre as mudanças em função do tempo. Dessa maneira, cenários futuros são definidos de acordo com o contexto territorial (LOISEAU et al., 2018) e segundo de regressão linear e progressão dos dados históricos do sistema.

A segunda etapa do estudo, “ii) Inventário”, é composta por três fases de coleta de dados. A coleta de dados primários é feita junto ao banco de dados da gestora do transporte público da cidade (EPTC, 2018), enquanto a coleta de dados secundários é feita segundo a literatura e a base de dados de ACV Ecoinvent v.3.3 (ECOINVENT, 2018). A última parte da etapa 2 consiste de análise crítica da qualidade dos dados coletados, a fim de identificar incertezas e outras limitações do uso do inventário e dos resultados finais do estudo.

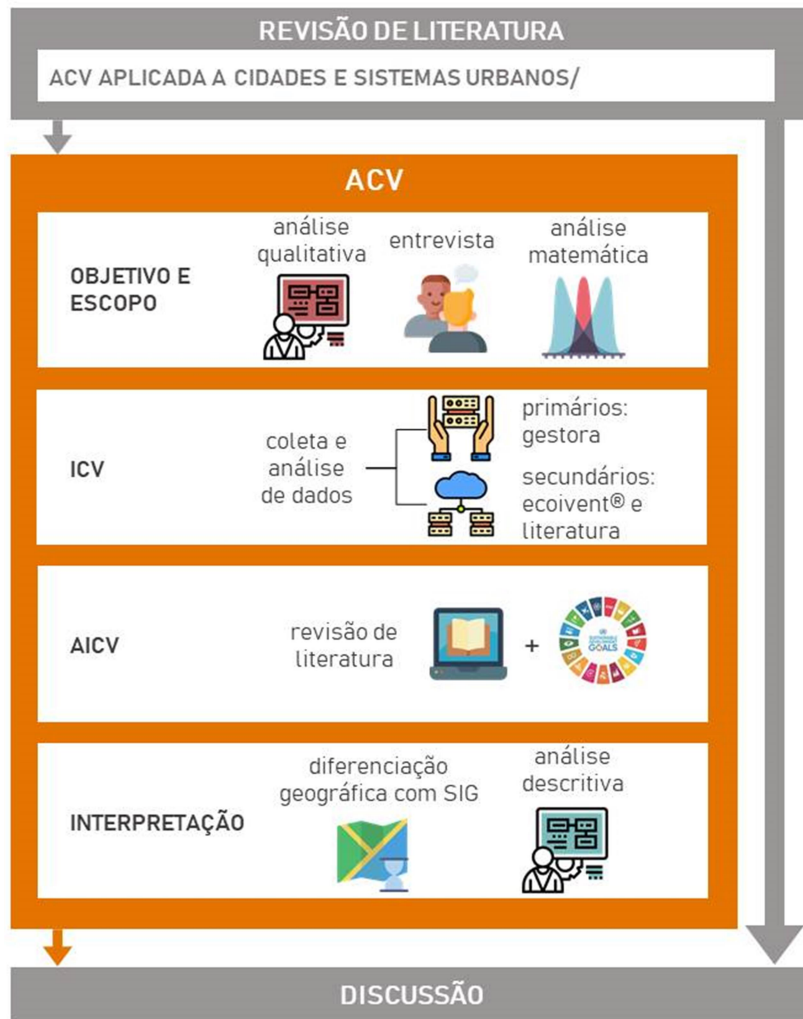
Na fase “iii) Avaliação dos Impactos do Ciclo de Vida”, as categorias de impactos são escolhidas segundo a literatura sobre o sistema estudo. Da mesma maneira, os métodos de caracterização de impacto são determinados segundo duas principais referências bibliográficas: a Rede de Pesquisa de Avaliação do Impacto de Ciclo de Vida (IBICT, 2019); e o *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) (FAZIO et al., 2018).

Na fase final, “iv) Interpretação”, os resultados da avaliação são apresentados segundo análise crítica de cada variável descrita anteriormente. Nesta etapa, como sugerido por Loiseau *et al.* (2018), a ferramenta de Sistema de Informação Geográfica (SIG) foi utilizada como ferramenta auxiliar. Neste trabalho, a ferramenta é utilizada para análise de distribuição do serviço de transporte público por ônibus, e demonstração da distribuição de impactos.

Os resultados do estudo de caso e as particularidades de modelagem da ACV, das etapas “i)” a “iv)”, são discutidos no Capítulo 5, embasados na revisão de literatura. Contudo, salienta-se que os resultados da ACV deste trabalho respondem ao objetivo e, conseqüentemente, as escolhas de modelagem feitas foram delimitadas pelos métodos conhecidos e materiais disponíveis. Dessa maneira, neste estudo não foram consideradas avaliações probabilísticas, ou quaisquer outras ferramentas (como ABM), para a ocorrência dos cenários, levando em consideração principalmente os efeitos socioeconômicos das mudanças projetadas. Igualmente, não são considerados normalizações ou índices de valoração para cada categoria

de impacto a fim de unificar o resultado a uma só conclusão e informação dos tomadores de decisão. Estas e outras limitações do trabalho, citadas ao longo do texto, devem ser consideradas quando os resultados são analisados, e em trabalhos futuros.

Figura 6 - Esquema da estrutura da pesquisa. O método do estudo de caso é destacado, e as ferramentas e materiais utilizados em cada etapa citados.



Fonte: elaborado pela autora.

### 3.1 DEFINIÇÃO DO ESTUDO DE CASO

O estudo de caso é desenvolvido para a cidade de Porto Alegre, Brasil. Localizada no delta do Lago Guaíba, Porto Alegre apresenta uma geografia única quando comparada a outras cidades da região, dada a misturas geológica que lhe confere um suave relevo através das colinas (MENEGAT et al., 2006).

Fundada em 26 de março de 1772, Porto Alegre é a capital do estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O desenvolvimento da cidade no tempo está diretamente relacionado à variação populacional e às atividades nela desenvolvidas. O período após a fundação foi marcado pelo desenvolvimento das atividades portuárias instaladas na margem do lago Guaíba e impulsionado pela exportação de trigo cultivada pelos colonos açorianos. Há época, devido à configuração geográfica local e ao escoamento das mercadorias do porto, o primeiro vetor radial a se desenvolver foi no sentido leste, em direção ao litoral. Com o crescimento da região e ocupação da região do Vale dos Sinos e do Planalto, foram criados sistemas de estradas e caminhos para a região norte da cidade. Estes trechos tornaram-se, então, as linhas estruturadoras da expansão e configuração espacial da cidade, gerando centralidades lineares em alguns trechos. Destes trechos, destacam-se os caminhos que hoje são parte das avenidas João Pessoa e Bento Gonçalves, Osvaldo Aranha e Protásio Alves, Independência e Vinte Quatro de Outubro, Assis Brasil e Sertório, ainda hoje relevantes como centros urbanos consolidados. (VARGAS, 2003).

O período seguinte, entre 1820 e 1890, foi marcado pela imigração de alemães e italianos para a região e o desenvolvimento das funções das cidades: atividades portuárias, comerciais, administrativas e militares (MENEGAT et al., 2006). Conseqüentemente, o desenvolvimento industrial foi conduzido depois. Dada a necessidade de acomodação populacional para fins destas atividades econômicas e de habitação, os bairros periféricos passaram a se consolidar. A expansão ao longo dos grandes eixos radiais e adjacentes confirma estes como protagonistas do arranjo espacial (VARGAS, 2003). A cidade está passando por um processo de metropolização desde então.

Desde o início do século XX, a administração municipal preocupa-se com o planejamento de expansão da cidade. Em 1914, o primeiro plano de urbanização foi projetado. O Plano Maciel definiu a organização do centro urbano e a expansão da estrada nas direções norte, leste e sul. Nos 30 anos seguintes, foram realizadas uma série de intervenções urbanas, delineando os principais elementos da atual estrutura urbana (MENEGAT et al., 2006). Os contornos de avenidas perenes e as ideias de multipolaridade e descentralização (discurso de policentralidade) foram algumas dessas intervenções importantes (VARGAS, 2003). Em 1961, a primeira lei de ordenamento territorial estabeleceu normas para a ocupação de espaços urbanos, sistemas rodoviários, uma reserva de áreas para escolas, bem como o zoneamento das funções da cidade e as regras para edifícios e garagens. Foi somente em 1979

que a primeira lei complementar instituiu o primeiro Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Porto Alegre, considerando a questão da preservação ambiental natural. Após a promulgação da Constituição Federal de 1988 com as políticas urbanas voltadas ao direito social e ao desenvolvimento sustentável, novas demandas foram feitas (MENEGAT et al., 2006). Porto Alegre tornou-se, então, um modelo quando lançou o orçamento participativo, que construiu a mudança mais notável do país nas administrações urbanas e seu planejamento (MARICATO, 2015), quando passa a decisão parcial da aplicação dos recursos em obras serviços para o poder direto de conselhos formados pela população (PMPA, 2019a).

O Plano Diretor atual foi publicado em 2011, com base no Plano Diretor de 1999 (PMPA, 1999). Ele manteve alguns dos avanços anteriores da história do planejamento urbano da cidade como a divisão do território em dez macrozonas, cujos padrões de desenvolvimento, funções, tipologias e estruturas de estradas, assim como aspectos socioeconômicos, paisagísticos e ambientais diferem entre si. O plano diretor atual também manteve os princípios de desenvolvimento social e econômico, e preservação ambiental dos planos anteriores.

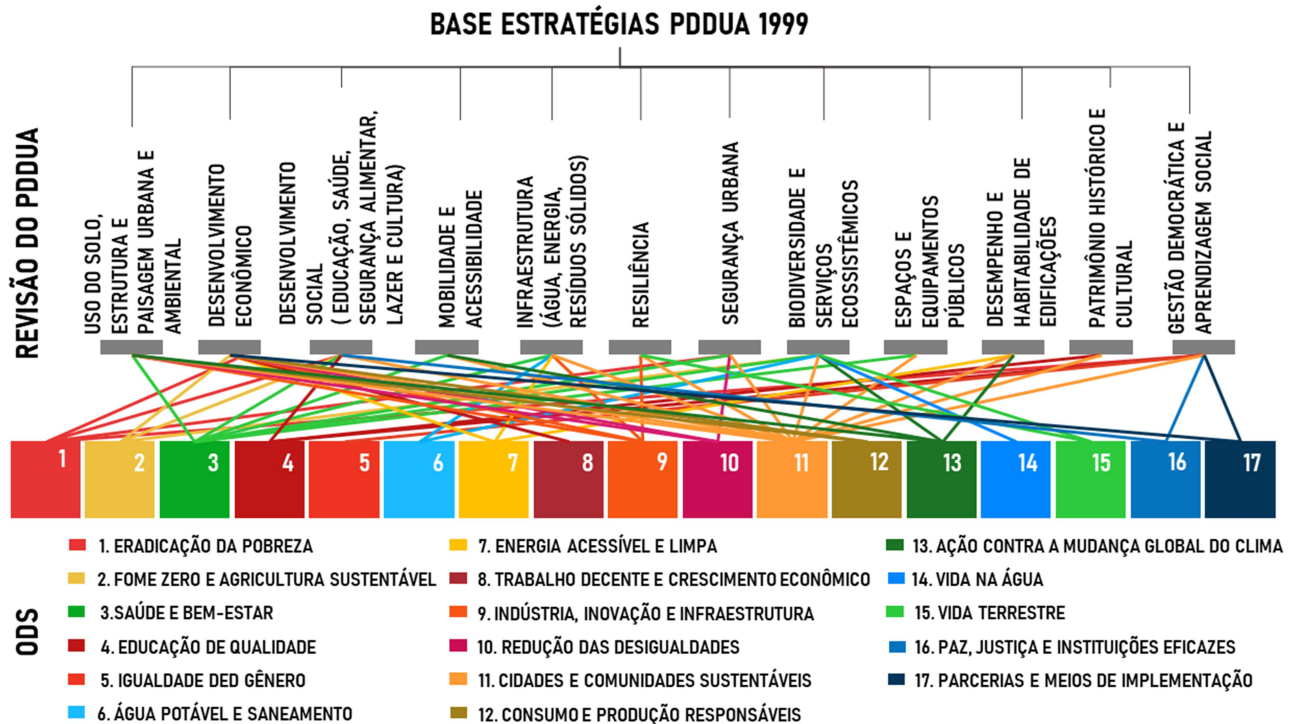
De acordo com o Estatuto da Cidade, os planos diretores devem ser revisados a cada dez anos. Sendo assim, uma nova versão do plano diretor deve ser publicada no ano de 2021, devendo contemplar as transformações das dimensões socioeconômicas da cidade. Hoje, Porto Alegre conta com uma população de mais de 1,41 milhão de pessoas em uma área de 496,83 km<sup>2</sup>, sendo a décima cidade mais populosa do Brasil. A economia é impulsionada principalmente pelos serviços - 88,51% do produto interno bruto (PIB) total (IBGE, 2018a). Segundo IBGE (2018a), 55,4% da população total está formalmente empregada, e o valor de PIB per capita, segundo dados estatísticos de 2018, é de R\$ 46.122,79 ao ano. Quanto à infraestrutura, o censo do IBGE (2010) indica que 93% dos assentamentos têm coleta de esgoto sanitário - o que não significa tratamento integral. Além disso, apenas 69,4% das vias públicas são urbanizadas (IBGE, 2018a). As taxas indicam que ainda há um caminho a ser seguido pelo poder administrativo do município para o desenvolvimento sustentável.

Segundo a Secretaria Municipal de Meio Ambiente e Sustentabilidade (SMAMS) de Porto Alegre, a próxima versão do Plano Diretor de Porto Alegre incluirá todos os ODS (ver Figura 7), portanto, ampliando a estrutura principal e os princípios do plano diretor atual. Dentro da temática “Mobilidade e acessibilidade”, destaca-se as inclusões dos ODS número “3” (Saúde



e bem-estar), “11” (Cidades e comunidades sustentáveis) e “13”(Ação contra a mudança global do clima). Assim, visando o desenvolvimento sustentável, o novo Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental (PDDUA) deve basear-se em relatórios e iniciativas sustentáveis previamente implementadas na cidade.

Figura 7 - Esquema estratégico do novo Plano de Diretor Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre. Revisão de acordo com o Plano Diretor de 1999 e os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável.



Fonte: baseado em apresentação da Prefeitura Municipal de Porto Alegre<sup>1</sup>.

O novo plano diretor deverá incluir o projeto da Zona de Inovação Sustentável (ZISPOA), que pretende tornar Porto Alegre o local mais sustentável e inovador da América Latina até 2030. A iniciativa deve ser chave nas mudanças do plano da cidade. Desde setembro de 2015, quando foi criada, a estratégia objetiva a tornar a região, composta por seis bairros no centro da cidade, mais eficiente em termos de energia com a inclusão de energia solar, mais conectada digitalmente, mais amigável às tecnologias renováveis e mais propícia para

<sup>1</sup> Apresentação realizada no workshop “Exposição: Revisão do Plano Diretor e Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da ONU”, sediado na Câmara de Vereadores de POA às 09h do dia 08/06/18, durante a 34ª Semana do Meio Ambiente de Porto Alegre.

deslocamento em bicicletas (WEISS; SEDMAK-WEISS; RODRIGUEZ, 2015; ZISPOA, 2018).

Em março de 2018, o prefeito Nelson Marchezan Júnior assinou a aprovação da Lei ZISPOA (PMPA, 2018), que compromete o governo da cidade a fornecer maior apoio político, programático e legislativo aos esforços da ZISPOA. Uma possível iniciativa é a criação de um processo de licenciamento acelerado para investimentos e atividades relacionadas à inovação sustentável, como a instalação de painéis solares em prédios, estacionamento seguro para bicicletas, instalações de reciclagem e feiras de rua (ZISPOA, 2018).

O novo plano diretor de mobilidade, também a ser revisado, deverá incluir resultados do diagnóstico e prognóstico, bem como o Inventário de Gases de Efeito Estufa da mobilidade no centro da cidade de Porto Alegre, encomendados pela PMPA ao WRI e ao ILADES, respectivamente (ILADES, 2015; PMPA, 2019b, 2019c). A revisão do plano usa como referência para elaboração a metodologia desenvolvida pelo WRI Brasil, que inclui processos de preparação, elaboração do plano e projeto de lei, sendo o processo de elaboração baseado no diagnóstico atual da mobilidade e no prognóstico de cenários futuros. Com a finalidade de identificar as condições dos deslocamentos na cidade e seus vetores influenciadores, o diagnóstico explora padrões de aspectos econômicos, políticos, técnicos e culturais do território, e em seguida apresenta as características da mobilidade da cidade. Os modais de transportes identificados são a bicicleta, de transporte coletivo por ônibus e público seletivo (lotação e hidroviário), além de transporte individual e de cargas, todos conectados pela modalidade de deslocamento a pé (PMPA, 2019b).

O sistema de mobilidade em Porto Alegre pode ser classificado pelos serviços de transporte privados e públicos. Os serviços privados são os transportes por veículos familiares, serviços de empresas privadas e, mais recentemente, o serviço disponibilizado por aplicativo em dispositivos móveis. Os serviços públicos são providos em ônibus regulares e micro-ônibus dentro da cidade, e por ônibus interurbanos, trem e balsa na região metropolitana (ILADES, 2015; PMPA, 2019b, 2019c). Esses serviços públicos são administrados pela Empresa Pública de Transporte e Circulação da cidade (EPTC), no entanto, as empresas que fornecem o

serviço de transporte são, em sua maioria, empresas privadas licenciadas, com exceção a empresa Carris, uma empresa de sociedade mista com controle acionário da PMPA<sup>2</sup>.

Segundo o estudo da WRI, o transporte coletivo de ônibus e lotação são os mais utilizados para deslocamento (40% das viagens), seguido do transporte individual (aproximadamente 36%). Contudo, os valores são do ano de 2003, e pode não representar a atualidade, dado o aumento de frota de automóveis e a oferta de serviço de transporte por aplicativo. Ainda segundo o estudo, a maioria das viagens se dá pelo motivo “trabalho” (40% dos deslocamentos), sendo o do maior número de postos de trabalhos localizados na região central da cidade (PMPA, 2019b).

Em 2014, a Secretaria Municipal do Meio Ambiente (atual SMAMS) lançou o projeto “Inventário das emissões de gases do efeito estufa (GEE) provocadas pela mobilidade urbana na região central de Porto Alegre e sugestões de ações de mitigação dessas emissões como elementos de construção para uma política municipal de combate às mudanças climáticas”. O relatório gerado utiliza dados fornecidos pelas instituições e empresas responsáveis pela oferta e monitoramento da mobilidade na cidade de Porto Alegre.

Com base na metodologia do GPC(WRI; C40; ICLEI, 2014), e das recomendações do Painel Intergovernamental sobre Mudança do Clima (IPCC), e do *GHG Protocol*, foram coletados dados de valores absolutos para consumo de combustíveis para os modais de transporte.

A Tabela 2 mostra os resultados das emissões na região central de Porto Alegre no ano de 2013, com os valores de contribuição de cada modal para as emissões totais. Os resultados demonstram que o elevado número de carros privados circulando na região confere a este modal o maior número de impactos, seguido dos consórcios de transporte público de ônibus e lotações. Os modais menos impactantes, de acordo com a pesquisa, seriam os dos modais: trem, transporte fluvial, e rodoviário. Vale salientar que os resultados estão ligados às fronteiras geográficas do estudo e a respectiva alocação de impacto a ela devida. O relatório é concluído com propostas de potenciais ações para melhorar o desempenho ambiental do

---

<sup>2</sup> Carris: carris.com.br

sistema, como por exemplo, aumento de ciclovias na cidade e o aumento de percentual de biocombustíveis nos combustíveis utilizados.

Não se pode averiguar, contudo, o efeito das melhorias propostas apenas utilizando o indicador de impacto de emissões GEE. O indicador oferece benefícios em função da simplificação da análise de sistemas complexos, tais como transporte, além de satisfazer a recomendações para os ODSs, e similarmente às recomendações da norma NBR ISO 37120 (ABNT, 2017) para cidades sustentáveis. Contudo, a análise não permite prognóstico relacionado à tomada de decisão, necessária para o estímulo de novas regulamentações e priorização de ações para a transformação das cidades em ambientes mais sustentáveis, uma vez que não demonstra a relação de potencial de mitigação para cada uma das sugestões. Esta lacuna é endereçada pela metodologia de ACV, uma vez que possibilita o amplo rastreamento dos impactos em função do inventário do ciclo de vida e das definições de cenários analisados, incluindo cenários futuros.

Uma vez que a mobilidade é um tema significativo nos impactos ambientais das cidades, especialmente quando há falta de opções de transporte ferroviário, propõe-se avaliar, com base na metodologia ACV Territorial, o cenário de transformações baseadas em políticas públicas. O transporte coletivo de ônibus é escolhido dado a sua importância social e maior suscetibilidade às regulamentações municipais.

Tabela 2 - Resultados inventário de gases de efeito estufa para os anos de 2013

<b>Ano</b>	<b>2013</b>	
<b>Modal</b>	<b>tCO<sub>2</sub> eq</b>	<b>%</b>
<b>Carris (Ônibus)</b>	4,16E+03	5,18
<b>ATP (Ônibus)</b>	1,31E+04	16,28
<b>Lotações</b>	2,72E+03	3,38
<b>Interurbanos</b>	1,38E+02	0,17
<b>Veículos privados</b>	5,86E+04	72,98
<b>Trensurb (trem)</b>	1,25E+03	1,56
<b>CATSUL (balsa)</b>	3,53E+02	0,44
<b>TOTAL</b>	<b>8,03E+04</b>	<b>100,00</b>

Fonte: ILADES, 2015.

## 4 RESULTADOS

Esse capítulo apresenta o estudo de caso da aplicação da ferramenta ACV Territorial para planejamento do desenvolvimento sustentável em áreas urbanas no contexto de cidades brasileiras. A primeira parte deste capítulo apresenta a proposta para a ACV do sistema de transporte coletivo de ônibus de Porto Alegre e algumas limitações são declaradas. Além disso, o inventário do sistema segundo os dados utilizados e os cenários simulados, e a AICV são expostos. Ao final, os resultados são apresentados e discutidos.

### 4.1 OBJETIVO E ESCOPO

Para definições de objetivo e escopo, considerando Loiseau *et al.* (2018), primeiramente, os itens do sistema e suas interações são exibidos. As principais partes interessadas neste caso são a EPTC, empresas públicas e privadas licenciadas para fornecer o serviço de transporte público, e usuários de transporte, interagindo no sistema como controle, oferta e procura, respectivamente.

#### 4.1.1 Contexto de operação do sistema - consulta ao gestor de transporte

A EPTC, empresa que fiscaliza e administra o serviço de transporte público na capital, foi consultada. No dia 6 de Novembro de 2018, o então coordenador de normatização de transporte da empresa, recebeu a autora e a aluna de graduação e bolsista de iniciação científica do grupo de pesquisa LIFE/UFRGS, Michelle. Em conversa informal, o coordenador apresentou o funcionamento do sistema de transporte coletivo atual e seu histórico. Foram relatadas as mudanças ocorridas em função:

- 1) Da expansão da cidade: o desenvolvimento da cidade em áreas rarefeitas, principalmente acarretado pela construção de grandes conjuntos habitacionais na região sul, como no bairro Restinga, gerou necessidade de deslocamento por parte da população na periferia da cidade. O destino deste deslocamento é, geralmente, a região central, e demais regiões comerciais, por motivos de trabalho e estudo. Consequentemente, surgiram demandas de ampliação do sistema de transporte coletivo para estas áreas;
- 2) Da regulamentação de investimento no setor de transporte: as empresas contempladas com os consórcios de transporte coletivo não recebem subsídios do

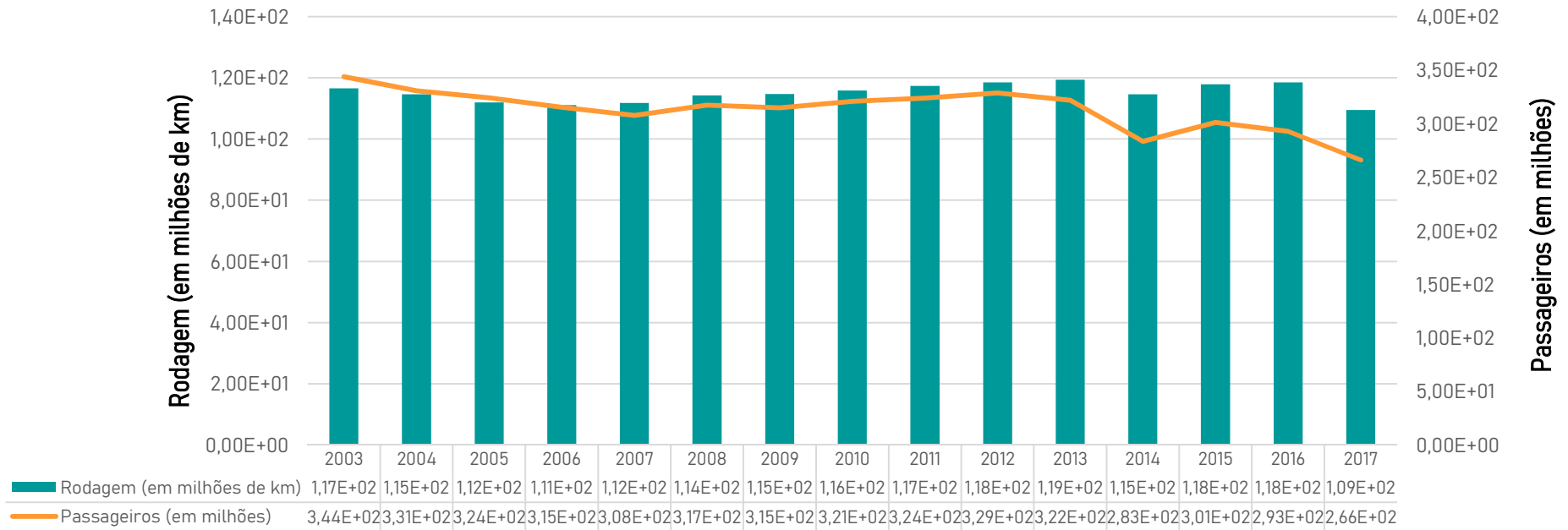
município. Elas devem investir a partir do capital próprio, dessa maneira, dependendo do retorno financeiro da tarifa de transporte;

- 3) Do surgimento de transporte de demanda individual através de aplicativos: o surgimento deste novo modal de transporte na capital gerou uma redução na demanda de transporte público, principalmente da parte dos usuários pagantes (aqueles que não recebem benefícios de redução ou isenção tarifária);
- 4) Do valor único de tarifa: com a entrada de um novo modal (transporte por aplicativo) no mercado de transporte da cidade, a tarifa dos ônibus coletivo deixa de ser competitiva para deslocamentos a curta distância, uma vez que os mesmos percursos podem ser realizados de forma individualizada e com maior conforto a partir da demanda por aplicativo. As viagens de longa distância, mais custosas do ponto de vista operacional, passam a serem proporcionalmente mais numerosas em relação ao número total de passageiros pagantes. O potencial aumento da tarifa única gera uma reação negativa na procura por este modal.

O principal resultado destas mudanças é percebido pelo reajuste anual do tarifário. O cálculo do reajuste da tarifa leva em consideração as seguintes variáveis de custo, conforme ordem de influência: salário dos prestadores de serviço; custos variáveis de operação (incluindo custo de combustível, manutenção dos veículos e do salário dos prestadores de serviço em função dos quilômetros rodados e da eficiência de consumo de combustível por quilometragem rodada); custo de depreciação dos veículos; retorno de investimentos; impostos; despesas administrativas. O lucro é calculado a partir da estimativa de passageiros pagantes a serem transportados, dada a variação de passageiros e quilômetros rodados nos anos anteriores.

A combinação destas mudanças no comportamento de oferta e procura do sistema geram uma crise no setor. A partir dos gráficos da Figura 8 pode-se notar o aumento do número de quilômetros rodados até o ano de 2013 e a redução do número de passageiros pagantes transportados, o que confirma os relatos. A fim de mitigar parte dos custos das empresas e conter os valores de reajuste, a regulamentação de tempo de vida útil dos veículos comprados pelas empresas foi alterado, passando de 10 a no máximo 13 anos, com a condição de peritagem e manutenções regulares nestes 3 anos acrescidos.

Figura 8 - Histórico de rodagem (em barras) e do número de passageiros transportados (em linha) no período entre 2002 e 2017.



Fonte: elaborado pelo autor a partir da fonte de dados da EPTC (2019).

Quanto à sustentabilidade, o coordenador afirma que as regulamentações de requisitos mecânicos para a compra de veículos novos foram atualizadas historicamente de acordo com as atualizações europeias para motores de veículos pesados. Atualmente, mesmo que operem veículos antigos com motores Euro II, III e IV, todos os ônibus novos devem ter motores Euro V, mais eficientes na combustão e com menores fatores de emissão de materiais particulados. Além disso, de acordo com a Associação de Transporte Público (ATP) da cidade, todos os ônibus operam com consumo de Diesel S10, cujo teor de enxofre é reduzido em comparação à antiga fórmula S50 (50 ppm para 10 ppm), reduzindo emissões de dióxido de enxofre dos escapamentos e consequentes impactos, como as chuvas ácidas.

Também se afirmam esforços de incentivo às empresas operadoras para a compra de veículos elétricos para substituição gradual da frota atual. A compra destes veículos depende do capital financeiro das empresas, e financiamentos ainda estão em negociação. Contudo, testes com veículos elétricos da empresa chinesa BYD já foram feitos pela empresa Carris. Os resultados ainda não são públicos.

#### **4.1.2 Definição do objetivo**

A partir da contextualização do sistema e características da cidade, foram destacadas algumas variáveis relacionadas à oferta e demanda e a operação do sistema, que juntas dão origem às relações econômicas entre custos, lucros e tarifário. São elas: número de passageiros transportados; rodagem (distâncias percorridas); eficiência energética de rodagem dos veículos. Quanto às questões ambientais influenciando fatores de emissão, destaca-se o tipo de motor dos veículos e o combustível consumidos.

Desta maneira, o objetivo desta ACV é gerar indicadores de emissão a partir do diagnóstico dos impactos potenciais do sistema coletivo a partir do cenário atual e da proposta de cenários futuros, e da projeção da mitigação de impacto de acordo com políticas públicas endereçadas às variáveis acima relacionadas. Os resultados pretendem informar aos tomadores de decisão, neste caso, à EPTC e às empresas prestadoras do serviço, quanto aos potenciais de mitigação de impactos no sistema.

Nos parágrafos seguintes, as definições de escopo, de funcionalidade e de cenário são expostas.



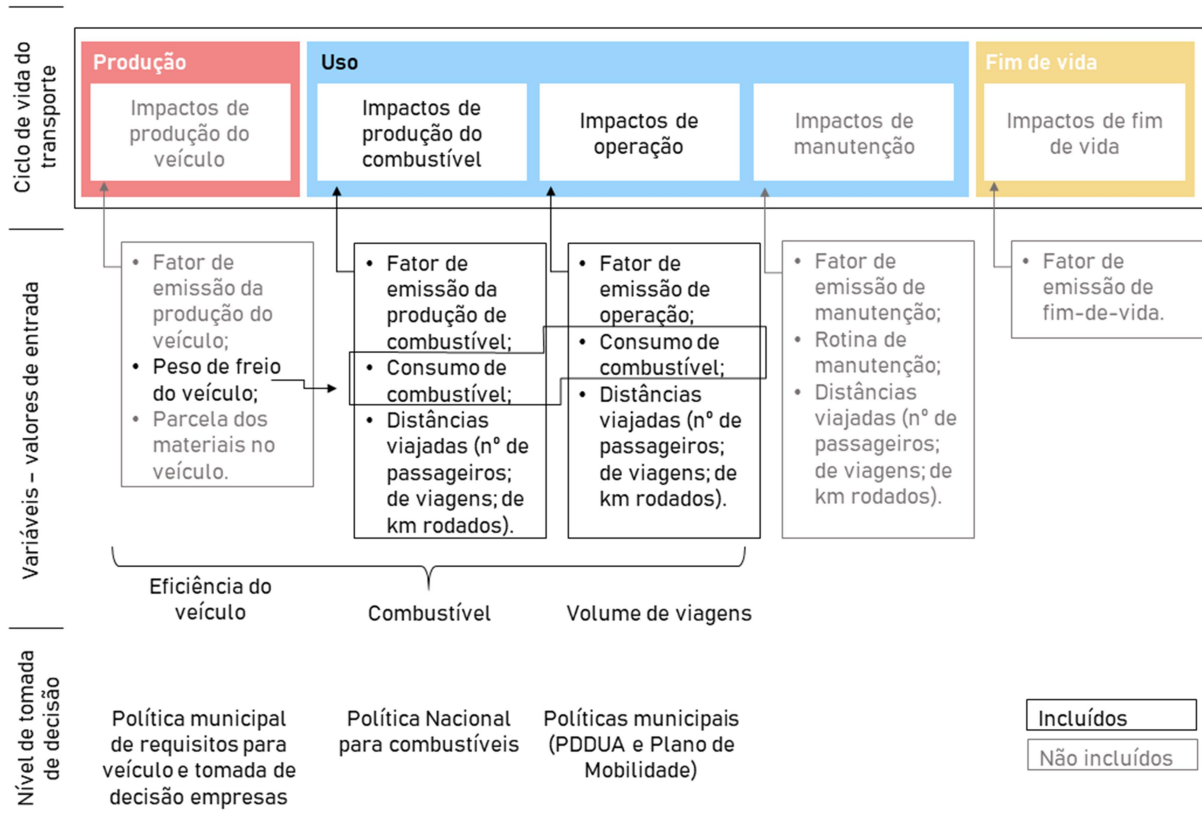
### 4.1.3 Definição de escopo

Quanto às emissões e impactos no transporte, estudos afirmam que a fase de uso de um veículo é a que mais gera emissões ao meio ambiente e, conseqüentemente, impactos ambientais, devido especialmente às emissões da combustão em motores à combustão, e devido à vida útil dos veículos (CHESTER et al., 2013; COSTA, 2016; LEICHTER; HACKENHAAR; PASSUELLO, 2019). A redução de emissões e impactos decorrentes do transporte coletivo pode seguir mudanças em três variáveis e alguns parâmetros-chave para o estágio de uso do ciclo de vida: o combustível, o veículo e a rotina de operação. De acordo com as variáveis apresentadas foram identificadas três (3) áreas de atuação de tomada de decisão pelos agentes envolvidos, apresentadas na Figura 9.

Para os fins desta pesquisa, a etapa do ciclo de vida a ser considerada é a de uso e operação do serviço de transporte. Salienta-se que a mesma decisão foi tomada com base científica, e para fins de simplificação, considerando que a distribuição dos impactos causados pelos processos de produção do veículo e do fim de vida são mínimos quando normalizados pelo número total de quilômetros percorridos durante o tempo de vida útil dos mesmos, por se tratarem de veículos coletivos. Estes valores podem ser mais significativos ao se considerarem análises de transporte por veículos privados e de uso limitado, como carros (CHESTER et al., 2013).

O diagnóstico da média de impactos potenciais do sistema é realizado considerando totais anuais para as variáveis acima apresentadas. A projeção é dividida conforme diferentes cenários para as variáveis utilizadas. A primeira parte enfoca a sensibilidade dos impactos considerando uma política federal relacionada a mudanças na composição do diesel até o ano de 2020 e possível aumento da porcentagem de biodiesel no diesel, ainda conforme limites estipulados por leis. A segunda pressupõe a troca gradual da frota, segundo o fim do tempo de vida útil dos veículos que atualmente compõem a frota. E por último a variação na rodagem e número de passageiros, estabelecida através da elaboração de cenários futuros. Os resultados são apreciados de maneira separada e agregada.

Figura 9 - Etapas do Ciclo de Vida com as respectivas variáveis suscetíveis à mudanças por políticas públicas para fins de mitigação.

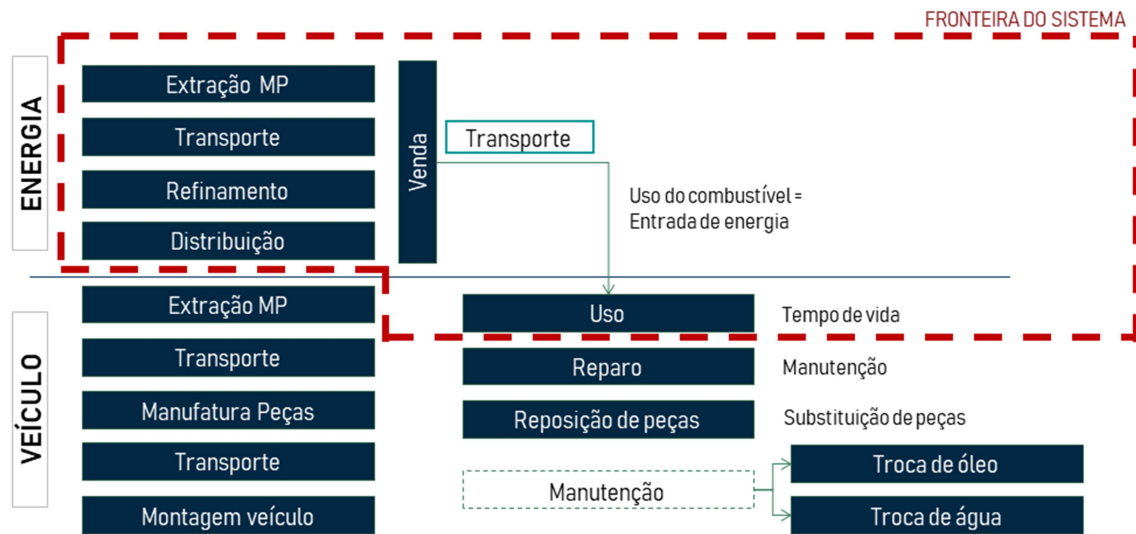


Fonte: elaborado pelo autor, baseado em Garcia, Gregory e Freire (2015).

#### 4.1.3.1 Fronteira tecnológica do sistema de produto

Conforme discutido anteriormente, não são analisados processos de produção e manutenção dos ônibus, bem como da infraestrutura civil, uma vez que para o ciclo de vida de utilização do ônibus (13 anos), considera-se que esses processos não possuem alta participação nos impactos, e ainda que, na falta de dados coletados no local, a inclusão de bens de capital pode aumentar as incertezas dos resultados (SILVA et al., 2018). Foram incluídos os impactos relacionados ao combustível, incluindo produção, transporte e impactos de consumo/uso (combustão durante a operação). A fronteira tecnológica do sistema pode ser observada na Figura 10. Para além da fronteira tecnológica, o sistema ainda conta com duas variáveis que tangem o sistema e que são responsáveis por variações finais nos impactos conforme a unidade funcional, discutidas a seguir.

Figura 10 - Fronteira tecnológica do sistema.



Fonte: elaborado pelo autor.

#### 4.1.3.2 Função e Unidade Funcional

De acordo com a NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), unidade funcional (UF) é “uma medida do desempenho das saídas funcionais do sistema de produto”. A UF fornece uma referência para as relações de entradas e saídas para assegurar a comparabilidade de resultados. Se um sistema possuir mais de uma possível função, os objetivos e escopo é que guiarão a definição de uma UF mensurável (ABNT, 2009a). Loiseau et al. (2018) citam que, na ACV Territorial tipo A, a multifuncionalidade é contornada para definições da função do sistema de acordo com as características do território. No caso do sistema de transporte coletivo de passageiros, considera-se a função: transporte de passageiros dentro do perímetro urbano pelo período de um ano.

Em pesquisas de ACV do transporte de passageiros, a equivalência funcional é frequentemente adquirida através da definição de impactos por passageiro-quilômetro, ou "p.km" (BERGESEN et al., 2017; FRANÇOIS et al., 2017). Um “p.km” é a unidade de medida que representa o transporte de um passageiro por um meio de transporte definido (rodoviário, ferroviário, aéreo, marítimo, fluvial etc.) ao longo de um quilômetro (EUROSTAT, 2019). É frequentemente usado para a análise com variações de modos de transporte ou rota (com pontos de partida e chegada identificados), dependendo do número de passageiros transportados (CHESTER et al., 2013; LEICHTER; HACKENHAAR; PASSUELLO, 2019; NAHLIK; CHESTER, 2014). Apesar da distribuição do sistema de

transporte ser idealizada por atividades regulatória a partir da distribuição da população e dos serviços ao longo do território, para este caso em que os impactos totais do sistema são analisados, a unidade “p.km” não é necessariamente a melhor maneira de lidar com a multifuncionalidade e requisitos técnicos e as mudanças ao longo do tempo.

Neste trabalho, os resultados da ACV são analisados de diferentes formas, a fim de contemplar uma análise global da variação de impacto conforme as mudanças ocorridas nas diferentes variáveis do sistema ao longo do tempo. A primeira etapa da análise contempla o diagnóstico de impactos segundo as características do sistema em 2017, a fim de gerar melhor compreensão sobre os resultados totais da etapa seguinte. As unidades de análise (UA) definidas para cada uma destas análises correm segundo a variável analisada: para a análise do teor de biodiesel no diesel a UA é uma unidade de energia necessária para combustão (em MJ) dos combustíveis em estudo; para a análise das características do veículo, a UA considerada é um quilômetro rodado (km), uma vez que considera a eficiência de combustão de um veículo de acordo com volume de combustível necessário para percorrer o mesmo; e por último, as variáveis de operação não são analisadas em função dos resultados de impacto ambiental, mas em função mudanças funcionais (transporte de passageiro) no sistema, a partir do entendimento de que o percurso de “x” km percorridos atendem a um número “y” pessoas.

Na segunda parte, os resultados são apresentados a partir da projeção conjunta das mudanças de cenários nos impactos ambientais. Uma vez que, os valores de número de passageiros transportados, distâncias percorridas, valores médios de eficiência dos veículos e mudanças de combustível são analisados de maneira agregada, seguindo os preceitos da normativa (CEN, 2001), a unidade comum de referência (UR) considerada é o tempo (ano). A primeira parte da análise das projeções considera, então, os valores anuais de emissões totais do sistema, seguindo o propósito (similar ao da na análise do Inventário de GEE de 2013) de gerar indicadores que condizem com os indicadores sugeridos pela comissão dos ODSs (BRASIL, 2017) e da norma NBR ISO 37120(ABNT, 2017).

Para fins de tomada de decisão em nível de políticas municipais quanto à distribuição e volume de serviço, entretanto, esse indicador não é favorável, pois desconsidera uma série de variáveis utilizadas pelos tomadores de decisão para dimensionar e planejar o sistema de mobilidade. Essas variáveis podem ser distinguidas pelas variáveis tangíveis, como distâncias percorridas, número de usuários, desempenho do veículo e variáveis intangíveis, como

preferência do usuário por veículo de acordo com a distância, propósito da viagem e questões de conforto ou segurança, consideradas apenas por meio de pesquisas públicas (PMPA, 2019b). Assim, considera-se que o indicador mais adequado para apoiar a tomada de decisão neste nível é aquele que comunica os impactos relativos às variáveis sensíveis às intervenções de acordo com os cenários propostos. Sendo assim, a relação entre variáveis operacionais para o sistema, descrita na análise de diagnóstico para o ano de 2017 no subcapítulo 4.4.1.3, de número de pessoas atendidas nas distâncias percorridas, é utilizada para gerar uma normalização da unidade comum de referência.

Salienta-se que, uma vez que os dados utilizados são agregados numa base anual, os valores da eficiência das rotas, por linha e por horário de deslocamento, são superestimados. Para os fins deste trabalho, dada a indisponibilidade de dados desagregados de entrada e saída de passageiros ao longo das rotas, os valores utilizados geram resultados satisfatórios. Contudo, para informar tomadores de decisão sobre a distribuição do serviço ao longo do território com precisão, sugere-se a análise específica das rotas em questão.

#### 4.1.3.3 Cenários

Para o diagnóstico dos impactos atuais gerados pelo sistema, não são considerados tratamentos de dados ou pressupostos se não aqueles intrínsecos à fronteira do sistema. Para a projeção, políticas públicas já aprovadas e potenciais mudanças são consideradas. Dessa maneira, foram assumidas algumas variações de inventário ao longo do tempo, considerando projeções de mudanças até o ano 2030, cujos cálculos e suposições são descritos no subcapítulo 4.2.1.1 do ICV. A data limite da análise coincide com o período estipulado pelos ODSs para o atingimento das metas para 15 anos, e com a data limite da próxima revisão do plano diretor e plano de mobilidade de Porto Alegre.

#### 4.1.3.4 Alocação e modelo de abordagem

A abordagem de inventário do ciclo de vida utilizado para estas análises foi o modelo atribucional *cut-off*. Esta modelagem utiliza alocação de impactos aos materiais resultantes do primeiro processo de produção. Caso o primeiro processo de produção tenha como resultado mais de um produto comercializável, ou seja, que não precise de nenhum processo subsequente para agregar valor de mercado, a alocação é feita através de critérios de balanço de massa, energético ou financeiro. No caso de produtos recicláveis, os processos de reciclagem não tem impactos alocados, ou, conseqüentemente, benefícios (WERNET et al., 2016).

Dessa maneira, os cenários gerados se baseiam em suposições que podem não refletir a flutuação dos mercados envolvidos ao longo do tempo da análise, considerada de médio prazo. Não são considerados, por exemplo, os benefícios de produção do biodiesel a partir dos resíduos da produção agrícola. Da mesma maneira, não são contempladas mudanças no mercado de produção destes produtos devidas à demanda crescente de biodiesel. A consideração desta e outras limitações são endereçadas nos capítulos 1.3 e 3 deste trabalho.

## 4.2 INVENTÁRIO DO CICLO DE VIDA (ICV)

### 4.2.1 Dados primários

Os dados primários de consumo, rodagem e número de passageiros foram fornecidos sob demanda pela EPTC e ATP. Estes dados foram tratados e reorganizados para o fim de análise nesta pesquisa. Foram fornecidos os seguintes conjuntos de dados utilizados nesta pesquisa:

- a) Histórico anual em escala mensal de rodagem e número de passageiros pagantes (EPTC, 2018);
- b) Total anual de quilômetros rodados por linha segundo bacia de atendimento <sup>3</sup>(APT, 2018);
- c) Tabela descritiva de frota atualizada para os anos de 2017 e 2018 (EPTC, 2018);
- d) Coeficiente médio de consumo de combustível por quilometro rodado de acordo com a tipologia de veículo na frota nos anos de 2017 e 2018 (EPTC, 2018).

Ainda, foram fornecidos dados econômicos sobre custos com manutenção dos veículos para o ano de 2017. Contudo, os mesmos não foram considerados, seguindo o escopo desta análise.

Os dados históricos são utilizados para diagnóstico de tendências discutidas posteriormente. A Tabela 4 mostra o total absoluto de número de quilômetros percorridos por todos os veículos

---

<sup>3</sup> O sistema de transporte de Porto Alegre funciona com o sistema operacional de bacias. Em Porto Alegre, este sistema possui três consórcios de empresas privadas e uma empresa pública, de maneira não haja competição entre linhas de transporte operadas por cada uma destas empresas.

do sistema, bem como o total de passageiros transportados. O período demonstrado é de 15 anos, entre 2002 e 2017.

Tabela 3 - Histórico de distância percorrido e passageiro transportado pelo sistema coletivo de ônibus na cidade de Porto Alegre.

<b>Ano</b>	<b>Rodagem (km)</b>	<b>Nº de passageiros transportados (pessoas)</b>
<b>2002</b>	116.776.026	364.297.176
<b>2003</b>	116.505.039	343.874.025
<b>2004</b>	114.598.054	330.595.796
<b>2005</b>	111.972.806	324.080.140
<b>2006</b>	111.085.414	315.387.657
<b>2007</b>	111.811.492	307.645.885
<b>2008</b>	114.251.455	317.229.344
<b>2009</b>	114.689.467	314.763.431
<b>2010</b>	115.867.519	320.838.663
<b>2011</b>	117.318.010	323.989.555
<b>2012</b>	118.464.249	328.706.834
<b>2013</b>	119.396.972	321.923.051
<b>2014</b>	114.596.335	283.355.837
<b>2015</b>	117.884.002	301.223.100
<b>2017</b>	109.466.148	292.730.912

Fonte: Baseado em EPTC (2018).

Também foi disponibilizada a base de dados de cadastro da frota. A base contém, entre outras, as seguintes informações pertinentes aos veículos: o prefixo dos veículos cadastrados; empresa proprietária; lote; consórcio ao qual pertence; modelo e número do chassi e carroceria; datas de fabricação, compra e emplacamento; características do veículo, como potência, categoria, tipo de câmbio, posição do motor, e presença de ar condicionado, além de tamanho e capacidade; modelo do motor (EURO). A tabela do Anexo A contém um resumo dos dados médios de consumo de combustível por quilometro rodado de acordo com a tipologia de veículo na frota no ano de 2017, como utilizado pela empresa gestora para o cálculo do reajuste tarifário em função do consumo de combustível.

Dados de georreferência para o sistema de transporte coletivo foram retirados da base aberta DataPOA (2019). Foram retirados do site conjunto de dados com o nome, número, tabela horária e bacia de cada linha do sistema da capital gaúcha. Os dados analisados são apresentados posteriormente para auxiliar na análise e discussão dos resultados.

#### 4.2.1.1 Cálculos de cenário segundo dados primários

Os cenários de composição do diesel ao longo do tempo foram gerados considerando a lei nº 13.263, que diz que o diesel vendido deveria ter composição de biodiesel de 8% em 2017, 9

% em 2018 e 10% em 2019. São sugeridas ainda as composições de 20% (B20) e de 30% (B30) a serem consumidas em maiores quantidades até 2030, considerando projeções da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), a partir da Resolução ANP nº 30, de Junho de 2016, que visa incentivar o uso voluntário das misturas B20 e B30, produzidos dentro dos parâmetros estabelecidos pelo Conselho Nacional de Política Energética (CNPE) e garantindo a qualidade do diesel comercializado no Brasil (ANP, 2016).

Assim, pretendeu-se analisar o efeito da substituição gradual do biodiesel no diesel ao longo do tempo no total de impactos ambientais, com base no consumo total em litros deste composto combustível em um ano, segundo valor fornecido pela EPTC para o ano de 2017. São considerados três cenários, todos incluindo as mudanças de composição do combustível já prevista em lei. No primeiro cenário, menos otimista, não haverá futuras alterações na composição do combustível até 2030. O uso de B20 e B30 na frota é sugerido por dois distintos cenários a partir de 2025, considerando uma mudança gradual - para percepção de mudanças em função do uso desse composto combustível. Os impactos foram calculados seguindo as opções apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 - Opções de composto combustível a serem consumidos no transporte coletivo (por kg de combustível).

<b>Processo</b>	<b>B8: 8% Biodiesel; Ano: 2017.</b>	<b>B9: 9% Biodiesel; Ano: 2018.</b>	<b>B10: 10% Biodiesel; Ano: 2019.</b>	<b>B20: 20% Biodiesel; Ano: até 2025</b>	<b>B30: 30% Biodiesel; Ano: até 2025.</b>	<b>Unidade</b>
Diesel, S10	0,920	0,910	0,900	0,800	0,700	kg
Biodiesel	0,080	0,090	0,100	0,200	0,300	kg
Transporte	0,028	0,028	0,028	0,028	0,028	ton*km

Fonte: elaborado pelo autor.

A segunda mudança sugerida é a mudança da eficiência dos veículos conforme a reposição da frota. Em 2017, a frota contava com 1651 veículos, das mais diversas idades, adquiridos desde 2006 a 2016. Ou seja, a partir de 2019 haverá, anualmente, reposição gradual da frota até 2030, conforme os veículos forem atingindo seu tempo de vida útil considerado em lei. Como demonstrado na no Anexo A, na média, os veículos mais eficientes consomem 0,2254 litros de combustível por quilometro rodado. Enquanto isso, a média de eficiência de



consumo entre os menos eficientes é de  $0,7795 \text{ l km}^{-1}$ , consumindo quase 3,5 vezes mais que os anteriores.

A construção deste cenário avalia, então, a porcentagem de reposição de frota ao longo dos anos, sem considerar aumento e redução do volume total da frota. Também leva em consideração a norma municipal que define os requisitos para compra de novos veículos, que diz que “somente será admitida a inclusão de frota no transporte coletivo de ônibus: zero quilômetro; equipados com ar-condicionado e que apresentem chassi e carroceria com idade não superior a dois anos”<sup>4</sup>.

Os consumos de combustíveis para as análises da EPTC são gerados de acordo com a quilometragem percorrida ao longo do ano utilizado como base para o cálculo, e com as características do veículo. Neste estudo de caso, não são consideradas adições de novas linhas, ou aumento de frota ao longo dos próximos anos. Os veículos que atualmente compõem a frota do transporte público em Porto Alegre se dividem entre cinco tipos: Micro, Leve, Pesado, Trucado e Especial. As categorias de consumo, diferenciadas pela própria EPTC, também consideram a diferenciação segundo a posição o motor (central, dianteiro e traseiro), a presença de ar condicionado e o tipo de câmbio (manual, ou automático (Cx)).

Como não se conhecem as tecnologias emergentes a serem inseridas no mercado de ônibus para transporte coletivo, e suas respectivas eficiências, são consideradas as tecnologias e características já conhecidas e utilizadas no sistema de serviço. Sendo assim, considerando as restrições impostas por lei, considerou-se, por suposição, que os veículos estilo Micro motor dianteiro, Leve motor traseiro, Pesado motor dianteiro, serão repostos por veículos estilo Pesado motor dianteiro com ar condicionado. Da mesma maneira, veículos estilo Pesado motor traseiro sem ar condicionado e câmbio automático ou manual serão 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, e aqueles estilo Especial motor traseiro com câmbio automático sem ar substituído por veículos similares, contudo, com ar condicionado. A mudança de acordo com este cenário

---

<sup>4</sup> Notícia segundo a PMPA: <https://prefeitura.poa.br/tarifa2018/composicao>.

Tabela 5 – Estimativa de mudança com substituição da frota (em unidades de veículos) para o período 2017-2030, e respectiva eficiência do sistema considerando as eficiências médias observadas em 2017.

Ano	Micro Dianteiro	Leve Traseiro	Pesado Dianteiro	Pesado Dianteiro Ar	Pesado Traseiro	Pesado Traseiro Ar	Pesado Traseiro Cx	Pesado Traseiro Ar Cx	Trucado Dianteiro	Especial Dianteiro	Especial Central Cx*	Especial Central Ar Cx	Especial Traseiro Cx	Especial Traseiro Ar Cx	Total	Eficiência Sistema (l/km)
2017	1	26	655	<b>144</b>	182	<b>127</b>	130	<b>219</b>	8	12	14	<b>30</b>	60	<b>43</b>	1651	0,476
2018	1	26	655	<b>144</b>	182	<b>127</b>	130	<b>219</b>	8	12	14	<b>30</b>	60	<b>43</b>	1651	0,476
2019	1	22	557	<b>246</b>	182	<b>127</b>	125	<b>224</b>	1	12	14	<b>37</b>	58	<b>45</b>	1651	4,81E-01
2020	1	0	430	<b>395</b>	180	<b>129</b>	125	<b>224</b>	0	12	14	<b>38</b>	58	<b>45</b>	1651	4,86E-01
2021	0	0	348	<b>478</b>	156	<b>153</b>	83	<b>266</b>	0	0	14	<b>50</b>	58	<b>45</b>	1651	4,91E-01
2022	0	0	282	<b>544</b>	89	<b>220</b>	71	<b>278</b>	0	0	14	<b>50</b>	58	<b>45</b>	1651	4,94E-01
2023	0	0	220	<b>606</b>	50	<b>259</b>	64	<b>285</b>	0	0	14	<b>50</b>	29	<b>74</b>	1651	4,97E-01
2024	0	0	114	<b>712</b>	26	<b>283</b>	46	<b>303</b>	0	0	14	<b>50</b>	15	<b>88</b>	1651	5,01E-01
2025	0	0	66	<b>760</b>	14	<b>295</b>	16	<b>333</b>	0	0	14	<b>50</b>	4	<b>99</b>	1651	5,03E-01
2026	0	0	54	<b>772</b>	14	<b>295</b>	15	<b>334</b>	0	0	14	<b>50</b>	1	<b>102</b>	1651	5,03E-01
2027	0	0	54	<b>772</b>	14	<b>295</b>	15	<b>334</b>	0	0	14	<b>50</b>	1	<b>102</b>	1651	5,03E-01
2028	0	0	54	<b>772</b>	14	<b>295</b>	15	<b>334</b>	0	0	14	<b>50</b>	1	<b>102</b>	1651	5,03E-01
2029	0	0	0	<b>826</b>	0	<b>309</b>	0	<b>349</b>	0	0	14	<b>50</b>	0	<b>103</b>	1651	5,05E-01
2030	0	0	0	<b>826</b>	0	<b>309</b>	0	<b>349</b>	0	0	14	<b>50</b>	0	<b>103</b>	1651	5,05E-01
Eficiência média em 2017 (l/km)	2,25E-01	3,59E-01	3,98E-01	4,43E-01	4,58E-01	4,89E-01	5,32E-01	5,53E-01	4,32E-01	5,12E-01	7,41E-01	7,80E-01	7,08E-01	7,29E-01	4,72E-01	

\* Nenhum dos veículos terá atingido o tempo de vida útil para troca;

Tipo de veículos: Micro; Leve; Pesado; Trucado; ou Especial;

Posição do motor: Dianteiro; Traseiro; ou Central;

Possui ar condicionado: "Ar";

Possui câmbio automático: "Cx".

Fonte: elaborado pelo autor.

Tabela 6 - Cenários de mudanças ao longo do tempo segundo as variáveis propostas neste trabalho.

Variável	Combustível (tipo de Diesel, S10, cDBXX)			Eficiência (l/km)	Rodagem (km)		Passageiros (p)	
Ano	cDB10	cDB20	cDB30	FE	Re	Rf	Pe	Pf
2017	B8	B8	B8	4,76E-01	1,09E+08	1,09E+08	2,66E+08	2,66E+08
2018	B9	B9	B9	4,76E-01	1,09E+08	1,14E+08	2,66E+08	2,83E+08
2019	B10	B10	B10	4,81E-01	1,09E+08	1,14E+08	2,66E+08	2,79E+08
2020	B10	B10	B10	4,86E-01	1,09E+08	1,14E+08	2,66E+08	2,75E+08
2021	B10	B10	B10	4,91E-01	1,09E+08	1,14E+08	2,66E+08	2,71E+08
2022	B10	B10	B10	4,94E-01	1,09E+08	1,15E+08	2,66E+08	2,67E+08
2023	B10	B10	B10	4,97E-01	1,09E+08	1,16E+08	2,66E+08	2,63E+08
2024	B10	B10	B10	5,01E-01	1,09E+08	1,17E+08	2,66E+08	2,59E+08
2025	B10	B10	B10	5,03E-01	1,09E+08	1,17E+08	2,66E+08	2,56E+08
2026	B10	B10 (90%) B20 (10%)	B10 (90%) B30 (10%)	5,03E-01	1,09E+08	1,17E+08	2,66E+08	2,52E+08
2027	B10	B10 (75%) B20 (25%)	B10 (75%) B30 (25%)	5,03E-01	1,09E+08	1,17E+08	2,66E+08	2,48E+08
2028	B10	B10 (50%) B20 (50%)	B10 (50%) B30 (50%)	5,03E-01	1,09E+08	1,16E+08	2,66E+08	2,44E+08
2029	B10	B10 (25%) B20 (75%)	B10 (25%) B30 (75%)	5,05E-01	1,09E+08	1,15E+08	2,66E+08	2,40E+08
2030	B10	B20	B30	5,05E-01	1,09E+08	1,14E+08	2,66E+08	2,36E+08

**Legenda:**

cDBXX: composto combustível diesel com “XX” porcentagem de substituição por biodiesel até 2030(ex.: cDB10, 10% de biodiesel);

FE: fator de eficiência; cenário único dada a substituição de frota;

Re: valor médio de rodagem ao ano no cenário estacionário; Rf: valor médio de rodagem ao ano no cenário fictício;

Pe: valor médio de passageiros ao ano no cenário estacionário; Pf: valor médio de passageiros ao ano no cenário fictício.

Fonte: elaborado pelo autor

fictício pode ser observada na Tabela 5, bem como o valor da eficiência média do sistema em função do número de veículos de cada estilo e sua eficiência correspondente no ano de 2017.

Os valores de rodagem em quilômetros também foram simulados em dois cenários. O primeiro, estacionário, considera que a tabela horária e rotas não seriam alteradas nos próximos anos, mantendo o valor de 109,5 milhões de quilômetros rodados no ano de 2017. Um cenário fictício considera mudanças no valor de rodagem anual segundo o cálculo do crescimento previsto usando dados existentes e a equação para tendência em crescimento exponencial<sup>5</sup>.

Por último a variável “número de passageiros” também é incluída na análise. Da mesma maneira que os valores de rodagem, dois cenários são criados, um estacionário e outro fictício. O estacionário considera o valor de passageiros transportados no ano de 2017, de 266 milhões de passageiros, como se repetindo ao longo dos próximos anos até 2030. O cenário fictício considera mudanças no volume anual de passageiros utilizando a série histórica em uma análise de regressão linear. Os valores para cada variável segundo os cenários apresentados acima estão resumidas na Tabela 6.

#### **4.2.2 Dados secundários**

Para a avaliação do impacto do ciclo de vida do transporte em Porto Alegre, foram utilizados dados secundários baseados na literatura e na base de dados Ecoinvent, versão 3.3 (ECOINVENT, 2018). Como descrito no sistema de fronteiras (subcapítulo 4.1.3.1), foram inventariados os processos de produção do diesel (desde a extração ao produto final), a produção do biodiesel, o transporte do produto composto até a garagem das prestadoras de serviço de transporte na cidade de Porto Alegre, bem como o uso deste produto (combustão). Como estabelecido anteriormente, são excluídos processos de produção e manutenção dos ônibus, bem como da infraestrutura civil (pavimentação). Não são consideradas eventuais emissões derivadas do processo de mistura dos combustíveis.

O diesel que serve de base para a adição de biodiesel é o diesel de baixo teor de enxofre S10. Segundo a empresa de transporte público de Porto Alegre, o diesel bruto utilizado na mistura

---

<sup>5</sup> Utilizando a equação *GROWTH* do software Excel.

é o diesel S10, de baixo teor de enxofre, utilizado em toda a frota. De acordo com a Petrobras, uma companhia nacional produtora de diesel, esse diesel contém um teor máximo de enxofre de 10 miligramas para cada 1.000.000 miligramas do produto (PETROBRAS, 2018a). O teor padrão de biodiesel na mistura, de acordo com a Lei nº 13.263, é de 8% (PETROBRAS, 2018b).

Para garantir a melhor representatividade geográfica e tecnológica dos resultados, foi utilizada uma adaptação dos dados criados por Viana (2008). Os inventários completos segundo Viana (2008) são apresentados no Anexo B. Foram ainda adicionados os valores de emissões para o processo de uso, ou seja, combustão do óleo diesel de acordo com CETESB (2017) e de combustão do biodiesel de acordo com Zhu *et al.* (2009). Os dados acrescentados aos processos analisados estão sumarizados na Tabela 7 – os valores são referentes à combustão de 1kg do respectivo combustível.

Ressalta-se que os fatores de emissão por combustão do diesel segundo CETESB (2017) não são especificados conforme a categoria do motor considerado. Contudo, segundo as conclusões deste relatório, os motores são potencialmente de categoria inferior ao EURO VI, uma vez que o mesmo é sugerido como possível melhoria. A categoria do motor é especialmente relevante quanto à emissão de material particulado, podendo afetar categorias de impacto como Toxicidade Humana.

Tabela 7 - Dados de emissões para combustão dos combustíveis diesel e biodiesel.

Fluxos de saída	Categoria	Para 1 kg de Diesel	Para 1 kg de Biodiesel	Unidade
<i>Carbon dioxide</i>	<i>Emission to air</i>	3,25E+05	-	kg
<i>Carbon monoxide</i>	<i>Emission to air</i>	1,43E-03	2,70E-04	kg
<i>Hydrocarbons, unspecified</i>	<i>Emission to air</i>	3,25 E-05	6,48 E-05	kg
<i>Methane</i>	<i>Emission to air</i>	1,50E-04		kg
<i>Nitrogen oxides</i>	<i>Emission to air</i>	7,25E-03	6,50E-04	kg
<i>Nitrous oxide</i>	<i>Manufacture of fertilizers</i>	7,5 E-05		kg
<i>Particulates, unspecified</i>	<i>Emission to air</i>	5,25 E-05	1,90 E-08	kg

Fonte: Baseada em CETESB( 2017) e ZHU et al. (2009).

Quanto ao transporte do composto combustível, supõe-se que o mesmo venha da refinaria mais próxima e também fornecedora do produto na região (Refap<sup>6</sup>). Supõe-se, ainda, que o produto final seja transportado desde a refinaria até a garagem da empresa de ônibus cliente através do escoamento simples por caminhões pipa, uma vez que se trata do melhor valor econômico de transporte para esta distância. Supondo a distância média como sendo a distância da Refap até a garagem da empresa Carris (maior operadora de frota de transporte de ônibus de Porto Alegre), tem-se, em média, 28km percorridos.

Considerou-se a capacidade de um caminhão tanque de 30 mil litros. A densidade média do óleo diesel S10 é igual a 0,834 g/mL (PETROBRAS, 2018c). Sendo assim, tem-se uma massa média transportada média de 25,02 toneladas. Tendo-se 28 km percorridos, segundo os cálculos da base (ECOINVENT, 2018) considerados o valor a ser inserido na análise é de:

$$Ton * km = \frac{(25,02ton \times 28km) \times 1kg}{25020 kg} = 0,028 \text{ metric ton} * km \quad \text{Equação 1}$$

A partir dos resultados da Equação 1, o dado para transporte da base Ecoinvent de carga por caminhão (*transport, freight, lorry 16-32 metric ton, EURO3*) foi utilizado. Estes e demais dados de entrada para estes processos adaptados foram retirados da base de dados Ecoinvent, versão 3.3 (ECOINVENT, 2018).

#### 4.2.3 Qualidade dos dados, Sensibilidade e Incertezas

Segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a), a definição e classificação da qualidade dos dados é essencial para disponibilização dos resultados para fins de comparação. Os dados coletados podem ser classificados de acordo com i) a cobertura temporal, ii) cobertura geográfica, iii) a cobertura tecnológica, iv) completeza, v) consistência, e vi) representatividade e vii) incertezas. As análises quantitativas de sensibilidade e incertezas dos dados primários e secundários de inventário e do inventário modificado para definição de cenários futuros fogem do escopo deste trabalho. Contudo, uma análise qualitativa é indicada a seguir.

---

<sup>6</sup> Refinaria Alberto Pasqualini (Refap): <http://www.petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/refinarias/refinaria-alberto-pasqualini-refap.htm>

Os dados primários de consumo, rodagem e número de passageiros foram fornecidos sobre demanda pela EPTC e ATP. Dessa maneira, eles representam valores reais de dados coletados *in-loco* por estas empresas para o ano inicial da análise (2017). A qualidade e completeza de ambos os dados mencionados, segundo todos os critérios estabelecidos na norma, são consideradas elevadas, uma vez que representam os dados reais do sistema estudado na totalidade da sua cobertura geográfico, temporal e tecnológico, da maneira como foram fornecidos. Apesar de possuírem diferentes resoluções temporais, os dados são completos e atualizados, e advindos de uma fonte segura.

Quanto ao critério tecnológico, a análise de impactos dos processos de produção do diesel e biodiesel, bem como de sua combustão, é produzida de acordo com dados de inventário retirados da literatura (CETESB, 2017; VIANA, 2008; ZHU et al., 2009). Demais dados secundários são retirados de dados da base Ecoinvent, versão 3.3. Apesar de não serem dados coletados, a adaptação dos dados de inventário tecnológico é considerada satisfatória uma vez que segue a literatura e aos dados disponíveis pelos produtores e distribuidores dos produtos no contexto nacional. Contudo, os dados estão temporalmente deslocados, em cerca de 10 anos (VIANA, 2008; ZHU et al., 2009), com exceção ao dado da CETESB (2017). Isso significa que a cobertura tecnológica também pode estar deturpada. Estas e outras incertezas geradas pelo uso destes dados podem ser relevantes, mas não são consideradas limitantes no escopo do trabalho, uma vez que são parte da literatura mais recentes encontrada dentro da cobertura geográfica desejada (Brasil).

### 4.3 AVALIAÇÃO DE IMPACTO DO CICLO DE VIDA

De acordo com Loiseau *et al.* (2018), métodos de Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV) para ACV territorial devem contar principalmente com modelagens específicas para emissões e impactos locais, podendo-se utilizar SIG para este efeito. Contudo, como citado pelos autores, a complexidade dos sistemas de produto que incluem processos primários e secundários ocorrendo em lugares distintos dificulta a prática de regionalização de métodos de caracterização de impactos. O mesmo se aplica a este trabalho, uma vez que não existem métodos de caracterização de impacto disponíveis para o Brasil e suas diferentes regiões. Dessa maneira, diferentes métodos de caracterização foram escolhidos, de acordo com as categorias de impacto relacionadas. As categorias de impacto escolhidas para avaliação são

aquelas relevantes para o sistema estudado, além de categorias relacionadas aos indicadores dos ODSs.

Veículos pesados (ônibus e caminhões) são responsáveis pela maior fração das emissões de óxidos de nitrogênio e de enxofre, enquanto que os veículos leves (automotores de passeio e de uso misto), movidos à gasolina e a álcool, são os principais emissores de monóxido de carbono e hidrocarbonetos (TEIXEIRA; FELTES; DE SANTANA, 2008). Os principais produtos gerados pela combustão dos combustíveis são dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e vapor de água (H<sub>2</sub>O). Outros gases gerados são o monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos (HC), óxidos nitrosos (NO<sub>x</sub>), compostos de enxofre (SO<sub>x</sub>), material particulado (MP), dentre outros, tais como dioxinas, ocasionando direta ou indiretamente impactos ambientais e problemas à saúde humana (COSTA, 2016; TEIXEIRA; FELTES; DE SANTANA, 2008).

Além destas emissões, foram considerados alguns indicadores específicos sugeridos pela ONU (UN, 2016) para os ODS que podem ser medidos a partir das categorias contempladas pelo método. O objetivo número 9, “construir infraestruturas resilientes, promover a industrialização inclusiva e sustentável e fomentar a inovação”, prevê a modernização dos setores da indústria a partir do uso mais eficiente de recursos e maior adoção de tecnologias limpas e ambientalmente amigáveis. Para isso, os indicadores ODS propõem a caracterização de emissão de CO<sub>2</sub> por unidade de valor agregado. Além deste, o objetivo número 3, “garantir o acesso à saúde de qualidade e promover o bem-estar para todos, em todas as idades”, prevê a caracterização de morte decorrente de doenças respiratórias. Ambos indicadores sugeridos foram adaptados às Categorias de Impacto definidas por métodos de caracterização de impacto existentes.

Dessa maneira, cinco categorias de impacto foram escolhidas para análise neste estudo: esgotamento de recursos abióticos - combustíveis fósseis (ADP-f); potencial de aquecimento global (GWP); potencial de acidificação (PA); potencial de oxidação fotoquímica (POCP); toxicidade humana (HTP). As categorias são resumidas na Tabela 8. Uma breve descrição do impacto caracterizado segundo a categoria também é demonstrada na Tabela 8, baseada em Moraga (2017). A avaliação de impacto ambiental do sistema foi gerada pelo software OpenLCA, segundo os fatores de categorização disponibilizados pelo “Ecoinvent v.3.3 LCIA methods” e “OpenLCA LCIA methods v1.5.6” (OPENLCA, 2018).



Tabela 8 - Categorias de Impacto segundo e descrição de impacto

<b>Categoria de Impacto</b>	<b>Sigla</b>	<b>Unidade</b>	<b>Método de caracterização</b>	<b>Descrição</b>
<b>Depleção potencial de recursos abióticos – elementos fósseis ( do inglês, <i>depletion of abiotic resources - fossil fuels</i>)</b>	<b>ADP-f</b>	MJ	CML 2001 (GUINÉE et al., 2002)– segundo recomendação RAICV (IBICT, 2019)	Depleção de reservas de recursos fósseis, não distinguidos entre si. Escolha baseada no uso de combustíveis de fontes fósseis em comparação a combustíveis de fonte renovável;
<b>Potencial de aquecimento global – horizonte de 100 anos ( do inglês, <i>Global Warming Potential</i>)</b>	<b>GWP</b>	kg CO <sub>2</sub> eq.	IPCC 2013 – acordo comum na bibliografia	Emissões de CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , hidrocarbonetos e outros poluentes, relacionadas principalmente ao aumento da temperatura terrestre; Escolha baseada nas emissões de combustão e no ODS nº 9 (UN, 2016);
<b>Potencial de acidificação de solo e água (do inglês, <i>acidification potential</i>)</b>	<b>AP</b>	kg SO <sub>2</sub> eq.	ReCiPe 2016 – segundo recomendação RAICV (IBICT, 2019)	Emissões de SO <sub>x</sub> , NO <sub>x</sub> e amônio (NH <sub>3</sub> ) que quando no ar reagem e podem gerar chuvas ácidas; escolha baseada na emissões dos respectivos poluentes no processo de combustão;
<b>Potencial de formação de ozônio fotoquímico – alto teor de NO<sub>x</sub> (do inglês, <i>photochemical oxidation - high NO<sub>x</sub></i>)</b>	<b>POCP</b>	kg NMVO C	ReCiPe 2008 – segundo recomendação ILCD (FAZIO et al., 2018)	Reação entre CO, NO <sub>x</sub> e outros poluentes em contato com a luz solar, gerando oxidantes fotoquímicos; escolha baseada na emissões dos respectivos poluentes no processo de combustão;
<b>Potencial de toxicidade humana (do ingles, <i>human toxicity</i>)</b>	<b>SH-ER</b>	kg PM2.5 eq.	ILCD 2016 – segundo recomendação ILCD (FAZIO et al., 2018)	Indicador que reflete potenciais problemas a saúde humana causados pela emissões de químicos a atmosfera (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2014); escolha baseada na emissões dos respectivos poluentes no processo de combustão e no ODS nº 3 (UN, 2016);

Fonte: elaborado pelo autor.

Como não existem métodos de caracterização de impacto disponíveis no software e nas bases de dados da ACV para o contexto brasileiro e suas diferentes regiões, a literatura foi consultada. De acordo com a recomendação do ILCD (FAZIO et al., 2018) e RAICV (IBICT, 2019), o método de caracterização escolhido para AP e HTP é o ReCiPe 2008; para o POCP é o ReCiPe 2008; para ADP-f e GWP é o CML 2002. Para a categoria de impacto de potencial

de acidificação, os fatores de impacto para emissão de gases NO<sub>x</sub>, NH<sub>3</sub> e SO<sub>2</sub> foram adaptados para corresponder aos fatores regionalizados segundo a versão ReCiPe 2016 (HUIJBREGTS et al., 2016).

Uma das limitações importantes deste trabalho para a análise dos impactos segundo diferentes categorias é que foram avaliados os dados agregados de cada processo, considerando desde a extração dos produtos da natureza até a etapa de uso no sistema de produto em uso, como descrito no método.

## 4.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os resultados das análises são apresentados neste subcapítulo seguindo a sequência estabelecida anteriormente. A primeira parte deste subcapítulo apresenta o diagnóstico de impactos segundo as variáveis apresentadas no subcapítulo 4.1.3 e segundo as características do sistema em 2017. Enquanto na segunda parte, os resultados são apresentados a partir da projeção conjunta das mudanças de cenários nos impactos ambientais.

### 4.4.1 Caracterização das variáveis do sistema

#### 4.4.1.1 Biodiesel

A avaliação de impacto ambiental do diagnóstico inicial do sistema foi calculada pelo software OpenLCA. Os resultados foram combinados de acordo com os cenários para diferentes proporções de biodiesel no diesel, resumidos na Figura 11. Os resultados de impacto ambiental para uma unidade de energia que representa, neste caso, o trabalho gerado pela combustão (em MJ) são apresentados. Estes resultados consideram a equivalência de poder calorífico dos combustíveis, uma vez que o biodiesel possui poder calorífico ligeiramente menor que o diesel. Consideram-se os valores de poder calorífico conforme a Tabela 9. A distribuição da equivalência foi calculada de acordo a eficiência em MJ por litro de combustível consumido. Uma vez que os resultados advindos do inventário são obtidos segundo o valor em massa, as análises consideram as massas específicas dos combustíveis para o cálculo de volume de consumo. As massas específicas para cada um dos combustíveis é assumida como sendo proporcional ao mistura entre diesel e biodiesel, sendo que para o diesel é considerada uma massa específica de 0,84 kg/L e para o biodiesel de 0,88 kg/L (VIANA, 2008). A Tabela 9 ainda apresenta a variação percentual de eficiência dos combustíveis

quando comparadas ao combustível comercial do ano de 2017 (B8). Nota-se que a variação percentual dada à função energia para um litro de combustível não é expressiva.

Tabela 9 - Equivalência funcional do combustível segundo o poder calorífico.

<b>Poder calorífico</b>	<b>Massa específica (kg/l)</b>	<b>Poder calorífero (MJ/litro)</b>	<b>Varição de eficiência (%)</b>
<b>Diesel</b>	0,840	36,120	-
<b>Biodiesel</b>	0,880	34,408	-
<b>B8</b>	0,843	35,995	-
<b>B9</b>	0,844	35,979	-0,044
<b>B10</b>	0,844	35,963	-0,088
<b>B20</b>	0,848	35,803	-0,533
<b>B30</b>	0,852	35,639	-0,987

Fonte: elaborado pelo autor. Baseado em Viana (2008).

Os resultados (Figura 11) mostram que, para os impactos de potencial de acidificação (AP) e efeitos respiratórios (SH-ER), a diferenças de impacto entre os diferentes combustíveis são mínimas. Isso porque, apesar do potencial de emissões para estas duas categorias de impacto reduzir de acordo com a substituição do diesel, o biodiesel se comporta de maneira muito similar. De fato, para o AP, os impactos para um litro de combustível diesel é de  $7,92E-03$  kg  $SO_2$  eq., enquanto o impacto para um litro de biodiesel de é de  $7,50E-03$  kg  $SO_2$  eq., sendo este último valor de 95,03% do valor do anterior. Para os impactos de SH-ER, a diferença entre valores é de  $4,30E-04$  kg  $PM_{2.5}$  eq do diesel, para  $3,55E-04$  kg  $PM_{2.5}$  eq, representando igualmente por 82,46 do valor total para o diesel. Contudo, para efeitos de substituição, dada a equivalência calorífica, ambos os impactos demonstrados possuem tendências opostas. Enquanto os SH-ER reduzem com a substituição de biodiesel no diesel, os impactos de AP aumentam dada a pequeníssima diferença de impacto de produção entre combustíveis. Os gases contabilizados para os efeitos de impacto de acidificação são o dióxido de enxofre ( $SO_2$ ) e óxidos de nitrogênio ( $NO_x$ ). Isso inclui não só as emissões de escapamento, como pode incluir, segundo o método do IPCC, o uso de fertilizantes (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2014). Dessa maneira, se explica a baixa redução por kg de combustível.

Já os SH-ER avaliam os danos à saúde humana decorrentes das emissões externas e internas de material particulado ( $PM_{2.5}$  equivalente, considerada o principal responsável pelos impactos na saúde humana) primário e secundário em áreas urbanas e rurais. O modelo utilizado na avaliação (FAZIO et al., 2018) não fornece caracterização para emissões:  $PM_{2.5}$

e PM10 como efeitos primários; e NH<sub>3</sub>, CO, NO<sub>x</sub>, SO<sub>2</sub>, e SO<sub>3</sub> através de efeitos secundários (FAZIO et al., 2018; UNEP, 2016). Na produção do biodiesel de girassol, compostos fósseis derivados do refino do petróleo também são utilizados. Os usos principais na cadeia do biodiesel são nas atividades de transporte e na geração de energia térmica. Ambas as atividades são incluídas no inventário de Viana (2008), bem como outras fontes de energia elétrica usada na produção do biodiesel. Sendo assim, em função dos processos de queima deste e outros produtos da cadeia do biodiesel, os impactos do ciclo de vida de SH-ER para 1L deste produto também não são tão diferentes do impacto para 1L de diesel. Ainda assim, essa diferença é mais significativa que para a categoria de impacto discutida anteriormente (AP). Neste caso, a diferença é de aproximadamente 5,85% de redução na substituição de 30% no combustível.

O ozônio fotoquímico é formado pela reação de compostos orgânicos voláteis e óxidos de nitrogênio na presença de calor e luz solar. O impacto final dependerá das quantidades de monóxido de carbono (CO), dióxido de enxofre (SO<sub>2</sub>), óxido de nitrogênio (NO), amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e NMVOC (compostos orgânicos voláteis não-metano) emitidos ao longo do processo (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2014). Apesar da emissão desses compostos ser menor na fase de combustão do biodiesel em relação ao diesel, as emissões relativas ao processo de produção do biodiesel, segundo o processo avaliado por Viana (2008), indicam maiores impactos provocados pela fase de produção de 1 kg de biodiesel. Os resultados da Figura 11 indicam que ainda assim, as reduções devido à substituição podem ser significativas. Entre os impactos de um MJ gerado por combustível B8 (2,89E-04 kg NMVOC) e o de maior quantidade de biodiesel – B30 – (2,67E-04 kg NMVOC), tem-se uma redução de 7,42% dos impactos de produção e uso do combustível, demonstrando um ganho em desempenho ambiental segundo essa categoria.

Da mesma maneira, por utilizar parte de recursos fósseis para a produção, o biodiesel também possui contribuição para o impacto de depleção de recursos abióticos fósseis (ADP-f). Contudo, essa contribuição não é tão significativa quanto é a redução do consumo destes recursos pela substituição do combustível diesel. A ADP-f demonstra uma redução nos impactos finais conforme o esperado, uma vez que o diesel é produto do refino do petróleo, um recurso fóssil; enquanto o biodiesel é fonte de energia renovável, neste caso, vindo da produção de sementes de girassol.

As mudanças mais significativas são observadas no potencial de impacto de aquecimento global (GWP). Além de ser o impacto que mais afeta as atividades econômicas, GWP é o mais difícil de ser controlado dada a escala global de emissões (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2014). Ele é derivado de emissões de GEE liberado em grande parte das atividades humanas, que geram mudanças climáticas quando associados ao efeito estufa. Apesar de não haver um consenso de quanto o aumento das emissões afetam o clima, este impacto é associado a distúrbios climáticos, desertificação, aumento dos níveis do mares e propagação de doenças (ACERO; RODRÍGUEZ; CIROTH, 2014). É neste impacto que a maioria dos esforços internacionais estão focados.

Neste estudo de caso, como demonstrado na Figura 11, o GWP mostra que os impactos de emissões de dióxido de carbono equivalente para o biodiesel de óleo de girassol são negativos. Isso porque, segundo Viana (2008), apesar da produção dos grãos de girassol para aproximadamente 1.000 kg de biodiesel emitir 1.523 kg de CO<sub>2</sub> eq, as plantas “sequestram” (absorvem) cerca de 33.600 kg de CO<sub>2</sub> eq. Sendo assim, considerando o sequestro de carbono na fase de produção do girassol, há um saldo de -32.077 kg de CO<sub>2</sub> eq por tonelada de biodiesel produzido. Ao final de todo o processo de produção do biodiesel, o balanço de emissões ainda é negativo, representado cerca de -32.153 kg de CO<sub>2</sub> eq.

Os resultados deste trabalho demonstram essa relação. Para um 1MJ gerados por combustível diesel puro as emissões calculadas são de 8,90E-02 kg CO<sub>2</sub> eq., e a soma das emissões e das absorções alocadas para 1MJ gerados por biodiesel puro é de -2,83E-02 kg CO<sub>2</sub> eq. Na Figura 11, o impacto potencial de GWP das misturas é representado pela barra hachurada. Observa-se que, para a substituição de 30% de diesel por biodiesel de girassol (B30), a redução de emissões é significativa. Segundo o diagnóstico, dada as equivalências entre combustíveis e os cenários atual (B8) e o mais otimista prevista (B30), a redução de impactos por litro de combustível consumido chegaria a 88,52% (uma diferença de 6,00E-02kg CO<sub>2</sub> eq. emitidos por litro).

Figura 11 - Impactos ambientais por mistura de combustível segundo a porcentagem de biodiesel no combustível a base de diesel: B8 (8% biodiesel); B9 (9% biodiesel); B10 (10% biodiesel); B20 (20% biodiesel); e B30 (30% biodiesel) a partir da unidade de análise de 1 MJ.



Fonte: elaborado pelo autor.

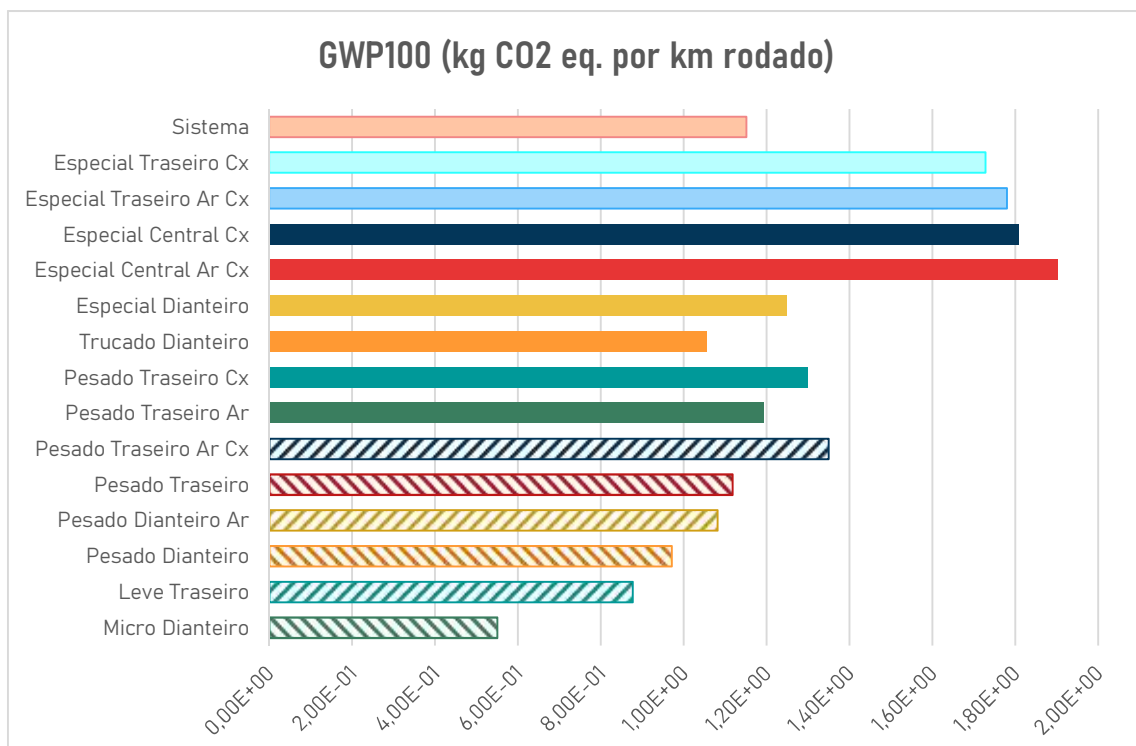
#### 4.4.1.2 Características dos veículos da frota

Neste subcapítulo, a eficiência de cada tipo de veículo segundo suas características é analisada. Os resultados (Figura 12) mostram que a tendência da eficiência de consumo dos

veículos de diferentes categorias é traduzida para os impactos conforme o comprimento, e, conseqüentemente, o peso dos veículos. Seguindo a ordem de classificação, a posição do motor também influencia níveis de consumo e seus impactos. A posição dianteira é apresentada como a menos impactante entre as possibilidades, seguida da posição traseira, e, por fim, a posição central. Isso indica que o tempo de resposta de ignição pode ser relevante para análise dos impactos ambientais de ônibus.

A presença de ar condicionado é menos impactante do que a presença de câmbio automático, contudo, quando combinados, apresentam os maiores valores de impacto para todos os tipos de veículos analisados. As tendências de substituição de veículos indicam que, por lei, todos os veículos novos devem ter ar condicionado, contudo, não necessariamente câmbio automático. Para veículos pesados, a diferença entre veículos com motor traseiro com ar condicionado, com ou sem câmbio automático, é de 0,156 kg de CO<sub>2</sub> eq, acréscimo de 13% em relação ao impacto dos veículos sem câmbio automático.

Figura 12 - Potencial de aquecimento global (GWP100) em função das características dos veículos da frota no ano de 2017, em que o combustível utilizado era o B8 (em kg CO<sub>2</sub> por km rodado).



Fonte: elaborado pelo autor.

A NBR 15570 (ABNT, 2009c), “Transporte — Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros”, indica que o

sistema tipo automático é ainda uma exigência da legislação brasileira para os veículos articulados (EBINA, 2015). Sendo assim, nas características da frota atual, para a redução dos impactos em função de critérios mecânicos, a única opção possível para se priorizar, segundo critérios de emissões de CO<sub>2</sub>, são os veículos de câmbio manual em veículos pesados. Quanto à posição do motor, também se indica a priorização da posição dianteira, sendo esta a mais eficiente e, conseqüentemente, a menos impactante.

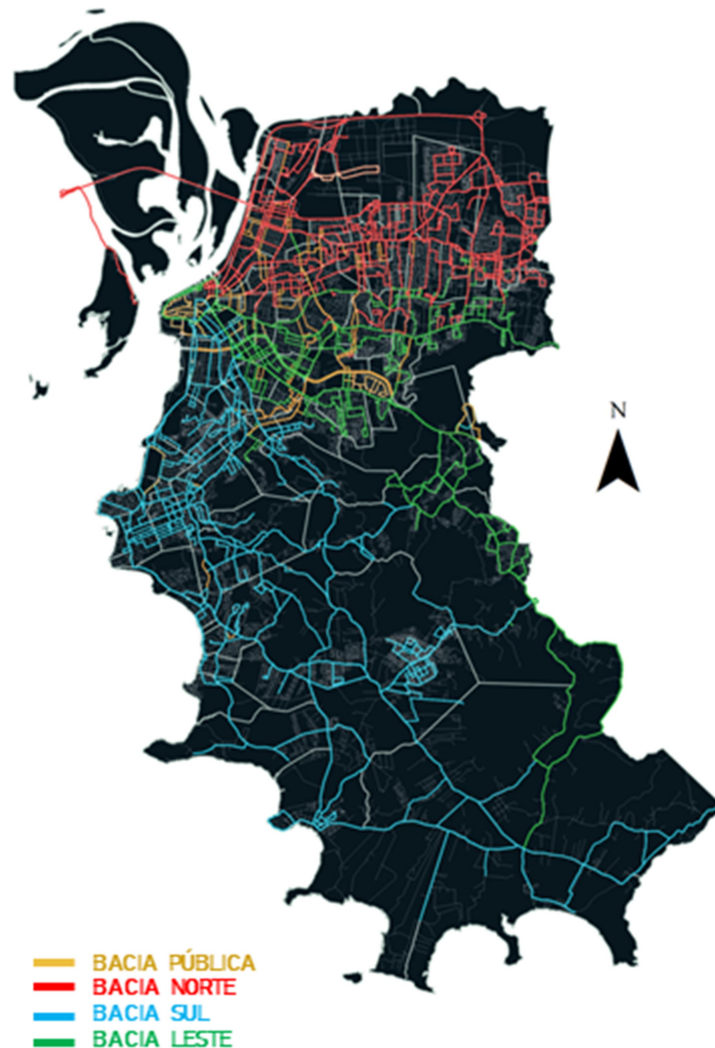
Por estarem diretamente relacionados à eficiência média de consumo das categorias de veículos, os resultados para todas as categorias de impacto avaliadas neste trabalho apresentam a mesma tendência. Contudo, como a base de dados da EPTC também possui dados específicos para todos os veículos da frota, indica-se que, para uma avaliação mais precisa dos impactos absolutos, o diagnóstico final deve considerar os valores especificados na base de dados. Esta avaliação está fora do escopo deste estudo, mas é indicada para uso em tomada de decisão.

#### 4.4.1.3 Variáveis de operação

A Figura 13 mostra o sistema de transporte coletivo por ônibus em Porto Alegre segundo as bacias de atendimento (região), segundo os geodados abertos obtidos pelo sítio do DataPOA (2019). A diferenciação segue o padrão de dados disponíveis. Os veículos que operam na região central e as linhas transversais são representados pela cor ocre/bege. Já os trajetos da região Norte são representados pelas linhas vermelhas, os da região Leste por linhas verdes e da região Sul pelas linhas azuis. Contudo, a diferenciação está desatualizada. Em 2012, após a inauguração estádio do time de futebol Grêmio Futebol Portoalegrense, localizado na região norte da cidade, as cores das bacias norte e sul foram invertidas, para que correspondessem as cores dos times de futebol estabelecidos nestas regiões. As cores desatualizadas foram mantidas para que não fossem interferidas as relações de dados conforme obtidos pela fonte (DATAPOA, 2019).



Figura 13 - Sistema de transporte público por ônibus em Porto Alegre segundo as bacias de atendimento.



Fonte: elaborado pelo autor, com base em DataPOA (2019).

O gráfico na Figura 14 mostra o histórico de volume de passageiros ao longo dos anos no período entre os anos de 2002 e 2017. O gráfico demonstra uma tendência clara, em que o maior número de passageiros utiliza as linhas da bacia sul, com um volume de passageiros em média 13% maior que o volume atendido pela bacia norte. Enquanto não há grandes distinções de volume total de passageiros nas bacias pública e leste, entre as mesmas e a bacia norte a diferença média de volume ao longo dos anos é de 8%.

Pode-se observar uma queda gradual no número de passageiros pagantes entre os anos de 2002 e 2007, com um leve crescimento entre 2008 e 2013 nas linhas da bacia sul e norte, enquanto no mesmo período há uma leve oscilação entre as demais bacias. A partir de 2014, o número médio de passageiros por bacia por ano volta a reduzir, mantendo a tendência até

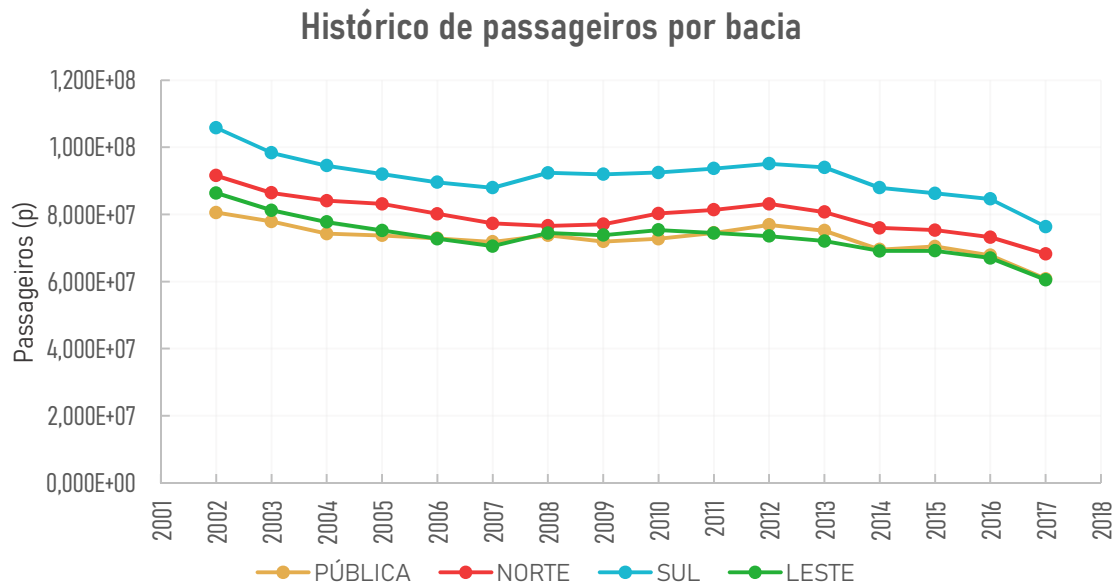
2017, último ano com dados disponíveis para esta pesquisa. Salienta-se no histórico que em 2014 houve programações especiais em função dos eventos da Copa do Mundo de Futebol. A queda no número de passageiros transportados a partir de 2015 coincide com o início da oferta de transporte por aplicativo.

Uma vez que a eficiência do serviço de transporte coletivo está relacionada ao número de passageiros transportados por distâncias fixas percorridas, a Tabela 10 mostra a razão entre quilômetros rodados e passageiros transportados mensalmente no ano 2017 de acordo com os lotes de veículos. Os lotes 1 e 2 atendem à bacia Norte; os lotes 3 e 4, à bacia Sul; os lotes 5 e 6, à bacia Leste; e o Lote 7, à bacia pública.

A escala de cor começando pelo vermelho, passando pelo amarelo, até o verde, indica a eficiência relativa ao inverso da densidade de passageiros transportados dada as rotas percorridas (em quilômetros). Os números em vermelho representam os maiores valores, contudo, menor eficiência visto que um menor número de pessoas é transportado no traçado das rotas. O inverso é válido para os valores em verde. A tabela demonstra a diferença tocante ao período de férias escolares, com a redução considerável do número de passageiros, principalmente nos meses de Janeiro e Fevereiro, e um pouco menos expressivas nos meses de Julho e Dezembro, mesmo que as tabelas horárias de algumas das linhas operantes nestes períodos sejam alteradas. Os meses de maior movimento, segundo a análise são os de Março, Maio, Junho, Agosto e Novembro. Os meses de Abril e Setembro, no ano de 2017 coincidem com 2 feriados em dias úteis, provavelmente influenciado os volumes do transporte nestes meses. Os valores médios finais apresentam em média aproximadamente 5% de diferença em relação aos menores valores mensais, e 11% em relação aos maiores valores mensais. Isso indica que na maior parte do ano o transporte funciona abaixo do nível médio de eficiência.

Os valores apresentados na Tabela 10, quando comparados aos valores totais de passageiros transportados por bacia da Figura 14, demonstram que apesar do bacia sul ter maior volume anual de passageiros, devido às longas distâncias percorridas em áreas rarefeitas da cidade (zona sul), a eficiência no desempenho da sua funcionalidade (transporte de indivíduos) é menor do que em relação as demais bacias.

Figura 14 - Histórico de volume de passageiros por bacia de transporte ao longo dos anos no período entre os anos de 2002 e 2017.



Fonte: adaptado de EPTC (2018).

Tabela 10 - Razão entre quilômetros rodados e passageiros transportados mensalmente no ano 2017 de acordo com os lotes de veículos. Bacia Norte: 1 e 2; Bacia Sul: 3 e 4; Bacia Leste: 5 e 6; Bacia pública: 7. Intervalo de cor: Vermelho = Menos eficiente; Verde = Mais eficiente.

Mês	LOTE 1	LOTE 2	LOTE 3	LOTE 4	LOTE 5	LOTE 6	LOTE 7	SISTEMA
Jan	0,44	0,50	0,50	0,53	0,46	0,45	0,38	0,46
Fev	0,43	0,49	0,49	0,52	0,47	0,45	0,38	0,45
Mar	0,39	0,43	0,43	0,44	0,41	0,39	0,32	0,40
Abr	0,41	0,46	0,45	0,47	0,42	0,40	0,33	0,41
Mai	0,38	0,44	0,43	0,45	0,40	0,39	0,31	0,39
Jun	0,39	0,44	0,45	0,47	0,41	0,39	0,32	0,40
Jul	0,40	0,45	0,45	0,48	0,43	0,41	0,34	0,42
Ago	0,39	0,43	0,44	0,46	0,42	0,40	0,33	0,40
Set	0,40	0,44	0,45	0,48	0,42	0,40	0,33	0,41
Out	0,39	0,43	0,45	0,48	0,42	0,41	0,32	0,41
Nov	0,38	0,41	0,44	0,46	0,40	0,39	0,32	0,39
Dez	0,40	0,43	0,46	0,49	0,42	0,41	0,36	0,42
<b>Total</b>	0,40	0,44	0,45	0,48	0,42	0,41	0,34	<b>0,41</b>

Fonte: adaptado de EPTC (2018).

#### 4.4.2 Projeções

As projeções para cenários futuros foram desenvolvidas a partir da combinação das variáveis apresentadas anteriormente, e descritas no subcapítulo 4.1.3.3. Os cenários são demonstrados na Tabela 6. Combinadas, as variáveis geram um total de 12 cenários. Os cenários 1 a 6

contam com as possíveis combinações de mudanças no combustível (cDB10: sem alterações; cDB20: com adoção de B20 a partir de 2025; cDB30: com adoção de B30 a partir de 2025); e rodagem (Re: sem alterações, ou, estacionário; Rf: com progressão dos valores, ou, fictício). Estes são utilizados para o entendimento dos valores totais de potenciais impactos ambientais. Quando para análise da eficiência ambiental do serviço de transporte, o número de passageiros é acrescido à consideração como normalizador. Neste caso, a alternativa “Pe” para cada um destes cenários indica que não haveria mudanças no número anual de passageiros observado em 2017, enquanto a alternativa “Pf” considera uma alteração segundo progressão dos valores históricos.

Os resultados de potencial de impacto para aquecimento global (GWP) e potencial de acidificação terrestre (AP) são apresentados nas figuras a seguir. A Figura 15 apresenta os resultados para emissões totais de GWP em kgCO<sub>2</sub> eq, e a Figura 16 para o SH-ER em kg PM2.5 eq. A Figura 17 demonstra o impacto de emissões de GWP normalizado segundo o volume inicial de passageiros utilizando as rotas traçadas, quando considerados os cenários futuros relativos utilizando o princípio da eficiência do sistema descrita no subcapítulo 4.1.3.2 e utilizada para as análises no subcapítulo 4.4.1.3. Estas categoriais são apresentadas no corpo do trabalho devido à divergência de tendências de cenários futuros. Os gráficos com resultados para as demais categorias de impacto podem ser encontrados no Apêndice B.

O gráfico da Figura 15 mostra que, até 2019, as emissões de CO<sub>2</sub> eq tendem a decrescer, uma vez que todos os cenários incluem as mudanças de combustível para B10 até este ano. Da mesma maneira, até este ponto, os resultados seguem a diferenciação apenas segundo os cenários de quilômetros rodados. Uma vez que a frota começa a ser renovada, em 2020, a distinção entre cenários passa a se diferenciar por esta variável também. Deste ano em diante, os cenários que não consideram mudanças na rodagem ou frota se mantêm constantes em tendência, até 2025, quando passam a se considerar a transição para o uso de B20 e B30.

Entre 2019 e 2025, o cenário cDB30. Re, que não considera mudanças na rodagem, passa por acréscimos anuais nos valores de impacto de acordo com a substituição da frota. O mesmo acontece em relação aos cenários cDB10.Re e cDB20. Re. A partir de 2025, os cenários mais impactantes dentro destes conjuntos passam a ser aqueles em que não há mudança no combustível (B10). As mudanças de substituição de diesel ocorrem para os cenários que incluem o uso de B20 e B30 até 2030. Assim, a tendência entre cenários de frota e rodagem

fica mais perceptível entre os cenários em que o combustível utilizado até 2030 continua sendo o B10, uma vez que a grandeza dos impactos de GWP gerados pelo combustível B10 é superior em escala do que a para o B20 e B30, quando comparados. Da mesma maneira, o conjunto de resultados de maiores valores de impacto no final do período (2030) são aqueles em que os cenários não consideram novos incentivos para o uso de B20 ou B30. Entre o cenário base (cDB10.Re) e o cenário que considera apenas mudanças na quilometragem (cDB10.Rf), tem-se uma diferença de emissões de  $5,71E+06 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}$  em 2030. Esta diferença representa um acréscimo de 2,17% de GWP em relação ao cenário base.

No final do período observa-se uma clara divisão entre três conjuntos de resultados diferentes quanto a GWP, que estão relacionados à composição do combustível. O cenário com valores mais altos para impacto de GWP é o cDB10.Rf, relacionado ao combustível B10, substituição da frota por carros com ar condicionado, e um leve aumento na rodagem. Mesmo neste caso, os resultados indicam que a tendência é que as emissões de  $\text{CO}_2 \text{ eq}$  para o sistema de transporte em Porto Alegre mantenha os níveis dos impactos pouco mais elevados que os de 2017 (de  $1,27E+08$ , ao máximo de  $1,30E+08 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}$ ), ou sejam reduzidos (ao mínimo de  $1,55E+07 \text{ kgCO}_2 \text{ eq}$ ). Em percentual, isso significa que os impactos de GWP pode variar entre aproximadamente +2,5% à -86,0% em relação aos valores das mesmas emissões para o ano de 2017. A tendência de redução também é observada para os impactos de ADP-f (Apêndice B, figura B.3): de  $2,32E+09$ , para ao máximo  $2,53E+09 \text{ MJ}$  (+9,0%), e ao mínimo de  $1,97E+09 \text{ MJ}$  (-15,1%). Contudo, para os demais impactos avaliados neste estudo, os valores de emissões podem se elevar de maneira expressiva nos próximos anos.

O gráfico da Figura 16 mostra os impactos para potencial de acidificação terrestre (AP). Para esta categoria de impacto, bem como para impactos de saúde humana (SH-ER), além do acréscimo nos volumes de emissões, observa-se uma divisão em dois conjuntos de resultados. Neste caso, os conjuntos estão relacionados à combinação entre mudanças na frota e na rodagem, uma vez que os resultados para esta categoria de impacto estão ligados à quantidade de combustível consumidas nos anos iniciais do período estudado. Isso porque, como demonstrado no subcapítulo 4.4.1.1, não existem grandes diferenças entre os impactos de substituição de diesel por biodiesel. Para o AP, os piores cenários em termos de emissões para esta categoria são aqueles que consideram o maior uso de biodiesel no diesel, já que os níveis de emissão tendem a subir conforme os níveis de substituição a partir da equivalência energética. Sendo assim, os cenários mais impactantes são o cDB30.Rf (B30, veículos com ar

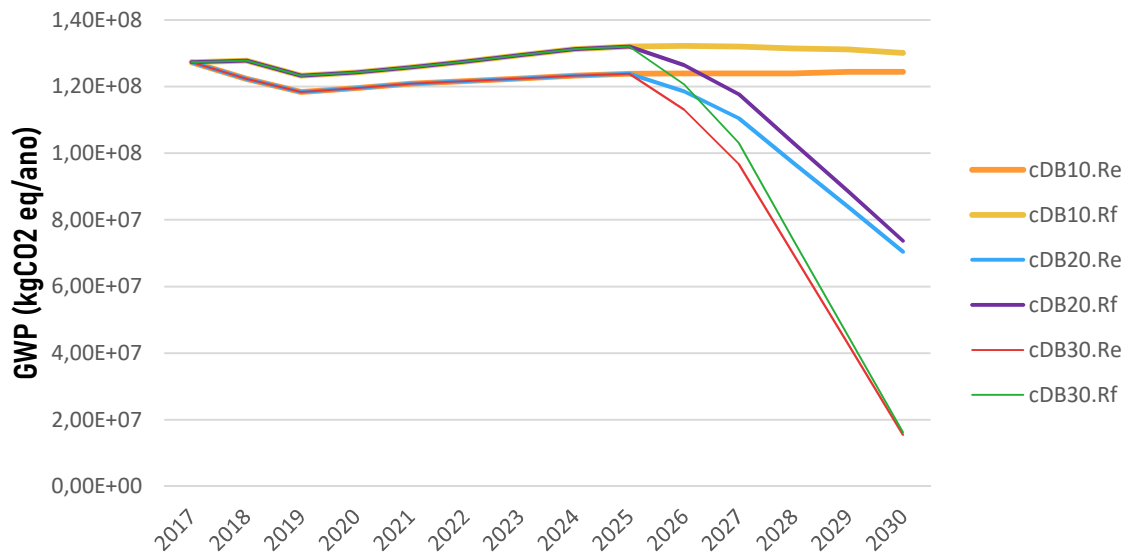
condicionado e maior número de quilômetros rodados) e o cDB20.Rf (B20, veículos com ar condicionado e maior número de quilômetros rodados), que em 2030 chegariam a valores de emissões de  $3,89E+05$  e de  $3,88E+04$  kg SO<sub>2</sub> eq., respectivamente. Para esta categoria, contudo, as diferenças de cenário com mudança de combustível (entre B10 e B20, por exemplo), não chegam a 1% de diferença entre si (aproximadamente 0,2%), dada a baixíssima diferença de emissões entre os combustíveis. Em percentual, os impactos de AP podem variar entre aproximadamente +6,15% à +11,95% em relação aos valores das mesmas emissões para o ano de 2017. Nota-se ainda que, ao final do período estudado, o cenário cDB30.Re tende a ser mais impactante que o cenário cDB10.Rf. Uma vez que para esta categoria de impacto a quantidade de combustível consumida passa a ser tão relevante quanto a composição dos combustíveis nos anos iniciais, e que os valores de rodagem voltam a decrescer no ano de 2025 segundo o cenário “Rf”, os valores de impacto também tendem a reduzir para o cenário cDB10.Rf.

Como demonstrado na Figura 11, os impactos na categoria SH-ER tendem a diminuir um pouco com o uso de maiores porcentagens de biodiesel no diesel. Sendo assim, para esta categoria, o cenário de maior impacto para cada combinação de frota e rodagem é o que considera a prolongação de uso de B10 até 2030 (cDB10. Rf). Para esta categoria, os valores absolutos de impacto tendem a subir de  $1,88E+04$  ao máximo de  $2,08E+04$  kg PM<sub>2.5</sub> eq para com acréscimos de ao menos +4,02% ao máximo de +10,74% nos impactos entre os valores de 2017 e de 2030. Já para os impactos de POCP, considerando os volumes totais de combustível necessários para a rodagem nos cenários estudados, os impactos da categoria variam entre de  $5,42E+05$  em 2017 à no máximo  $5,87E+05$  kg NMVOC, com potencial de redução de impacto de -1,81% das emissões para o cenário cDB30. Re, ou um acréscimo de até 10,20% em relação aos valores de 2017 para o cenário mais impactante (cDB10. Rf).

Estes resultados indicam que as diferentes variáveis consideradas na análise tem importâncias distintas de acordo com o a categoria de impacto analisada. Apesar do uso de biodiesel no diesel influenciar a redução de impactos de aquecimento global, depleção de recursos abióticos fósseis e oxidação fotoquímica, seu efeito não é tão relevante nas demais categorias de impacto analisadas. Diferentemente, como demonstrado na análise do subcapítulo 4.4.1.1, os impactos de AP e SH-ER não são expressivamente influenciados pela substituição do diesel, uma vez que o também são consumidos combustíveis fósseis para a produção do biodiesel. Os resultados do estudo de caso demonstram que a variável tecnológica

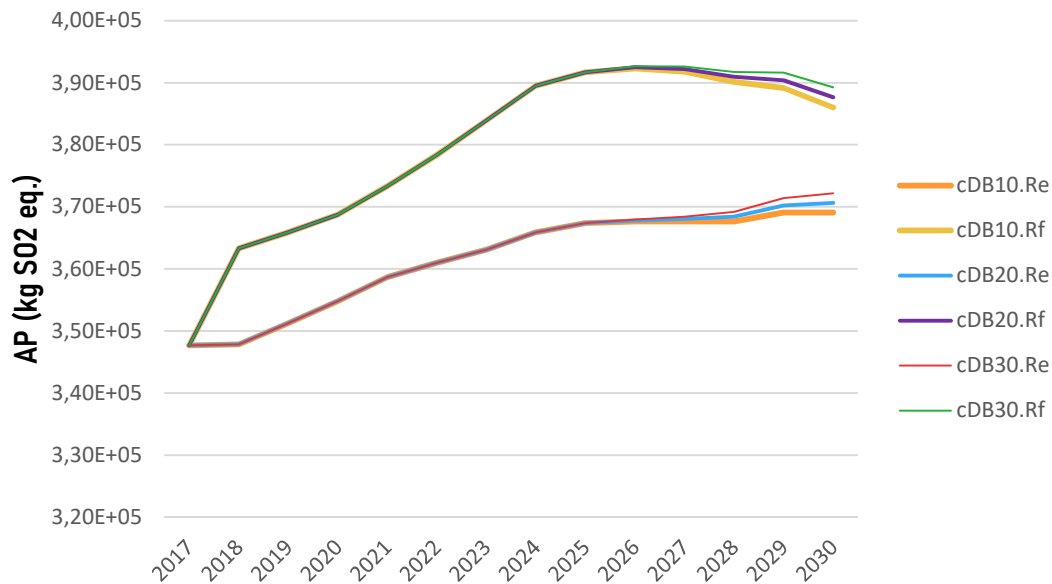
(combustível) é aquela que gera maior sensibilidade nos resultados. Quando os valores de emissão não diferem expressivamente entre tecnologias (B10, B20 e B30), as demais variáveis passam a ter papel relevante na diferenciação de cenários.

Figura 15 - Projeções dos impactos totais de aquecimento global do ciclo de vida anual do sistema de transporte de ônibus em Porto Alegre (em kg CO<sub>2</sub> eq/ano).



Fonte: elaborado pelo autor.

Figura 16 - Projeções dos impactos absolutos de potencial de acidificação terrestre do ciclo de vida anual do sistema de transporte de ônibus em Porto Alegre (em kg SO<sub>2</sub> eq/ano). Para melhor visualização do gráfico, o eixo de valores de impacto inicia em 3,2E05.



Fonte: elaborado pelo autor.

A substituição de combustível é considerada positiva para o sistema segundo a maioria das categorias de impacto. De maneira geral, conclui-se, pela análise de GWP, que a substituição de diesel por biodiesel poderá gerar redução significativa para redução de emissões de CO<sub>2</sub> eq para o sistema de transporte, dado os altos valores de consumo de combustível. Contudo, a redução de impactos ambientais segundo esta variável é significativa para valores mais altos de biodiesel no combustível do que os atualmente previstos em lei. Sendo assim, futuras políticas a nível nacional deveriam focar em porcentagens superiores à atual (B10).

Salienta-se que este trabalho investiga apenas o biodiesel derivado do óleo de girassol, e que os resultados podem ser diferentes para biodieseis de diferentes fontes, e para o mercado como um todo. Além disso, caso adotadas políticas de incentivo para uso de combustíveis B20 e B30, o impacto de uso de terra e escassez de água, não avaliados nesta pesquisa, deve ser considerado, uma vez que o aumento da demanda por óleo biodiesel poderá no futuro alterar a dinâmica de mercado de produtos agrícolas.

No que tange a políticas no âmbito municipal, uma vez que se espera que a eficiência da frota diminua conforme se busque o conforto maior dos passageiros através da inclusão de ar condicionado nos veículos, as políticas voltadas à definição de trajetos devem ser revisadas, a fim de evitar o aumento do número de quilômetros rodados anualmente. À vista disso, a eficiência do serviço deve ser analisada.

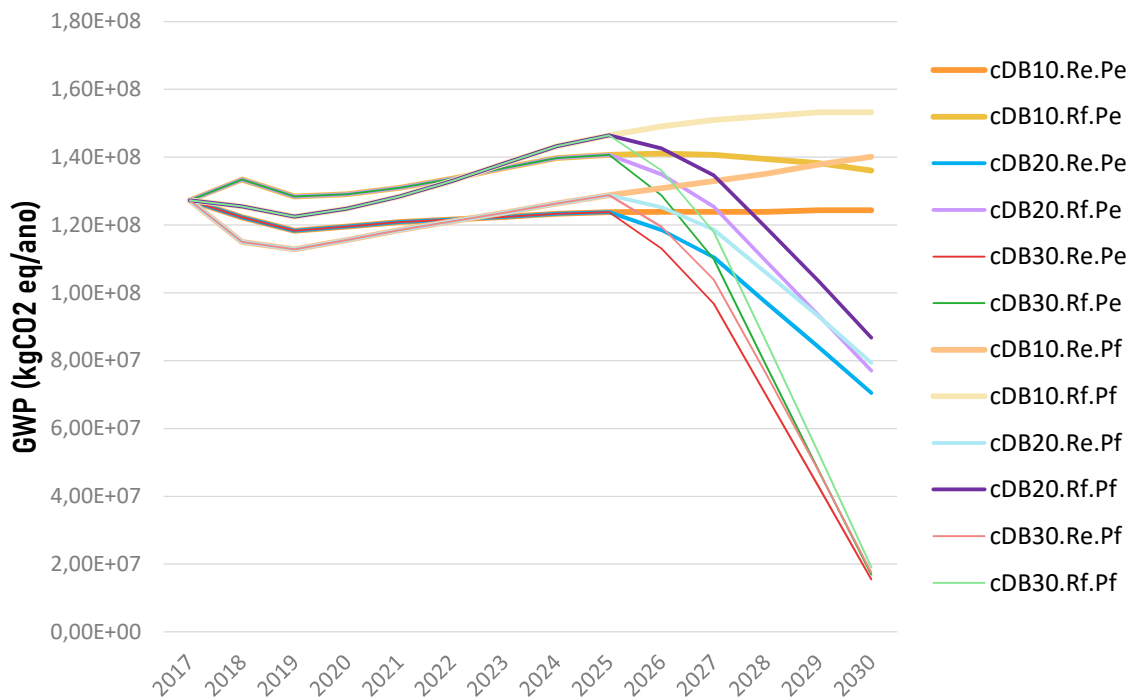
O gráfico da Figura 17 mostra os cenários considerando a função principal do sistema: transporte de pessoas. Neste gráfico, então, são apresentados os resultados de emissões normalizados segundo a relação de eficiência (km/passageiros atendidos) do sistema no ano de 2017, como apresentada no subcapítulo 4.4.1.3. A primeira alternativa (“Pe”) considera o mesmo volume de passageiros identificados em 2017. A segunda alternativa (“Pf”) considera a equação segundo regressão linear dos valores históricos de passageiros. Dessa maneira, a segunda alternativa considera um ligeiro aumento inicial seguido de uma redução do volume total de passageiros utilizando o transporte público. De maneira geral, quanto menor o número de passageiros transportados para o mesmo número de quilômetros rodados, maior o valor de emissões em kg CO<sub>2</sub> eq por passageiro.

Para além das tendências apresentadas anteriormente com os valores de impacto total, este gráfico também demonstra que podem haver inversões de resultados entre cenários em função



do número de usuários. Por exemplo, quando considerados apenas os impactos totais para GWP, o cenário cDB10.Rf seria o mais impactante em 2030. Contudo, a combinação mostra que a redução no número de passageiros para os cenários em que não há mudança de valores de rodagem (cDB10.Re.Pf) pode acarretar impactos por passageiro ainda maiores que os onde há (cDB10.Rf.Pe). O mesmo vale para os cenários com combustíveis B20 e B30. Sendo assim, apesar de não ser uma variável direta no cálculo de inventário para impactos absolutos do sistema, ao tratar da eficiência do sistema de transporte coletivo, o número de passageiros transportados influencia os resultados de impacto ambiental.

Figura 17 - Projeções dos impactos de aquecimento global do ciclo de vida anual normalizados segundo a relação de eficiência (km/passageiros transportados) do sistema no ano de 2017 do sistema de transporte de ônibus em Porto Alegre.



Fonte: elaborado pelo autor.

Mudanças focadas no aumento da eficiência do sistema influenciam o planejamento de trajetos do transporte da cidade, bem como a tabela horária e o número de paradas. Todas estas variáveis influenciarão a rodagem e o volume de combustível consumido e, conseqüentemente o impacto do sistema. Sendo assim, para reduzir os impactos totais do sistema de ônibus na cidade a partir de políticas a nível local, é necessária a revisão do plano de distribuição do serviço. A melhoria da distribuição dos trajetos, pontos e horários acarretaria numa melhora na eficiência ambiental geral do sistema. Esta melhora na

eficiência do sistema também pode ser atingida através da revisão do PDDUA, uma vez que este avalia e define a densidade populacional, regiões predominantemente residenciais, comerciais, agrícolas e industriais. Segundo o estudo do AR5 (IPCC, 2014), a infraestrutura e a forma urbana estão diretamente relacionadas às emissões ambientais. A forma e a infraestrutura urbanas moldam o gerenciamento do uso da terra a longo prazo, influenciam a escolha transportes individuais, e residência, afetando a eficiência ambiental de uma cidade. Cidades mais densas, com uso misto dos espaços urbanos, com conectividade e acessibilidade, tendem a influenciar escolha de transportes mais econômica e ambientalmente mais amigáveis. Consequentemente, estas cidades terão emissões anuais menores.

Assim, iniciativas como a ZISPOA criam excelentes oportunidades para Porto Alegre alcançar reduções de impactos ambientais ligados ao sistema de transporte até 2030. Além de incentivar o uso de transportes mais ecologicamente amigáveis, como a bicicleta e carros elétricos, o projeto prevê uma distribuição mais equilibrada do espaço entre residência, indústria e comércio, o que significa menor dependência de transporte motorizado (público ou individual) no local. A ZISPOA deve ser incluída na revisão do Plano Diretor de 2020, e as mudanças e os impactos ambientais decorrentes da criação deste centro tecnológico comercial e educacional devem ser incluídos no plano.

Além disso, como demonstrado na análise das variáveis de operação (subcapítulo 4.4.1.3), dados geográficos e estatísticos sobre as bacias de transporte podem auxiliar na identificação não apenas da eficiência dos trajetos, como também no alinhamento de estratégias de uso do espaço urbano. É possível que a atração comercial e estratégias públicas possam reduzir a necessidade de deslocamento de longas distâncias, por exemplo.

## 5 DISCUSSÃO

Neste capítulo, a aplicação da ACV para políticas públicas do sistema de transporte público da cidade de Porto Alegre é discutida a partir dos resultados do estudo de caso. A discussão está focada principalmente nas escolhas de modelagem feitas a partir das especificidades do método de ACV Territorial (LOISEAU et al., 2018) e em como estas afetaram a análise dos resultados.

### 5.1 O CONTEXTO NAS DEFINIÇÕES DE OBJETIVO E ESCOPO

Para contemplar melhores definições na primeira etapa da ACV, o estudo de caso foi apresentado dentro do contexto socioeconômico e cultural da cidade de Porto Alegre. Como sugerido por Loiseau *et al.* (2018), a técnica de entrevista foi utilizada para a primeira exploração do contexto. Através da entrevista, foi possível identificar as diferentes variáveis passíveis de mudança por alguma política pública: gasolina, eficiência da frota, e variáveis de operação. Da mesma maneira, foi possível compreender os níveis estratégicos de cada uma destas políticas, nacional ou local/municipal, bem como diferenciado pela Comissão Nacional dos ODS (BRASIL, 2017). Somente na continuação foram, então, definidos o objetivo e escopo.

Diferentemente da literatura revisada e descrita no Capítulo 2, o estudo de caso traz a discussão de reinterpretação das possíveis UF e EF do sistema. O estudo demonstra que a UF frequentemente usada nas pesquisas de ACV do transporte de passageiros, “passageiro-quilômetro” ou “p.km” (CHESTER et al., 2013; NAHLIK; CHESTER, 2014), não necessariamente é a mais adequada para as necessidades de indicadores. Indicadores como os ODS (BRASIL, 2017) e da NBR ISO 37120 (ABNT, 2017), exigem impactos demonstrados segundo valores totais – como nos estudos de Chester e Cano, (2016) e Garcia, Gregory e Freire (2015). Nestes casos, a análise final será através da UR: ano. Contudo, para políticas a nível municipal, a consideração da função é essencial (ALBERTÍ et al., 2019b; LOISEAU et al., 2018). No estudo de caso, esta análise é feita a partir da normalização dos resultados de eficiência de operação do sistema de transporte conforme o ano base, permitindo averiguar as mudanças nos anos seguintes, e garantindo que implicariam no mesmo número de passageiros

transportados por quilômetro rodado. Assim, duas unidades de equivalência foram utilizadas para título de comparação conforme os níveis estratégicos identificados.

A abordagem detalhada usada no estudo de caso resume os aspectos essenciais da modelagem de ACV Territorial para a avaliação de impactos de diferentes decisões políticas nos serviços urbanos. As principais características identificadas são: o contexto socioeconômico (subcapítulo 4.1.1); a identificação de diferentes níveis estruturais das ações de governança (subcapítulo 4.1.3.1); e a dinâmica da mudança definida por diferentes partes interessadas (subcapítulo 4.1.3.3). As variáveis tecnológicas do sistema interagem com o contexto em uma rede complexa de mudanças de comportamento do usuário e leis no tempo usado para criar possíveis cenários futuros (subcapítulo 4.1.3.3) para informar os tomadores de decisão sobre possíveis ações de mitigação de impactos. Nesse cenário, espera-se que os sistemas urbanos se adaptem não apenas às novas tecnologias, mas também à medida que a cidade se expande (JEONG; MINNE; CRITTENDEN, 2015). Ao mesmo tempo, é esperada melhoria na qualidade do serviço.

A partir das discussões sobre definições de cenários dispostas no subcapítulo 4.1.3.3, ao estudar-se o sistema de transporte público da cidade de Porto Alegre, optou-se primeiramente por estudar políticas específicas relacionadas a cada tecnologia neste sistema, que se compõem de sistemas complexos por si só. Os cenários, então, representam uma análise de sensibilidade para as principais variáveis que influenciam os processos do ciclo de vida do serviço (a substituição do diesel pelo biodiesel na mistura vendida, eficiência da frota e rodagem, considerando o consumo total de combustível, e o número de passageiros transportados). Portanto, os impactos totais plotados comparam a eficiência ambiental das possíveis combinações de mudanças, de acordo com áreas de intervenção.

No exemplo estudado, a competitividade do modal de ônibus coletivo em relação aos demais modais urbanos indica que é provável que os cenários de substituição de frota por veículos com ar condicionado, o aumento dos quilômetros rodados e a diminuição do número de passageiros transportados estejam entre as projeções mais esperadas. Contudo, as mesmas dependem da capacidade financeira dos órgãos públicos para incentivar as empresas licenciadas a adequar o serviço às necessidades do público interessado.

## 5.2 DADOS PRIMÁRIOS E SECUNDÁRIOS

Uma vez que para análise em políticas públicas urbanas os dados primários são obtidos diretamente de base de dados do poder público, a qualidade de dados para avaliação do inventário foi considerada qualificada e satisfatória. Apesar da relação entre fatores socioeconômicos não ser avaliada, pode-se perceber pela análise das variáveis operacionais que este é um ponto chave na avaliação dos resultados. ACVs urbanos que considerem apenas os efeitos de substituições tecnológicas em seus estudos, podem gerar resultados equivocados, uma vez que a eficiência dos serviços é a variável mais sensível na análise, depois de, no caso estudado, a variável tecnológica (combustível), como demonstrados nos resultados (subcapítulo 4.4.2). Sendo assim, os resultados desta pesquisa indicam que, diferentemente de tomadas de decisão para melhorar processos industriais, tomadas de decisão em serviços públicos dependem de políticas públicas voltadas para variáveis interligadas principalmente ao comportamento dos agentes envolvidos no sistema. Destaca-se que, para a implementação de ACV territorial para políticas públicas no espaço urbano, é imprescindível o uso de método participativo, contando com técnicas que envolvam não apenas os tomadores de decisão, mas principalmente o público-alvo das políticas. Para o estudo de caso apresentado, destacam-se os usuários do transporte coletivo. Uma estratégia possível para agregar ambas variáveis à análise é o uso de modelagem de sistemas baseadas em agentes, como citadas na bibliografia (subcapítulo 2.1.4). Contudo, este estilo de modelagem é baseado no uso intensivo de dados.

Um dos desafios apresentados por este trabalho é a falta de dados para este tipo de modelagem, confirmada por fontes para o estudo de caso (WRI; C40; ICLEI, 2014). O diagnóstico apresentado pela instituição WRI para auxílio na tomada de decisão para reformulação do novo plano diretor de mobilidade de Porto Alegre demonstra que os últimos estudos de padrões da mobilidade na cidade são datados de 2003. Dadas as mudanças reportadas no subcapítulo 4.1.1, dados com esta resolução temporal devem levar a conclusões equivocadas. Além disso, estudos como aquele não possuem base de dados abertas, que possibilite a avaliação da qualidade dos dados e cálculos de incertezas, como demonstrado por Baustert e Benetto (2017), a fim de minimizar erros residuais.

Uma importante limitação do trabalho em relação aos resultados é a falta da análise de incertezas. A literatura de ACV aponta que as incertezas e sensibilidade dos dados de inventário podem representar mudanças significativas na comparação entre cenários alternativos devido, principalmente, ao uso de valores médios dos processos analisados

(SLAGSTAD, BRATTEBØ, 2013; BAUSTERT, BENETTO. 2017). Apesar da análise qualitativa da qualidade dos dados ter sido positiva, os resultados desta análise devem ser utilizados com parsimonia, levando em consideração que não foram realizados testes de incerteza e que os valores totais de emissões podem conter erros.

### 5.3 INDICADORES DE IMPACTO

De acordo com o histórico de urbanização no Brasil (degradação ambiental e falta de infraestrutura de saneamento) (MARICATO, 2015) as políticas públicas atualmente não dispõem de metas práticas para atingir a sustentabilidade urbana e outros objetivos globais. A adoção dos ODS cria novas oportunidades para o planejamento das cidades. No entanto, a campanha define indicadores e metas, faltando estratégias específicas para alcançá-los. Assim, o primeiro passo seria considerar a implementação da ACV para aproximar-se das metas, utilizando da análise e comparação de cenários futuros.

Neste estudo, foram incluídos dois impactos identificados entre os indicadores dos ODS. São eles: indicadores de emissões de CO<sub>2</sub> e doenças respiratórias. Apesar da revisão de literatura indicar que a maioria dos estudos até 2018 consideraram apenas impactos de gases de efeito estufa, ou seja, emissões de CO<sub>2</sub> equivalentes, o estudo de caso demonstra divergência entre tendências de resultados quando analisadas diferentes categorias de impacto em função de variáveis que influenciam o sistema. Os resultados indicam que, enquanto as emissões de CO<sub>2</sub> do sistema tendem a reduzir no futuro, os impactos de doenças respiratórias tendem a aumentar ao longo dos anos. Os resultados demonstram a importância da utilização de uma ferramenta com métodos bem definidos e transparentes de avaliação, e reforça que diferentes tipos de impacto devem ser avaliados, pois nem todas as decisões apresentam a mesma tendência para todos os potenciais impactos.

Alberti *et al.* (2017) trazem à discussão que os métodos revisados por eles não estão preparados para realizar declarações comparativas entre cidades ou regiões devido à falta de uma unidade funcional comum. Embora amplamente utilizada para comparações na tomada de decisões, a aplicação da ACV para comparar cidades ou regiões ainda apresenta várias barreiras para transposição. Indicadores como os propostos pela campanha dos ODS pretendem criar um banco de dados estatístico histórico que permita avaliar o desempenho da própria cidade para informar os tomadores de decisão sobre as políticas implementadas.

Portanto, o desenvolvimento de regulamentos para as ACV nas cidades não deve seguir os mesmos princípios aplicados às diretrizes de ACV para produtos e serviços, ou edifícios, quando se trata de tomada de decisão comparativa entre unidades multifuncionais complexas, ou seja, cidades ou territórios, já que características intrínsecas das cidades (relativas à sua função) adicionam complexidade na comunicação dos indicadores que as comparam.

Nesta pesquisa, não são consideradas normalizações ou índices de valoração para cada categoria de impacto a fim de unificar o resultado a uma só conclusão. Uma avaliação multicritério é sugerida para solucionar as diferenças de resultados através de um índice único, que deve ser definido a partir de uma série de critérios socioeconômicos em conjunto com as partes interessadas, e, preferencialmente, adaptar-se ao contexto social e geográfico da cidade em estudo (DOMINGUES et al., 2015; HENDRICKSON; NIKOLIC; RAKAS, 2016).

#### 5.4 APRESENTAÇÃO DE RESULTADOS

Os resultados finais do estudo de caso, bem como de outras pesquisas de ACV do território urbano destinam-se a informar os tomadores de decisão (neste caso, a EPTC e os prestadores de serviços) sobre a potencial variação nos impactos no sistema. Sobretudo, um dos pontos mais importantes a serem discutidos é a apresentação dos resultados, uma vez que estes devem ser reportados para não especialistas em ACV.

O estudo de caso traz a abordagem de cenários segundo Weidema *et al.* (2004), onde Scholz e Tietje (2001, apud WEIDEMA et al., 2004) propõem a distribuição de cenários a partir do “trompe de cenário”. Os resultados a partir do “trompe de cenários” conforme as figuras Figura 15, Figura 16 e Figura 17 do estudo de caso demonstram de maneira explícita o perfil ambiental do sistema com dados atuais e suas tendências a partir das projeções futuras, e representando uma escala de diferentes potenciais resultados futuros. Os cenários representam a análise de sensibilidade para as principais variáveis que influenciam os processos do ciclo de vida (substituição do biodiesel pelo biodiesel no mix vendido, eficiência da frota e quilometragem, considerando o consumo total de combustível e número de passageiros transportados) dos diferentes níveis de tomada de decisão. O “trompe” (referente ao formato de trompete, ou triângulo, formado pelos resultados do gráfico) demonstra aos tomadores de decisão, em diferentes níveis estratégicos, as projeções de impactos futuros segundo sua parcela de engajamento nas políticas públicas relacionadas. Portanto, os impactos totais foram plotados para o perfil ambiental de possíveis combinações dessas mudanças.

Esse método de avaliação e representação de resultados pode fornecer informações mais precisas para a criação e o gerenciamento de metas combinadas de redução dos impactos ambientais em políticas públicas. Contudo, uma das importantes limitações do trabalho é a troca de informações sobre a pesquisa com os gestores públicos e tomadores de decisão. Os mesmos foram consultados durante entrevista e para a disponibilização de dados. Porém, não houveram trocas ativas entre as partes nas demais etapas da pesquisa, o que pode reduzir a aplicabilidade da pesquisa como referência para tomada de decisão. É relevante que em pesquisa futuras, as partes interessadas possam estar mais envolvidas, como especialistas, do começo ao fim da pesquisa para o constante melhoramento da metodologia e dos resultados.



## 6 CONCLUSÕES

Este estudo investigou o perfil ambiental do sistema coletivo de transporte público de Porto Alegre a partir da modelagem da Avaliação do Ciclo de Vida utilizando princípios da ACV Territorial e diferentes cenários de políticas públicas buscando o diagnóstico de diferentes cenários de impacto ambiental segundo políticas públicas. A verificação se deu com base na revisão de literatura e de um estudo de caso com base no transporte público por meio de ônibus na cidade de Porto Alegre, dada a relevância de impactos gerados pela produção e consumo e combustíveis fósseis em veículos a diesel.

Através da revisão de literatura sobre a aplicação da Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) em escala urbana, as seguintes informações foram sintetizadas: a concentração geográfica e escala territorial; número de estudos sobre cada tópico; o foco de pesquisa segundo o objetivo de pesquisa; a ferramenta ACV utilizada; os métodos de impacto utilizados para a categorização na etapa de AICV; e as unidades funcionais de medida dos impactos; e classificação de dados de inventário. Os resultados indicaram que a maioria dos artigos se concentra na busca de diferentes soluções de sistemas de abastecimento das cidades separadamente - água, esgoto, transporte, etc.-, usando a abordagem normatizada de ACV e tomando decisões principalmente sobre os resultados das emissões de gases de efeito estufa. Aferiu-se que não há acordo ou consenso sobre qual metodologia deve ser utilizada para avaliar os dados de inventário ao realizar uma análise de território ou cidade. Em relação às ferramentas, não existe uma ferramenta única e adequada para estudos de planejamento urbano, cada uma delas tem suas próprias vantagens e desvantagens. Sendo assim, decisões de modelagem de ACV de sistemas urbanos devem ser tomadas com base no caso avaliado. A partir dos estudos revisados, reconheceu-se a necessidade de produzir conteúdo replicável e adaptável para uso dos gestores urbanos na geração de planos urbanos sustentáveis. A ferramenta mais detalhada na literatura, a ACV Territorial, é utilizada como método auxiliar para o estudo de caso. A partir dos resultados da revisão de literatura, o método foi definido para o estudo de caso.

As fases de desenvolvimento do estudo de caso seguiram as etapas da avaliação do ciclo de vida segundo a norma NBR ISO 14040 (ABNT, 2009a): i) definição de objetivo e escopo; ii)

Inventário de Ciclo de Vida (ICV); iii) Avaliação de Impacto do Ciclo de Vida (AICV); e iv) Interpretação. Para o sistema estudado, o método ainda agregou recomendações da ACV Territorial (LOISEAU et al., 2018) para definições nas duas primeiras etapas da ACV, além de outras ferramentas complementares citadas no detalhamento do método. Além disso, o contexto geográfico e econômico da cidade de Porto Alegre, com destaque às políticas urbanas e ações públicas existentes para o desenvolvimento sustentável na cidade permearam as definições do estudo.

Na etapa “i” da ACV, foram verificados, a partir de entrevista com a empresa que fiscaliza e administra o serviço de transporte público na capital, três variáveis e alguns parâmetros-chave para o estágio de uso do ciclo de vida do sistema: o combustível, o veículo e a rotina de operação. Estas três variáveis determinaram então a definição de escopo e cenários da ACV. Para averiguar as contribuições das escolhas que envolvem estes três níveis de atuação de tomada de decisão, buscando a aproximação da avaliação com potenciais modificações no sistema, os cenários futuros foram baseados nos dados históricos do sistema e políticas existentes relacionadas, considerando o período limite estipulado: o ano de 2030. As mudanças na composição do combustível consideraram a substituição de biodiesel no diesel comercial, de 8% no ano de 2017 (combustível B8), 9% no ano de 2018 (combustível B9), e 10% no ano de 2019 (combustível B10), segundo a lei nº 13.263, e possíveis alterações para níveis de 20% (combustível B20) e 30% (combustível B30) de substituição, segundo Resolução ANP nº 30. A alteração de veículo considera a substituição dos veículos no seu final de vida por veículos similares aos existentes, contudo considerando a norma municipal que define novos veículos da frota devem estar equipados com ar-condicionado. Quanto à rotina de operação, dado os valores das distâncias percorridas e passageiros transportados, foram consideradas projeções baseadas em dados históricos que representam a tendência de mudanças no sistema, e ainda cenários base (ou cenários de controle), que simula a perpetuação dos valores de operação do ano de 2017, para que pudessem ser observadas as diferenças em resultados de impacto ambiental.

Para averiguar aos potenciais de mitigação de impactos no sistema ano a ano, até o limite de período estipulado 2030, na etapa “ii”, de ICV, os dados coletados juntos da Empresa Pública de Transporte e Circulação da cidade de Porto Alegre foram utilizados nos cálculos de inventário. Os dados de ciclo de vida do combustível foram adaptados segundo a literatura, a fim de representar melhor a realidade local. Os valores de impacto para o combustível nas

cinco categorias de impacto relevantes para o planejamento do cumprimento das metas de desenvolvimento sustentável foram usados como base para a avaliação.

Foram gerados dois conjuntos de resultados para análise: um que considera a caracterização das variáveis do sistema, e outro considerando as projeções das mudanças ao longo do tempo. Quanto a caracterização das variáveis, os resultados indicam que a substituição de biodiesel no diesel, considerando o poder calorífico dos combustíveis avaliados, é positiva para 4 das categorias de impacto avaliadas (GWP, ADP-f, SH-ER, e POCP), chegando a um potencial de redução de 88,52% de impacto de potencial de aquecimento global por litro consumido entre os cenários de utilização de B8 para B30. Para o impacto de acidificação de terrestre, mesmo que os resultados indiquem um pequeno aumento de valores para esta mesma mudança (B8 para B30), esta diferença é pouco expressiva ( $3,82E-05$  kg SO<sub>2</sub> equivalente por unidade de energia produzida).

Com relação à característica dos veículos da frota no ano de 2017, quando consumiam combustível B8, os resultados indicam que a posição do motor também influencia níveis de consumo e seus impactos, sendo que veículos com motores na posição dianteira são mais ambientalmente eficientes. Os resultados também indicam que o uso de veículos com a presença de ar condicionado pode ser menos impactante do que o uso daqueles que não o possuem, porém que contam com o uso de câmbio de automático. Veículos classificados como pesados com câmbio automático causam emissões de valor de 0,156 kg de CO<sub>2</sub> eq a mais que os não o possuem, uma diferença percentual de 13%.

As variáveis de operação, relacionadas à rodagem e passageiros também foram analisadas, porém não diretamente relacionadas aos impactos. Os resultados indicam que, segundo quatro bacias de atendimento (a pública, a norte, a sul, e a leste), apesar da bacia sul ter maior volume anual de passageiros, as longas distâncias percorridas em áreas rarefeitas em regiões rurais da cidade tornam esta bacia a de menor eficiência no desempenho da função do transporte de passageiros.

Nas análises de projeções, o cenário futuro que se destaca com menos impactante entre 4 das categorias de impacto (GWP, ADP-f, SH-ER e POCP) é aquele que considera que até 2030 poderiam ser adotadas medidas de incentivo para adoção ou legislação para a venda de diesel com 30% de biodiesel em sua formulação, e que considera que as distâncias percorridas seriam as mesmas (ou não aumentariam) até o ano de 2030 (cenário cDB30.Re). Para o

impacto de potencial de aquecimento global, essa mudança significaria uma redução de 87,82% dos impactos gerados em relação aos valores rodados no ano de 2017, enquanto para a redução seria de 15,10% para os impactos de ADP-f, e de apenas 1,81% para os impactos de POCP. Para o impacto de saúde humana, relativo a efeitos respiratórios, este cenário representa o menor acréscimo nos valores de impacto (apenas 4,02% de acréscimo) em relação ao mesmo período. Para os efeitos de acidificação terrestre, cDB30.Rf (onde há mudança de valores de rodagem) é o pior cenário (representando um acréscimo de 11,95% nos impactos anuais), enquanto o melhor cenário é aquele em que se mantém o uso de 10% de biodiesel no diesel (já aprovado em lei) até 2030, porém com os mesmos valores de rodagem (cDB10.Re, com acréscimos de impacto de apenas 6,15%).

Os resultados de indicadores totais de impactos de todas as categorias atestam que das três variáveis analisadas, a variável tecnológica (combustível) é a que gera maior sensibilidade nos resultados dos impactos ambientais. Uma vez que a diferença de impacto entre B8 e B30 não é expressiva para todas as categorias, para estas, o estudo de projeções confirma que as diferenças nos cenários de rodagem são mais relevantes. Contudo, quando considerado o número de passageiros transportados como normalizador dos resultados, a variável de eficiência funcional do sistema (transporte de passageiros) demonstra-se como mais relevante que a distância total percorrida. Nestas circunstâncias, há a inversões de resultados entre cenários em função do número de usuários. Por exemplo, a combinação mostra que a redução no número de passageiros para os cenários em que não há mudança de valores de rodagem (cDBXX.Re.Pf) pode acarretar impactos por passageiro ainda maiores que os onde há (cDBXX.FE.Rf.Pe). Assim, os resultados indicam que, de maneira geral, a melhor projeção possível depende, primeiramente, da adaptação das leis nacionais de combustível para o maior uso de biodiesel no diesel, e, em segundo lugar, de leis municipais que ofereçam a melhor razão entre passageiros transportados por quilômetros rodados.

A partir dos resultados de ambas as revisões e do estudo de caso, pode-se averiguar que a complexidade dos estudos de ACV Territorial está principalmente nas decisões de modelagem do sistema. Uma ACV voltada para o processamento de cenários de impacto ambiental para análises territoriais com foco em políticas públicas urbanas será prioritariamente de caráter prospectivo e dinâmico para poder atender às necessidades de definições de metas e manutenção das decisões para atingi-las. Para além das discussões contidas na literatura revisada, este trabalho demonstra que as aplicações da ACV para auxiliar intervenções de

planejamento do território passam por diversos níveis políticos de tomada de decisão. O atingimento das metas para o desenvolvimento sustentável será, então, consequência do efeito conjunto das decisões nestes diferentes níveis de decisão. O estudo demonstra que, apesar de tratarmos especificamente de um sistema de mobilidade urbana, outros instrumentos de planejamento urbano, como o PPDUA, estão indiretamente, porém fortemente ligados com os resultados finais de emissão do sistema dada a função do mesmo. Desta maneira, a partir das definições de escopo, é prudente que se considerem todos os níveis envolvidos em tomadas de decisão relacionadas ao sistema para facilitar a visualização do atingimento de metas de maneira conjunta.

À medida que as bases de dados locais se tornem mais robustas, assim como quando forem desenvolvidos métodos de AICV com informações geográficas específicas para caracterizar impactos ambientais locais ou regionais, a demanda de tempo de análise e interpretação de cada etapa da ACV Territorial tende a reduzir. Isso quer dizer que cada etapa se tornará igualmente importante na definição da robustez das pesquisas em escala urbana. Enquanto isso não for possível, entende-se com os resultados desta pesquisa que a hierarquia de imposição de incertezas à avaliação se dá primeiramente pela etapa de definição de objetivo, escopo e cenário, secundamente pelo ICV, e por último pela AICV.

Este trabalho foca em mudanças futuras, que envolvem cenário de políticas públicas, infraestrutura e tecnologia já existentes no mercado, visando garantir a compreensão dos tomadores de decisão sobre as potenciais reduções de impactos ambientais com poucas, porém efetivas mudanças no sistema. Foram retratadas pelos gestores as dificuldades que o setor do transporte público coletivo de Porto Alegre vem passando por funções financeiras e de competitividade e consequente desmotivação e incapacidade dos prestadores de serviço de melhorar a qualidade do serviço prestado. Igualmente por esta razão, uma vez que não estava no escopo deste trabalho a realização de uma Avaliação do Custo do Ciclo de Vida e retorno financeiro, não foram propostos novos cenários que exigissem valores significativos de investimento por parte do poder público ou do setor de prestação de serviço. Assim, o trabalho vem trazer também uma importante reflexão sobre o contexto de aplicação. A transferibilidade de políticas públicas de transformação do espaço urbano e das tecnologias de mercado estão diretamente ligadas ao contexto socioeconômico dos estudos. Enquanto alguns contextos forem deixados de lado, as diretrizes para ACV de cidades e sistemas urbanos continuarão imprecisas para dar suporte às políticas públicas locais.

## 6.1 TRABALHOS FUTUROS

O estudo apresentado nessa dissertação não apenas apresenta limitações, como também gera novas questões. Dessa maneira, são sugeridos trabalhos para a continuidade desta pesquisa:

- a) Aplicar a metodologia de ACV Territorial para outros estudos de caso no Brasil a fim de adaptar a ferramenta para os sistemas no contexto brasileiro;
- b) Expandir o escopo do estudo de caso para avaliar de berço-ao-túmulo, e modelar os efeitos das mudanças no inventário ao longo do período sugerido conforme a demais variáveis que influenciam os sistemas, utilizando outras ferramentas como ABM e SD para auxiliar na análise;
- c) Utilizar da abordagem consequencial para o desenvolvimento de estudo de casos similares;
- d) Aprofundar o estudo dos cenários futuros do estudo de caso, gerando o diagnóstico e o prognóstico de novas rotas/trajetos para as linhas de transporte público por ônibus, simulando estes novos sistemas a partir da ACV Territorial, agregando a participação de todas as partes interessadas no processo de modelagem do sistema através de entrevistas.

## REFERÊNCIAS

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.040: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Princípios e estrutura**Rio de JaneiroABNT, , 2009. a.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 14.044: Gestão ambiental - Avaliação do ciclo de vida - Requisitos e orientações**Rio de JaneiroABNT, , 2009. b.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 15570 - Transporte - Especificações técnicas para fabricação de veículos de características urbanas para transporte coletivo de passageiros.** 2009c. Disponível em: <[https://www.cnmp.mp.br/portal/images/Comissoes/DireitosFundamentais/Acessibilidade/NBR\\_15570-2009\\_Transp\\_Coletivo\\_Urbano.pdf](https://www.cnmp.mp.br/portal/images/Comissoes/DireitosFundamentais/Acessibilidade/NBR_15570-2009_Transp_Coletivo_Urbano.pdf)>.

ABNT, ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR ISO 37120: Desenvolvimento sustentável de comunidades - Indicadores para serviços urbanos e qualidade de vida**Rio de JaneiroABNT, , 2017.

ACERO, Aitor P.; RODRÍGUEZ, Cristina; CIROTH, Andreas. **LCIA methods. Impact assessment methods in Life Cycle Assessment and their impact categories. Version 1.4.** [s.l: s.n.].

ALBERTÍ, Jaume et al. Towards life cycle sustainability assessment of cities. A review of background knowledge. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 609, p. 1049–1063, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.179>>

ALBERTÍ, Jaume et al. Allocation and system boundary in life cycle assessments of cities. **Habitat International**, [s. l.], v. 83, n. November 2018, p. 41–54, 2019. a. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2018.11.003>>

ALBERTÍ, Jaume et al. Allocation and system boundary in life cycle assessments of cities. **Habitat International**, [s. l.], v. 83, n. October, p. 41–54, 2019. b. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.habitatint.2018.11.003>>

ALBERTÍ, Jaume; BRODHAG, Christian; FULLANA-I-PALMER, Pere. First steps in life cycle assessments of cities with a sustainability perspective: A proposal for goal, function, functional unit, and reference flow. **Science of the Total Environment**, [s. l.], v. 646, p. 1516–1527, 2019. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.07.377>>

ANP. **RESOLUÇÃO ANP Nº 30, DE 23.6.2016 - DOU 24.6.2016 - RET. DOU DE 13.1.2017**BrasíliaAgência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis, , 2016. Disponível em: <<http://legislacao.anp.gov.br/?path=legislacao-anp/resol-anp/2016/junho&item=ramp-30-2016&export=pdf>>

APT, Associação de Transportadores de Passageiros. **Dados do total anual de quilômetros rodados por linha segundo bacia de atendimento fornecidos sobre demanda no mês de Novembro de 2018 - Valores para os anos de 2017-2018**Porto Alegre, BrazilATP, , 2018.

BARANDICA, Jesús M. et al. Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 57, p. 79–91, 2013. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.05.036>>

BAUSTERT et al. Coupling Activity-Based Modeling and Life Cycle Assessment—A Proof-of-Concept Study on Cross-Border Commuting in Luxembourg. **Sustainability**, [s. l.], v. 11, n. 15, p. 4067, 2019. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/11/15/4067>>

BAUSTERT, Paul; BENETTO, Enrico. Uncertainty analysis in agent-based modelling and consequential life cycle assessment coupled models: A critical review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 156, p. 378–394, 2017. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.03.193>>

BERGESEN, Joseph D. et al. Environmental Research Letters Environmental and natural resource implications of sustainable urban infrastructure systems Estimating the potential for industrial waste heat reutilization in urban district energy systems: method development and implementa. **Environ. Res. Lett**, [s. l.], v. 12, 2017. Disponível em: <<https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa98ca>>

BRASIL. **Lei n 10.257, de 10 de julho de 2001. Estatuto da Cidade e Legislação Correlata. 2. ed.** Brasília Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, , 2002.

BRASIL. **Relatório Nacional Voluntário sobre os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável.** Brasília Secretaria de Governo da Presidência da República, Ministério do Planejamento, Desenvolvimento e Gestão, , 2017.

BREURE, A. M.; LIJZEN, J. P. A.; MARING, L. Soil and land management in a circular economy. **Science of the Total Environment**, [s. l.], 2018.

BRIBIÁN, Ignacio Zabalza; CAPILLA, Antonio Valero; USÓN, Alfonso Aranda. Life cycle assessment of building materials: Comparative analysis of energy and environmental impacts and evaluation of the eco-efficiency improvement potential. **Building and Environment**, [s. l.], v. 46, n. 5, p. 1133–1140, 2011. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2010.12.002>>

CEN, EUROPEAN COMMITTEE FOR STANDARDIZATION. **EN 15.978:2011 - Sustainability of construction works - Assessment of environmental performance of buildings - Calculation method.** Luxembourg Publications Office of the European Union, , 2011.

CETESB. **Emissões Veiculares no Estado de São Paulo.** São Paulo: CETESB, 2017.

CHEN, I. Chun; TSAI, Yeng Chieh; MA, Hwong Wen. Toward sustainable brownfield redevelopment using life-cycle thinking. **Sustainability (Switzerland)**, [s. l.], 2016.

CHESTER, Mikhail V. et al. Integrating life-cycle environmental and economic assessment with transportation and land use planning. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], 2013.

CHESTER, Mikhail V.; CANO, Alex. Time-based life-cycle assessment for environmental



polycymaking: Greenhouse gas reduction goals and public transit. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, [s. l.], 2016.

CIRAIG. **CIRCULAR ECONOMY: a critical literature review of concepts** *Climate Change 2013 - The Physical Science Basis*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://ebooks.cambridge.org/ref/id/CBO9781107415324A009>>.

COSTA, Ronaldo Silvestre Da. **QUANTIFICAÇÃO DAS EMISSÕES DE GASES DE EFEITO ESTUFA PARA VEÍCULOS DE COLETA DE RESÍDUOS DOMICILIARES ABASTECIDOS COM GNV E DIESEL-B5 UTILIZANDO AVALIAÇÃO DE CICLO DE VIDA (ACV)**. 2016. PUCRS, [s. l.], 2016.

DATAPOA. **Conjunto de dados com o nome, número, tabela horária e bacia de cada linha do sistema de transporte coletivo de ônibus de Porto Alegre**. 2019. Disponível em: <<http://datapoa.com.br/>>. Acesso em: 20 set. 2006.

DOMINGUES, Ana R. et al. Applying Multi-Criteria Decision Analysis to the Life-Cycle Assessment of vehicles. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 107, p. 749–759, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2015.05.086>>

EBINA, Yoshinori Cássio. **Projeto de novo ônibus urbano: uma proposta de melhoria do transporte coletivo no Brasil**. 2015. UFRGS, [s. l.], 2015.

ECOINVENT. **Ecoinvent database - Version 3.3**. 2018. Disponível em: <<https://www.ecoinvent.org/home.html>>.

EL-SAYED MOHAMED MAHGOUB, Mohamed et al. Towards sustainability in urban water: A life cycle analysis of the urban water system of Alexandria City, Egypt. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], 2010.

EPTC, Empresa Pública de Transporte e Circulação. **Dados de consumo, rodagem e número de passageiros fornecidos sobre demanda no mês de Novembro de 2018 - Valores para os anos de 2017-2018** Porto Alegre, Brazil EPTC, , 2018.

EUROSTAT. **Glossary:Passenger-kilometre**. 2019. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Glossary:Passenger-kilometre>>. Acesso em: 20 set. 2005.

FANG, Kai et al. Carbon footprints of urban transition: Tracking circular economy promotions in Guiyang, China. **Ecological Modelling**, [s. l.], 2017.

FARIA, Dutra Ivan. **Ambiente e Energia : Crença e Ciência no Licenciamento Ambiental - Parte III : Sobre Alguns dos Problemas que Dificultam o Licenciamento Ambiental no Brasil**. Textos par ed. Brasília: Senado Federal, Subsecretaria de Edições Técnicas, 2011.

FAZIO, S. et al. **Supporting information to the characterisation factors of recommended EF Life Cycle Impact Assessment method**. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://ec.europa.eu/jrc>>

FRANÇOIS, Cyrille et al. Environmental assessment of urban mobility: Combining life cycle assessment with land-use and transport interaction modelling—Application to Lyon (France).

**Ecological Indicators**, [s. l.], 2017.

GARCIA, Rita; GREGORY, Jeremy; FREIRE, Fausto. Dynamic fleet-based life-cycle greenhouse gas assessment of the introduction of electric vehicles in the Portuguese light-duty fleet. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 20, n. 9, p. 1287–1299, 2015.

GENG, Yong et al. Implementing China's circular economy concept at the regional level: A review of progress in Dalian, China. **Waste Management**, [s. l.], 2009.

GHISELLINI, Patrizia; CIALANI, Catia; ULGIATI, Sergio. **A review on circular economy: The expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems** **Journal of Cleaner Production**, 2016.

GUINÉE, J. B. et al. **Handbook on Life Cycle Assessment: Operational Guide to the ISO Standards**. Hardbound: Kluwer Academic Publishers, 2002.

HAUPT, Melanie; ZSCHOKKE, Mischa. How can LCA support the circular economy?—63rd discussion forum on life cycle assessment, Zurich, Switzerland, November 30, 2016. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 22, n. 5, p. 832–837, 2017.

HEINONEN, Jukka et al. Situated lifestyles: II. the impacts of urban density, housing type and motorization on the greenhouse gas emissions of the middle-income consumers in Finland. **Environmental Research Letters**, [s. l.], 2013. a.

HEINONEN, Jukka et al. Situated lifestyles: I. How lifestyles change along with the level of urbanization and what the greenhouse gas implications are - A study of Finland. **Environmental Research Letters**, [s. l.], 2013. b.

HEINONEN, Jukka; JUNNILA, Seppo. Implications of urban structure on carbon consumption in metropolitan areas. **Environmental Research Letters**, [s. l.], v. 6, p. 10, 2011.

HENDRICKSON, Thomas P.; NIKOLIC, Milos; RAKAS, Jasenka. Selecting climate change mitigation strategies in urban areas through life cycle perspectives. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], 2016.

HOU, Deyi et al. Climate change mitigation potential of contaminated land redevelopment: A city-level assessment method. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], 2018.

HUIJBREGTS, MAJ et al. ReCiPe 2016. **National Institute for Public Health and the Environment**, [s. l.], p. 194, 2016. Disponível em:  
<<https://www.rivm.nl/bibliotheek/rapporten/2016-0104.pdf>>

IACOVIDOU, Eleni et al. A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], 2017.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Censo 2010**. 2010.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **IBGE Cidades**. 2018a. Disponível em:

<<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/rs/porto-alegre/panorama>>. Acesso em: 20 ago. 2002.

IBGE, Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Indicadores para os Objetivos do Desenvolvimento Sustentável**. 2018b.

IBICT, Instituto Brasileiro de Informação em Ciência e Tecnologia. **Recomendação de modelos de avaliação de impacto do ciclo de vida para o contexto brasileiro**. [s.l: s.n.].

ILADES. **Inventário de Emissões dos Gases de Efeito Estufa - GEE da Mobilidade Urbana na Região Central de Porto Alegre**. [s.l: s.n.].

IPCC, Internacional Painel for Climate Change. **In: Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Edenhofer, O., R. Pichs-Madruga, Y. Sokona, E. Farahani, S. Kadner, K. Seyboth, A. . Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.**

JEONG, Hyunju et al. Life cycle assessment of low impact development technologies combined with conventional centralized water systems for the City of Atlanta, Georgia. **Frontiers of Environmental Science and Engineering**, [s. l.], 2016.

JEONG, Hyunju; MINNE, Elizabeth; CRITTENDEN, John C. Life cycle assessment of the City of Atlanta, Georgia's centralized water system. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], 2015.

JOHN, Vanderley M.; AGOPYAN, Vahan. Reciclagem de resíduos da construção. [s. l.], p. 12, 2000. Disponível em:  
<[http://sinop.unemat.br/site\\_antigo/prof/foto\\_p\\_downloads/fot\\_12596yeciclagem\\_de\\_besiduos\\_da\\_constbucacao\\_-\\_8\\_pdf\\_Reciclagem\\_de\\_residuos\\_da\\_construcao\\_-\\_8.pdf](http://sinop.unemat.br/site_antigo/prof/foto_p_downloads/fot_12596yeciclagem_de_besiduos_da_constbucacao_-_8_pdf_Reciclagem_de_residuos_da_construcao_-_8.pdf)>

KEELER, Marian; BURKE, Marian. **Fundamentos de projeto de edificações sustentáveis**. Porto Alegre.

LANE, J. L.; DE HAAS, D. W.; LANT, P. A. The diverse environmental burden of city-scale urban water systems. **Water Research**, [s. l.], 2015.

LAZAREVIC, David; BUCLET, Nicolas; BRANDT, Nils. The application of life cycle thinking in the context of European waste policy. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 29–30, p. 199–207, 2012.

LEICHTER, Michelle; HACKENHAAR, Isadora; PASSUELLO, Ana. Avaliação dos impactos ambientais relacionados à mobilidade urbana: estudo de caso considerando dois bairros da cidade de Porto Alegre. [s. l.], p. 810–817, 2019.

LIU, Dehai et al. Constructivism scenario evolutionary analysis of zero emission regional planning: A case of Qaidam Circular Economy Pilot Area in China. **International Journal of Production Economics**, [s. l.], 2012.

LOISEAU, Eléonore et al. Environmental assessment of a territory: An overview of existing tools and methods. **Journal of Environmental Management**, [s. l.], v. 112, p. 213–225, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2012.07.024>>

LOISEAU, Eléonore et al. Adapting the LCA framework to environmental assessment in land planning. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], 2013.

LOISEAU, Eléonore 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**, [s. l.], v. 80, p. 17–29, 2014.

LOISEAU, Eléonore 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**, [s. l.], v. 176, p. 474–485, 2018.

LOTTEAU, Marc et al. **Critical review of life cycle assessment (LCA) for the built environment at the neighborhood scale** *Building and Environment*, 2015.

LOTTEAU, Marc; YEPEZ-SALMON, Grace; SALMON, Nicolas. Environmental assessment of sustainable neighborhood projects through NEST, a decision support tool for early stage urban planning. In: *PROCEDIA ENGINEERING 2015, Anais...* [s.l: s.n.]

MANFREDI, Simone; PANT, Rana. Improving the environmental performance of bio-waste management with life cycle thinking (LCT) and life cycle assessment (LCA). **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 18, n. 1, p. 285–291, 2013.

MARICATO, Erminia. **Para entender a crise urbana**. Edição: 1ª ed. São Paulo: Expressão Popular, 2015.

MATOS, Grecia; WAGNER, Lorie. CONSUMPTION OF MATERIALS IN THE UNITED STATES , 1900 – 1995. [s. l.], p. 107–122, 1998.

MENEGAT, R. et al. **Atlas Ambiental de Porto Alegre**. 3ª edição ed. Porto Alegre, Brazil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2006.

MIRABELLA, Nadia; ALLACKER, Karen; SALA, Serenella. Current trends and limitations of life cycle assessment applied to the urban scale: critical analysis and review of selected literature. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], p. 1–20, 2018.

MORAGA, Gustavo Longaray. Avaliação do Ciclo de Vida e simulação termoenergética em unidade habitacional unifamiliar do Programa Minha Casa Minha Vida. [s. l.], 2017.

NAHLIK, Matthew J.; CHESTER, Mikhail V. Transit-oriented smart growth can reduce life-cycle environmental impacts and household costs in Los Angeles. **Transport Policy**, [s. l.], 2014.

NORMAN, Jonathan; MACLEAN, Heather L.; KENNEDY, Christopher A. Comparing high and low residential density: Life-cycle analysis of energy use and greenhouse gas emissions. **Journal of Urban Planning and Development**, [s. l.], v. 132, n. 1, p. 10–21, 2006.

OPENLCA. **Free databases - Download - openLCA Nexus**. 2018. Disponível em: <<https://nexus.openlca.org/downloads>>.

OSD, Overshoot Day Organization. **Past Earth Overshoot Day**. 2017. Disponível em: <<https://www.overshootday.org/newsroom/infographics/>>. Acesso em: 20 ago. 2002.

PAN, Shu Yuan et al. Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: A review. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], 2014.

PETIT-BOIX, Anna et al. **Application of life cycle thinking towards sustainable cities: A review** **Journal of Cleaner Production**, 2017.

PETIT-BOIX, Anna; LEIPOLD, Sina. Circular economy in cities: Reviewing how environmental research aligns with local practices. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], v. 195, p. 1270–1281, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.05.281>>

PETROBRAS. **Informações técnicas do Óleo Diesel**. 2018a. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/produtos/automotivos/oleo-diesel/>>.

PETROBRAS. **Informações técnicas da composição do Diesel**. 2018b. Disponível em: <<http://www.petrobras.com.br/pt/produtos-e-servicos/composicao-de-precos-de-venda-ao-consumidor/diesel/>>.

PETROBRAS. **Ficha de Informações de Segurança de Produto Químico - FISPQ. ÓLEO DIESEL B S10 ADIT. PETROBRAS GRID**. Rio de Janeiro.

PMPA, Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano Ambiental de Porto Alegre (PDDUA)** Porto Alegre Diário Oficial de Porto Alegre, 24 dez. 1999, , 1999.

PMPA, Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **LEI Nº 12.381, DE 9 DE MARÇO DE 2018. Institui e define como Zona de Inovação Sustentável de Porto Alegre (Zispoa) a área que especifica, compreendida entre os Bairros Bom Fim, Farroupilha, Floresta, Independência, Rio Branco e Santana.** Porto Alegre Prefeitura de Porto Alegre, , 2018.

PMPA, Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Orçamento Participativo**. 2019a. Disponível em: <<http://www2.portoalegre.rs.gov.br/op/default.php>>. Acesso em: 20 ago. 2009.

PMPA, Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Diagnóstico da Mobilidade no Município de Porto Alegre e sua Interface Metropolitana**. Porto Alegre.

PMPA, Prefeitura Municipal de Porto Alegre. **Prognóstico da Mobilidade no Município de Porto Alegre**. Porto Alegre.

POMPONI, Francesco; MONCASTER, Alice. Circular economy for the built environment: A research framework. **Journal of Cleaner Production**, [s. l.], 2017.

QUERINI, Florent; BENETTO, Enrico. Combining agent-based modeling and life cycle assessment for the evaluation of mobility policies. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], 2015.

RAMASWAMI, Anu et al. A demand-centered, hybrid life-cycle methodology for city-scale greenhouse gas inventories. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], 2008.

RAMASWAMI, Anu et al. A Social-Ecological-Infrastructural Systems Framework for Interdisciplinary Study of Sustainable City Systems: An Integrative Curriculum Across Seven Major Disciplines. **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], 2012.

ROLDÁN-FONTANA, J. et al. Optimization of CO2 emissions in the design phases of urban planning, based on geometric characteristics: a case study of a low-density urban area in Spain. **Sustainability Science**, [s. l.], 2015.

SALVATI, Luca; CARLUCCI, Margherita. In-Between Stability and Subtle Changes: Urban Growth, Population Structure, and the City Life Cycle in Rome. **Population, Space and Place**, [s. l.], 2016.

SÄYÑÄJOKI, Eeva-Sofia; HEINONEN, Jukka; JUNNILA, Seppo. Role of Urban Planning in Encouraging More Sustainable Lifestyles. **Journal of Urban Planning and Development**, [s. l.], 2015.

SILVA, Fernanda Belizario et al. Is it relevant to to include capital goods in the Life Cycle Assessment of construction products? In: 2018, Brasília. **Anais... Brasília: VI Congresso Brasileiro sobre Gestão do Ciclo de Vida**, 2018.

SLAGSTAD, Helene; BRATTEBØ, Helge. Use of LCA to evaluate solutions for water and waste infrastructure in the early planning phase of carbon-neutral urban settlements. **Smart and Sustainable Built Environment**, [s. l.], 2013.

STROHBACH, Michael W.; ARNOLD, Eric; HAASE, Dagmar. The carbon footprint of urban green space-A life cycle approach. **Landscape and Urban Planning**, [s. l.], 2012.

TEIXEIRA, Elba Calesso; FELTES, Sabrina; DE SANTANA, Eduardo Rodrigo Ramos. Estudo das emissões de fontes móveis na região metropolitana de Porto Alegre, Rio Grande do Sul. **Química Nova**, [s. l.], v. 31, n. 2, p. 244–248, 2008.

TUNESI, Simonetta; BARONI, Sergio; BOARINI, Sandro. Waste flow analysis and life cycle assessment of integrated waste management systems as planning tools: Application to optimise the system of the City of Bologna. **Waste Management & Research**, [s. l.], 2016.

UN-HABITAT. **World Urban Campaign**[WWW Document]UN, , 2012. Disponível em: <<https://issuu.com/worldurbancampaign/docs/wuc-2015-brochure-web?e¼22673641/32133275>>. [https://issuu.com/worldurbancampaign/docs/wuc-2015-brochure-web? e¼22673641/32133275](https://issuu.com/worldurbancampaign/docs/wuc-2015-brochure-web?e¼22673641/32133275)>

UN. **World Urbanization Prospects: Highlights**. New York, USA.

UN. **Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**.United Nations. Gen. Assem. 70 Sess, , 2015. Disponível em: <<https://doi.org/10.1007/s13398-014-0173-7.2>>

UN, United Nations. **Report of the Inter-Agency and Expert Group on Sustainable Development Goal Indicators**. 2016.

UNEP/SETAC. **Life Cycle approaches : The road from analysis to practice**United Nations Publication. [s.l: s.n.].

UNEP/SETAC. **Greening the economy through life cycle thinking**. [s.l: s.n.].

UNEP, United Nations Environment Programme. **Global Guidance for Life Cycle Impact**

Assessment Indicators. [s. l.], v. 1, n. December, 2016.

VARGAS, Julio Celso. Centros urbanos vitais. [s. l.], v. 2, 2003. Disponível em: <<http://www.academia.edu/download/31058835/vargas-propur-centros-urbanos.pdf>>

VIANA, Marcelo Mendes. **Inventário do Ciclo de Vida do Biodiesel Étílico do Óleo**. 2008. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, [s. l.], 2008.

WEIDEMA, Bo. Has ISO 14040/44 Failed Its Role as a Standard for Life Cycle Assessment? **Journal of Industrial Ecology**, [s. l.], v. 18, n. 3, p. 324–326, 2014.

WEIDEMA, Bo P. et al. **Scenarios in life-cycle assessment** Pensacola FL, USA Society of Environmental Toxicology and Chemistry (SETaC), , 2004.

WEISS, Marc; SEDMAK-WEISS, Nancy; RODRIGUEZ, Elaine Yamashita. **A Report to the Rio Grande do Sul State Government (AGDI) and the World Bank, by Global Urban Development (GUD) and Unisinos, applying GUD's Metropolitan Economic Strategy, Sustainable Innovation, and Inclusive Prosperity Framework**. Porto Alegre, Brazil.

WERNET, Gregor et al. The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. **International Journal of Life Cycle Assessment**, [s. l.], v. 21, n. 9, p. 1218–1230, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>>

WIGGERING, Hubert et al. The Concept of Multifunctionality in Sustainable Land Development. In: HELMING, Katharina; WIGGERING, Hubert (Eds.). **Sustainable Development of Multifunctional Landscapes**. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2003. p. 3–18.

WRI; C40; ICLEI. Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories: An Accounting and Reporting Standard for Cities. [s. l.], p. 1–176, 2014. Disponível em: <[http://ghgprotocol.org/files/ghgp/GHGP\\_GPC.pdf](http://ghgprotocol.org/files/ghgp/GHGP_GPC.pdf)>

ZHU, Lei et al. Science of the Total Environment Emissions characteristics of a diesel engine operating on biodiesel and biodiesel blended with ethanol and methanol. [s. l.], v. 408, n. x, p. 914–921, 2009.

ZISPOA. **História - A Evolução da ZISPOA desde Setembro de 2015**. 2018. Disponível em: <<http://www.zispoa.info/historia/>>.

## **APÊNDICE A – Análise qualitativa da revisão bibliográfica**



Nº	Autores	Ano	Título	Foco	Tema	Território	Resumo em linha
1	Petit-Boix <i>et al.</i>	2017	Application of life cycle thinking towards sustainable cities: A review	Revisão de Literatura	Vários	-	Resume a revisão da literatura sobre as 8 problemáticas urbanas e 28 estratégias relacionadas à sustentabilidade urbana e PCV.
2	Thabrew; Wiek; Ries	2009	Environmental decision making in multi-stakeholder contexts: applicability of life cycle thinking in development planning and implementation	Diretrizes para tomada de decisão	Gestão urbana - Tomada de decisão	-	A ACV com várias partes interessadas e várias escalas (de internacional para local) é proposta para reduzir impactos (incluindo aqueles associados a riscos) no processo de planejamento.
3	Nazir	2017	Understanding Life Cycle Thinking and its Practical Application to Agri-Food System	Revisão de Literatura	Agricultura	-	Uma análise de hotspot de sistemas agro-alimentares de estudos de ACV encontrados em uma SLR.
4	Thabrew; Ries	2009	Application of life cycle thinking in multidisciplinary multistakeholder contexts for cross-sectoral planning and implementation of sustainable development projects	Estudo de Caso - Exploratório	Sistema de água e esgoto	Cidade	Aplica a metodologia de ACV, proposta em um trabalho anterior, na aldeia de Unawatuna (Sri Lanka) para tratamento, uso e distribuição de água e esgoto.
5	Barandica <i>et al.</i>	2013	Applying life cycle thinking to reduce greenhouse gas emissions from road projects	Nova metodologia ou ferramenta;	Infraestrutura Urbana - Eng. Civil	-	Desenvolve um sistema de gerenciamento de informações baseado em um banco de dados de literatura para determinar quais fatores de construção de estradas emitem mais CO <sub>2</sub> na Espanha.
6	Lazarevic ; Buclet; Brandt	2012	The application of life cycle thinking in the context of European waste policy	Diretrizes para tomada de decisão	Resíduos	Europa	Utiliza ambas as abordagens PCV e ACV para propor uma nova metodologia de gerenciamento de resíduos para cidades.
7	Manfredi; Pant	2012	Improving the environmental performance of bio-waste management with life cycle thinking (LCT) and life cycle assessment (LCA)	Diretrizes para tomada de decisão	Resíduos	Europa	Geração de diretrizes que fornecem suporte através de informações de impactos ambientais para a tomada de decisões e políticas para o gerenciamento de bio-resíduos usando PCV e ACV.
8	Haupt, Melanie ; Zschokke, Mischa	2017	How can LCA support the circular economy?	Revisão de Literatura	Vários	-	Estudos de caso e ACV utilizados como ferramenta para avaliar a EC.

Nº	Autores	Ano	Título	Foco	Tema	Território	Resumo em linha
9	Esa <i>et al.</i>	2016	Developing strategies for managing construction and demolition wastes in Malaysia based on the concept of circular economy	Nova metodologia ou ferramenta	Resíduos	-	Análise da aplicação do conceito de EC nas políticas públicas de Dalian, China.
10	Fang <i>et al.</i>	2017	Carbon footprints of urban transition: Tracking circular economy promotions in Guiyang, China	Estudo de Caso - Exploratório	Gestão urbana - Tomada de decisão	Cidade	Análise dos benefícios as práticas de baixo carbono da EC por um período de dez anos (2002-2012) por meio de um modelo híbrido de impacto direto e indireto da produção e consumo de cidades, apresentando a pegada de carbono de Guiyang.
11	Geng <i>et al.</i>	2009	Implementing China's circular economy concept at the regional level: A review of progress in Dalian, China	Estudo de Caso - Exploratório	Gestão urbana - Tomada de decisão	Cidade	Análise da aplicação do conceito de EC nas políticas de administração de Dalian, bem como identificação de desafios e propostas.
12	Pomponi et Moncaster	2016	Circular economy for the built environment: A research framework	Revisão de Literatura/ Nova metodologia ou ferramenta	Edificações	-	Uma revisão do uso da EC no ambiente construído, com foco em 6 principais áreas de estudo..
13	Makropoulos <i>et al.</i>	2017	Sewer-mining: A water reuse option supporting circular economy, public service provision and entrepreneurship	Estudo de Caso - Exploratório	Sistema de esgoto	Cidade	Discussão sobre reutilização de água, centralizada ou descentralizada, com base no conceito de EC. Estudo piloto na Grécia sobre "mineração de esgoto".
14	Pan <i>et al.</i>	2015	Strategies on implementation of waste-to-energy (WTE) supply chain for circular economy system: a review	Revisão de Literatura / Diretrizes para tomada de decisão	Resíduos e energia	-	Uso de tecnologias e técnicas de desperdício em energia, como gerenciamento de desperdícios e energia; Propõem estratégias para implementação baseada em EC.
15	Liu <i>et al.</i>	2011	Constructivism scenario evolutionary analysis of zero emission regional planning: A case of Qaidam Circular Economy Pilot Area in China	Estudo de Caso - Exploratório	Gestão urbana - Tomada de decisão	Região	Análise evolutiva de um cenário de construtivismo de um modelo de programação multiobjectivo, transformado em um modelo de programação misto integral único que analisa o lucro máximo sob várias condições de restrição, incluindo recursos naturais, capacidade ambiental e fatores sociais e econômicos na Área Piloto de EC de Qaidam

Nº	Autores	Ano	Título	Foco	Tema	Território	Resumo em linha
16	Ghisellini <i>et al.</i>	2015	A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems	Revisão de Literatura / Diretrizes para tomada de decisão	Gestão urbana - Tomada de decisão	-	Revisão de estudos de EC em políticas públicas
17	Iaconvidou <i>et al.</i>	2017	A pathway to circular economy: Developing a conceptual framework for complex value assessment of resources recovered from waste	Nova metodologia ou ferramenta	Resíduos	-	Cria uma estrutura para uma abordagem híbrida para avaliar o valor da gestão de resíduos a ser considerado na EC.
18	Breure <i>et al.</i>	2017	Soil and land management in a circular economy	Revisão de Literatura	Uso de solo	-	Análise do uso e espaço da terra e seu impacto a partir do conceito de EC através de uma revisão da literatura.
19	Chester <i>et al.</i>	2013	Infrastructure and automobile shifts: Positioning transit to reduce life-cycle environmental impacts for urban sustainability goals	Estudo de Caso - Comparação	Mobilidade	Cidade	Aplicação da ACV para avaliar o modal de transporte menos impactante no trânsito de Los Angeles.
20	François et al	2017	Environmental assessment of urban mobility: Combining life cycle assessment with land-use and transport interaction modelling— Application to Lyon (France)	Nova metodologia ou ferramenta	Mobilidade	Cidade	Nova ferramenta de avaliação da mobilidade urbana que inclui os hábitos de transporte e comportamentos de mobilidade testados no sistema de mobilidade urbana em Lyon.
21	Chester <i>et al.</i>	2013	Integrating life-cycle environmental and economic assessment with transportation and land use planning	Estudo de Caso - Comparação	Mobilidade	Cidade	Nova ferramenta que integra ACV de transportes e uso da terra (ITLU).
22	Hendrickson <i>et al.</i>	2016	Selecting climate change mitigation strategies in urban areas through life cycle perspectives	Diretrizes para tomada de decisão	Vários	Cidade e país	Aplicação de uma ACV híbrida e de uma ACCV executados para encontrar alternativas para a mitigação de GEE em San Francisco, EUA.
23	Su <i>et al.</i>	2016	Urban energy structure optimization at the sector scale: Considering environmental impact based on life cycle assessment	Nova metodologia ou ferramenta	Energia	Cidade	Modelo de otimização multiobjetivo que integra análise de impacto ambiental para alocar recursos energéticos nos setores urbanos

Nº	Autores	Ano	Título	Foco	Tema	Território	Resumo em linha
24	Di Maria <i>et al.</i>	2014	A holistic life cycle analysis of waste management scenarios at increasing source segregation intensity: The case of an Italian urban area	Estudo de Caso - Comparação	Resíduos	Área urbana	Aplicação da ACV para comparar vários cenários de gerenciamento de resíduos para a área urbana da Itália.
25	Lotteau <i>et al.</i>	2015	Environmental assessment of sustainable neighborhood projects through NEST, a decision support tool for early stage urban planning	Nova metodologia ou ferramenta	Gestão urbana - Tomada de decisão	Área peri-urbana	Nova ferramenta de ACV (NEST) para uso em estágio inicial de projeto de bairros sustentáveis.
26	Nahlik <i>et al.</i>	2014	Transit-oriented smart growth can reduce life-cycle environmental impacts and household costs in Los Angeles	Estudo de Caso - Comparação	Mobilidade	Cidade	Aplicação de ACV e ACCV para comparar cenários de desenvolvimento urbano no transporte.
27	Huang <i>et al.</i>	2017	Life-cycle energy modelling for urban precinct systems	Nova metodologia ou ferramenta	Energia	Distrito	Nova ferramenta para ACV energético é gerada e testada com um estudo de caso em Adelaide, na Austrália, para avaliar seu desempenho energético.
28	Mastrucci <i>et al.</i>	2017	Life Cycle Assessment of building stocks from urban to transnational scales: A review	Revisão de Literatura	Gestão urbana - Tomada de decisão / Edificações	-	Revisão de literatura sobre a aplicação da ACV da escala urbana à transnacional.
29	Lane <i>et al.</i>	2015	The diverse environmental burden of city-scale urban water systems	Estudo de Caso - Comparação	Sistemas de água	Cidade	Combinação e comparação de cenários e dados contemporâneos em uma análise de ACV de sistemas urbanos integrados de água.
30	Duffy	2009	Land use planning in Ireland-a life cycle energy analysis of recent residential development in the Greater Dublin Area	Estudo de Caso - Comparação	Edificações / Energia	Cidade	Comparação das emissões das regiões da cidade de Dublin com base na aplicação da ACV.
31	Bergesen <i>et al.</i>	2017	Environmental and natural resource implications of sustainable urban infrastructure systems	Estudo de Caso - Comparação	Mobilidade, edificações e energia	Cidades	Aplicação de uma abordagem híbrida de ACV que usa cenários futuros para avaliar emissões, uso de água, consumo de metais e uso da terra de sistemas sócio-técnicos selecionados em 84 cidades.

Nº	Autores	Ano	Título	Foco	Tema	Território	Resumo em linha
32	Saynajoki <i>et al.</i>	2014	Role of Urban Planning in Encouraging More Sustainable Lifestyles	Estudo de Caso - Exploratório	Gestão urbana - Tomada de decisão	Cidades, áreas urbana e países	Comparação de pegada de carbono no nível de cidades e outros conglomerados urbanos, que pode ser explicada pelo consumo pessoal.
33	Chen <i>et al.</i>	2016	Toward sustainable brownfield redevelopment using life-cycle thinking	Nova metodologia ou ferramenta	Uso de solo	Cidade	Nova ferramenta para a determinação da viabilidade de “redesenvolvimento” sustentável relevante para os diferentes cenários de reutilização de terras com uma abordagem híbrida na China.
34	Oliver-Solà <i>et al.</i>	2008	Environmental impacts of natural gas distribution networks within urban neighborhoods	Estudo de Caso - Comparação	Infraestrutura Urbana - Eng. Civil	Vizinhança	Aplicação da ACV para identificar impactos ambientais relacionados às redes de distribuição de gás natural em bairros de alta e baixa densidade.
35	Heinonen et Junnila	2011	Implications of urban structure on carbon consumption in metropolitan areas	Estudo de Caso - Comparação	Gestão urbana - Tomada de decisão	Áreas metropolitanas	Aplicação de método híbrido de ACV para calcular as pegadas de carbono baseadas no consumo dos consumidores metropolitanos.
36	Huang <i>et al.</i>	2017	Carbon assessment for urban precincts: Integrated model and case studies	Nova metodologia ou ferramenta	Gestão urbana - Tomada de decisão	Distrito	Nova ferramenta que considera fatores morfológicos e estilos de vida dos ocupantes de áreas urbanas em um modelo integrado de ACV para avaliação de carbono.
37	Heinonen <i>et al.</i>	2013	Situated lifestyles: I. How lifestyles change along with the level of urbanization and what the greenhouse gas implications are - A study of Finland	Estudo de Caso - Comparação	Gestão urbana - Tomada de decisão	-	Aplicação de ACV para análise das emissões de GEE do estilo de vida incorporadas em diferentes bens e serviços - incluindo densidade urbana, tipo de moradia e motorização - em diferentes formas urbanas básicas na Finlândia: metropolitana, urbana, semi-urbana e rural.
38	Heinonen <i>et al.</i>	2013	Situated lifestyles: II. the impacts of urban density, housing type and motorization on the greenhouse gas emissions of the middle-income consumers in Finland	Estudo de Caso - Comparação	Gestão urbana - Tomada de decisão	-	Sequência: aplicação de ACV para análise das emissões de GEE do estilo de vida incorporadas em diferentes bens e serviços - o segmento de renda média e procurou diferenças nos estilos de vida quando as restrições orçamentárias são iguais, adicionando o tipo de moradia e a motorização das variáveis à avaliação.
39	Hou <i>et al.</i>	2017	Climate change mitigation potential of contaminated land redevelopment: A city-level assessment method	Nova metodologia ou ferramenta	Uso de solo	Cidade	Nova ferramenta para avaliação do potencial de redução de GEE por reconstrução de áreas de restauração de solo em San Francisco.

Nº	Autores	Ano	Título	Foco	Tema	Território	Resumo em linha
40	Roldán-Fotnana <i>et al.</i>	2015	Optimization of CO2 emissions in the design phases of urban planning, based on geometric characteristics: a case study of a low-density urban area in Spain	Estudo de Caso - Exploratório	Edificações / Gestão urbana - Tomada de decisão	Cidade	Aplicação da ACV para análise do processo de construção de seis tipologias diferentes, considerando os perfis e estruturas da habitação.
41	Ferrer <i>et al.</i>	2016	Sustainable urban infrastructure: A review	Revisão de Literatura	Infraestrutura Urbana - Eng. Civil	-	Revisão sistemática da literatura sobre infraestrutura urbana sustentável e uma análise da temática de todos os artigos revisados.
42	Jeong <i>et al.</i>	2015	Life cycle assessment of the City of Atlanta, Georgia's centralized water system	Estudo de Caso - Exploratório	Sistema de água e esgoto	Cidade	Aplicação da ACV para o sistema de água centralizado da cidade de Atlanta, a fim de entender seus pontos críticos para impactos ambientais.
43	Vedrenne <i>et al.</i>	2014	Life cycle assessment as a policy-support tool: The case of taxis in the city of Madrid	Estudo de Caso - Comparação	Mobilidade	Cidade	Aplicação da ACV para análise de políticas de transporte público e qualidade do ar em Madri.
44	Koroneos & Nanaki	2012	Integrated solid waste management and energy production - a life cycle assessment approach: the case study of the city of Thessaloniki	Estudo de Caso - Comparação	Resíduos	Cidade	Comparação entre alternativas de gerenciamento de resíduos sólidos e de consumo de energia na Grécia.
45	Mahgoub <i>et al.</i>	2010	Towards sustainability in urban water: a life cycle analysis of the urban water system of Alexandria City, Egypt	Estudo de Caso - Comparação	Sistemas de água	Cidade	Aplicação da ACV na comparação de cenários do sistema de água urbano da cidade de Alexandria, Egito.
46	Ramaswami <i>et al.</i>	2008	A Demand-Centered, Hybrid Life-Cycle Methodology for City-Scale Greenhouse Gas Inventories	Nova metodologia ou ferramenta	Gestão urbana - Tomada de decisão	Cidade e país	Novo metodologia híbrida, centrada na demanda e baseada na ACV para realizar inventários de GEE em escala de cidades.
47	Ripa <i>et al.</i>	2017	The relevance of site-specific data in Life Cycle Assessment (LCA). The case of the municipal solid waste management in the metropolitan city of Naples (Italy)	Estudo de Caso - Comparação	Resíduos	Áreas metropolitanas	Comparação entre diferentes rotas de gerenciamento de resíduos para a cidade metropolitana de Nápoles.
48	Zhan & Chui	2016	Evaluating the life cycle net benefit of low impact development in a city	Nova metodologia ou ferramenta	Gestão urbana - Tomada de decisão	Áreas metropolitanas	Nova ferramenta de quantificação do ciclo de vida da sustentabilidade para determinar os benefícios de tecnologias sustentáveis na área urbana.

Nº	Autores	Ano	Título	Foco	Tema	Território	Resumo em linha
49	Jeong <i>et al.</i>	2016	Life cycle assessment of low impact development technologies combined with conventional centralized water systems for the City of Atlanta, Georgia	Estudo de Caso - Comparação	Sistemas de água	Cidade	Aplicação de ACV na comparação de tecnologias sustentáveis para sistemas de água em bairros da cidade de Atlanta.
50	Salvati <i>et al.</i>	2014	In-Between Stability and Subtle Changes: Urban Growth, Population Structure, and the City Life Cycle in Rome	Estudo de Caso - Exploratório	Gestão urbana - Tomada de decisão	Áreas metropolitanas	Estudo da teoria do ciclo de vida urbano (ULC) sobre o crescimento e redistribuição da população ao longo do gradiente urbano em Roma, Itália.
51	Torkashvand <i>et al.</i>	2015	Projection of Environmental Pollutant Emissions From Different Final Waste Disposal Methods Based on Life Cycle Assessment Studies in Qazvin City	Estudo de Caso - Exploratório	Resíduos	Cidade	Aplicação de ACV para prever emissões da cidade de Qazvin (Irã) em diferentes métodos finais de disposição de resíduos sólidos.
52	Tunesi, Baroni, Boarini	2016	Waste flow analysis and life cycle assessment of integrated waste management systems as planning tools: Application to optimize the system of the City of Bologna	Diretrizes para tomada de decisão	Resíduos	Cidade	Aplicação da ACV de sistemas integrados de gerenciamento de resíduos em Bolonha, Itália, para o desenvolvimento de diretrizes para tomada de decisão.
53	Slagstadd & Brattebo	2012	LCA for household waste management when planning a new urban settlement	Estudo de Caso - Comparação	Resíduos	Áreas suburbanas	Comparação de cenários de gerenciamento de resíduos domésticos por uma ACV de um novo assentamento urbano na Noruega.
54	Slagstadd & Brattebo	2013	Use of LCA to evaluate solutions for water and waste infrastructure in the early planning phase of carbon-neutral urban settlements	Estudo de Caso - Exploratório	Gestão urbana - Tomada de decisão	Áreas suburbanas	Aplicação da ACV como uma ferramenta de planejamento inicial para avaliar água, águas residuais e resíduos em novos assentamentos urbanos neutros em carbono na Noruega.
55	Strohbach, Arnold, Haase	2012	The carbon footprint of urban green space—A life cycle approach	Estudo de Caso - Exploratório	Espaços verdes	Cidade	Aplicação da ACV para avaliar a pegada de carbono para o desempenho ambiental a longo prazo do espaço verde urbano.

Nº	Autores	Ano	Título	Foco	Tema	Território	Resumo em linha
56	Nathanail <i>et al.</i>	2016	A novel approach for assessing sustainable city logistics	Estudo de Caso - Exploratório	Mobilidade	Cidades	Aplicação da ASCV para analisar a logística da cidade.
57	Nathanail <i>et al.</i>	2016	Smart Interconnections of Interurban and Urban Freight Transport towards Achieving Sustainable City Logistics	Nova metodologia ou ferramenta	Mobilidade	Europa	Nova ferramenta de avaliação e a estimativa dos indicadores de soluções de logística inteligentes.
58	Prata <i>et al.</i>	2013	Moving towards the sustainable city: the role of electric vehicles, renewable energy and energy efficiency	Nova metodologia ou ferramenta	Mobilidade / Edificações / Energia	Região	Aplicação da ACV para avaliar o futuro papel dos veículos elétricos, o uso de energia renovável para necessidades de mobilidade e o aumento da eficiência energética para as famílias que moram na cidade de Aveiro, Portugal.
59	Ramaswami <i>et al.</i>	2012	A Social-Ecological-Infrastructural Systems Framework for Interdisciplinary Study of Sustainable City Systems	Nova metodologia ou ferramenta	Gestão urbana - Tomada de decisão	-	Combinação das ferramentas de MU e ACV em uma nova ferramenta de sistemas sócio-ecológicos-infraestruturais (SEIS) para avaliar o consumo de água, energia e CO <sub>2</sub> .
60	Mezher	2011	Building future sustainable cities: the need for a new mindset	Revisão de Literatura	Infraestrutura Urbana - Eng. Civil	Cidade	Revisão da literatura sobre o planejamento de projetos emergentes, considerando os conceitos “do berço ao túmulo” e ACVs. para construções sustentáveis.
61	Girardi et Temporelli	2016	Smartainability: a methodology for assessing the sustainability of the smart city	Nova metodologia ou ferramenta	Gestão urbana - Tomada de decisão	Cidade	Novo método pra geração de indicadores de sustentabilidade com base na abordagem LCT e na ISO 14040.
62	Hernández <i>et al.</i>	2016	Novel sustainability assessment procedure proposal for smart cities	Estudo de Caso - Exploratório	Vários	-	Aplicação da ACV a uma avaliação holística baseada em eficiência energética, economia, aceitação social, ACV e casas inteligentes.
63	Sozer <i>et al.</i>	2016	Application of a novel sustainability assessment procedure for smart cities in Soma District, Turkey	Estudo de Caso - Exploratório	Vários	-	Aplicação da ACV para simplificar o cálculo da sustentabilidade no distrito de Soma, Turquia.
64	Nakamura et Du Bousquet	2015	Constructing Execution and Life-Cycle Models for Smart City Services with Self-Aware IoT	Diretrizes para tomada de decisão	Vários	-	Diretrizes de um modelo de ciclo de vida integrado de serviços de cidades inteligentes, e aplicação em uma simulação de serviços de estacionamento.



## **APÊNDICE B - Impactos ambientais segundo projeções**

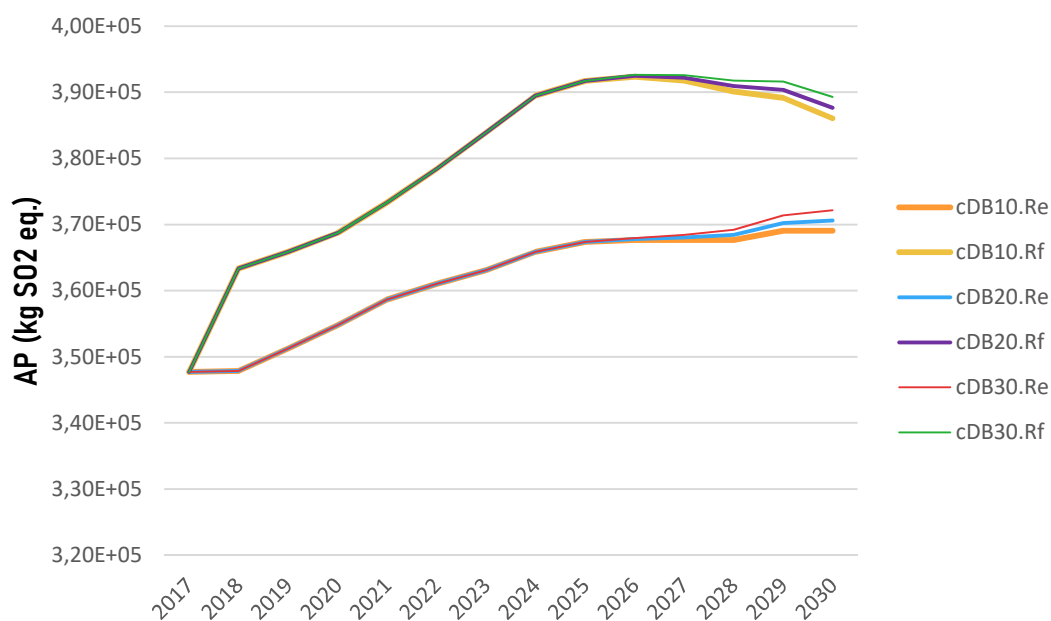
Resultados de avaliação de impactos totais anuais para os cenários de projeções citados na Tabela 6 no corpo do trabalho.

**Tabela B.1. AP (kg SO<sub>2</sub> eq.)**

Potencial de acidificação terrestre - ReCiPe 2008 midpoint (H), com fatores locais ("Brazil") da versão ReCiPe 2016 (ecoinvent v.3.3 LCIA methods)

Ano	cDB10.Re	cDB10.Rf	cDB20.Re	cDB20.Rf	cDB30.Re	cDB30.Rf
2017	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05
2018	3,48E+05	3,63E+05	3,48E+05	3,63E+05	3,48E+05	3,63E+05
2019	3,51E+05	3,66E+05	3,51E+05	3,66E+05	3,51E+05	3,66E+05
2020	3,55E+05	3,69E+05	3,55E+05	3,69E+05	3,55E+05	3,69E+05
2021	3,59E+05	3,73E+05	3,59E+05	3,73E+05	3,59E+05	3,73E+05
2022	3,61E+05	3,78E+05	3,61E+05	3,78E+05	3,61E+05	3,78E+05
2023	3,63E+05	3,84E+05	3,63E+05	3,84E+05	3,63E+05	3,84E+05
2024	3,66E+05	3,89E+05	3,66E+05	3,89E+05	3,66E+05	3,89E+05
2025	3,67E+05	3,92E+05	3,67E+05	3,92E+05	3,67E+05	3,92E+05
2026	3,68E+05	3,92E+05	3,68E+05	3,92E+05	3,68E+05	3,93E+05
2027	3,68E+05	3,92E+05	3,68E+05	3,92E+05	3,68E+05	3,93E+05
2028	3,68E+05	3,90E+05	3,68E+05	3,91E+05	3,69E+05	3,92E+05
2029	3,69E+05	3,89E+05	3,70E+05	3,90E+05	3,71E+05	3,92E+05
2030	3,69E+05	3,86E+05	3,71E+05	3,88E+05	3,72E+05	3,89E+05

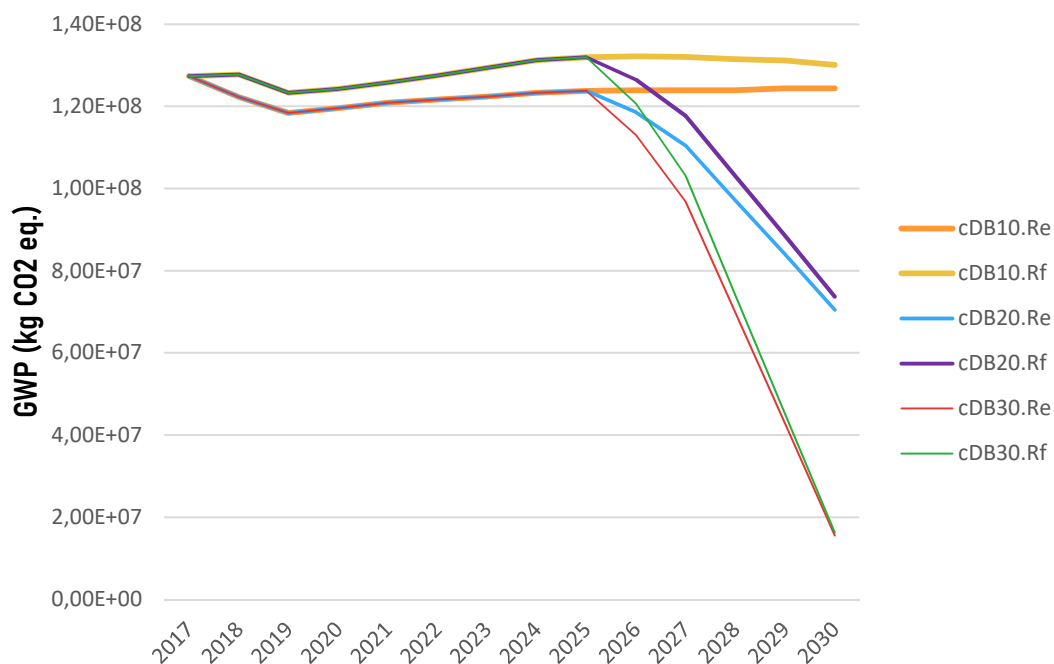
**Figura B.1. Potencial de acidificação terrestre**



**Tabela B.2. GWP (kg CO<sub>2</sub> eq.)**

Potencial de aquecimento global – horizonte de 100 anos - IPCC 2013 (ecoinvent v.3.3 LCIA methods)

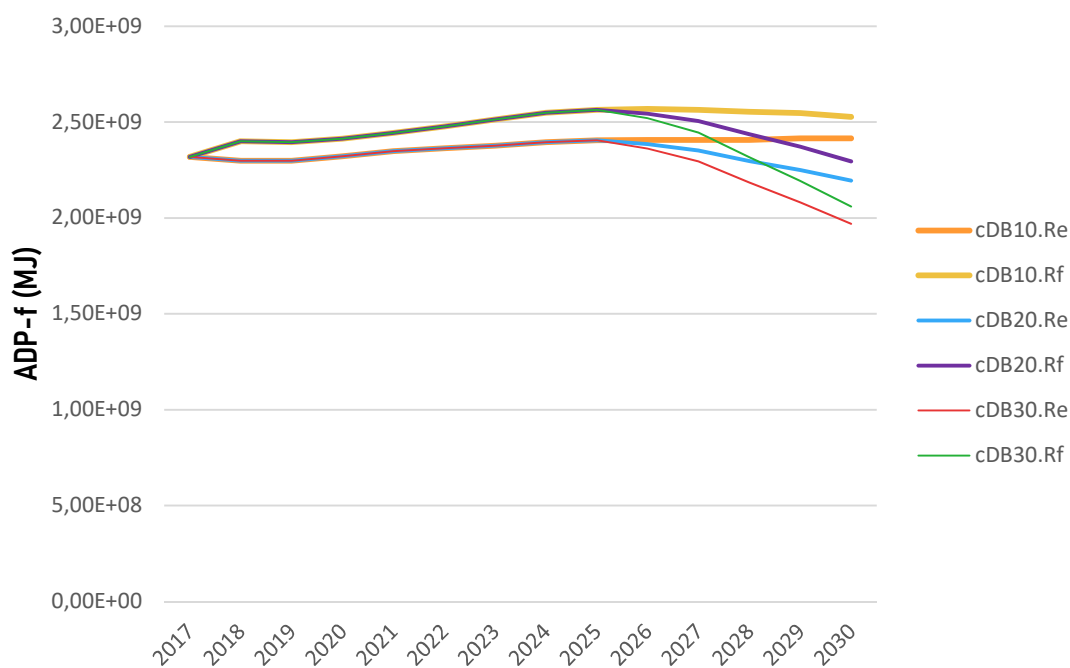
Ano	cDB10.Re	cDB10.Rf	cDB20.Re	cDB20.Rf	cDB30.Re	cDB30.Rf
2017	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08
2018	1,22E+08	1,28E+08	1,22E+08	1,28E+08	1,22E+08	1,28E+08
2019	1,18E+08	1,23E+08	1,18E+08	1,23E+08	1,18E+08	1,23E+08
2020	1,20E+08	1,24E+08	1,20E+08	1,24E+08	1,20E+08	1,24E+08
2021	1,21E+08	1,26E+08	1,21E+08	1,26E+08	1,21E+08	1,26E+08
2022	1,22E+08	1,28E+08	1,22E+08	1,28E+08	1,22E+08	1,28E+08
2023	1,22E+08	1,29E+08	1,22E+08	1,29E+08	1,22E+08	1,29E+08
2024	1,23E+08	1,31E+08	1,23E+08	1,31E+08	1,23E+08	1,31E+08
2025	1,24E+08	1,32E+08	1,24E+08	1,32E+08	1,24E+08	1,32E+08
2026	1,24E+08	1,32E+08	1,19E+08	1,26E+08	1,13E+08	1,21E+08
2027	1,24E+08	1,32E+08	1,10E+08	1,18E+08	9,68E+07	1,03E+08
2028	1,24E+08	1,31E+08	9,70E+07	1,03E+08	6,97E+07	7,39E+07
2029	1,24E+08	1,31E+08	8,39E+07	8,85E+07	4,27E+07	4,50E+07
2030	1,24E+08	1,30E+08	7,04E+07	7,37E+07	1,55E+07	1,62E+07

**Figura B.2.** Potencial de aquecimento global – horizonte de 100 anos

**Tabela B.3. ADP-f (MJ)**

Depleção potencial de recursos abióticos – elementos fósseis - CML 2001 (openLCA LCIA methods v.1.5.6)

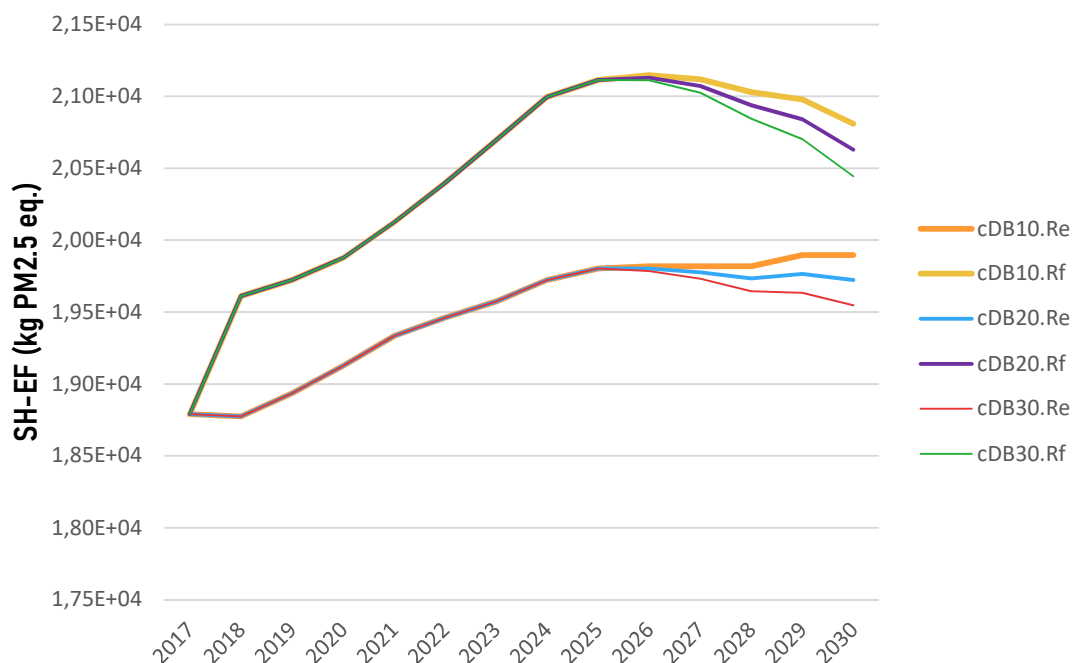
Ano	cDB10.Re	cDB10.Rf	cDB20.Re	cDB20.Rf	cDB30.Re	cDB30.Rf
2017	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09
2018	2,30E+09	2,40E+09	2,30E+09	2,40E+09	2,30E+09	2,40E+09
2019	2,30E+09	2,39E+09	2,30E+09	2,39E+09	2,30E+09	2,39E+09
2020	2,32E+09	2,41E+09	2,32E+09	2,41E+09	2,32E+09	2,41E+09
2021	2,35E+09	2,44E+09	2,35E+09	2,44E+09	2,35E+09	2,44E+09
2022	2,36E+09	2,48E+09	2,36E+09	2,48E+09	2,36E+09	2,48E+09
2023	2,38E+09	2,51E+09	2,38E+09	2,51E+09	2,38E+09	2,51E+09
2024	2,39E+09	2,55E+09	2,39E+09	2,55E+09	2,39E+09	2,55E+09
2025	2,40E+09	2,56E+09	2,40E+09	2,56E+09	2,40E+09	2,56E+09
2026	2,41E+09	2,57E+09	2,38E+09	2,54E+09	2,36E+09	2,52E+09
2027	2,41E+09	2,56E+09	2,35E+09	2,51E+09	2,30E+09	2,45E+09
2028	2,41E+09	2,55E+09	2,30E+09	2,44E+09	2,18E+09	2,32E+09
2029	2,42E+09	2,55E+09	2,25E+09	2,37E+09	2,08E+09	2,19E+09
2030	2,42E+09	2,53E+09	2,19E+09	2,30E+09	1,97E+09	2,06E+09

**Figura B.3.** Depleção potencial de recursos abióticos – elementos fósseis

**Tabela B.4. SH-EF (kg PM2.5 eq.)**

Saúde Humana - Efeitos respiratórios -ILCD 2016 midpoint (ecoinvent v.3.3 LCIA methods)

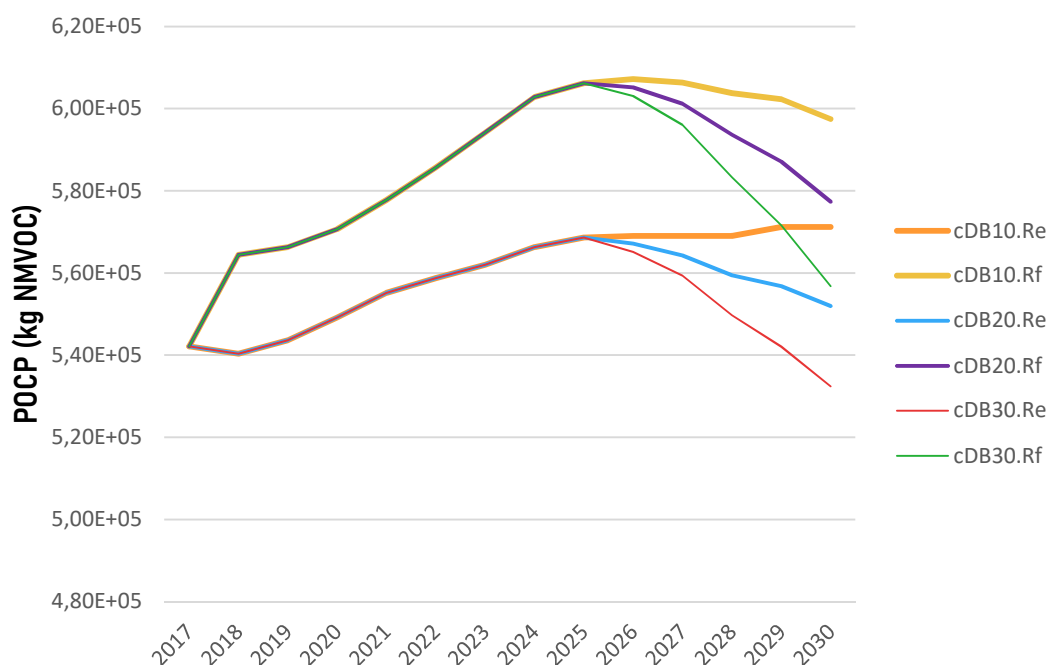
Ano	cDB10.Re	cDB10.Rf	cDB20.Re	cDB20.Rf	cDB30.Re	cDB30.Rf
2017	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04
2018	1,88E+04	1,96E+04	1,88E+04	1,96E+04	1,88E+04	1,96E+04
2019	1,89E+04	1,97E+04	1,89E+04	1,97E+04	1,89E+04	1,97E+04
2020	1,91E+04	1,99E+04	1,91E+04	1,99E+04	1,91E+04	1,99E+04
2021	1,93E+04	2,01E+04	1,93E+04	2,01E+04	1,93E+04	2,01E+04
2022	1,95E+04	2,04E+04	1,95E+04	2,04E+04	1,95E+04	2,04E+04
2023	1,96E+04	2,07E+04	1,96E+04	2,07E+04	1,96E+04	2,07E+04
2024	1,97E+04	2,10E+04	1,97E+04	2,10E+04	1,97E+04	2,10E+04
2025	1,98E+04	2,11E+04	1,98E+04	2,11E+04	1,98E+04	2,11E+04
2026	1,98E+04	2,11E+04	1,98E+04	2,11E+04	1,98E+04	2,11E+04
2027	1,98E+04	2,11E+04	1,98E+04	2,11E+04	1,97E+04	2,10E+04
2028	1,98E+04	2,10E+04	1,97E+04	2,09E+04	1,96E+04	2,08E+04
2029	1,99E+04	2,10E+04	1,98E+04	2,08E+04	1,96E+04	2,07E+04
2030	1,99E+04	2,08E+04	1,97E+04	2,06E+04	1,95E+04	2,04E+04

**Figura B.4.** Saúde Humana – Efeitos respiratórios

**Tabela B.5. POCP (kg NMVOC)**

Potencial de formação de ozônio fotoquímico –ReCiPe 2008 midpoint (H) (ecoinvent v.3.3 LCIA methods)

Ano	cDB10.Re	cDB10.Rf	cDB20.Re	cDB20.Rf	cDB30.Re	cDB30.Rf
2017	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05
2018	5,40E+05	5,64E+05	5,40E+05	5,64E+05	5,40E+05	5,64E+05
2019	5,44E+05	5,66E+05	5,44E+05	5,66E+05	5,44E+05	5,66E+05
2020	5,49E+05	5,71E+05	5,49E+05	5,71E+05	5,49E+05	5,71E+05
2021	5,55E+05	5,78E+05	5,55E+05	5,78E+05	5,55E+05	5,78E+05
2022	5,59E+05	5,86E+05	5,59E+05	5,86E+05	5,59E+05	5,86E+05
2023	5,62E+05	5,94E+05	5,62E+05	5,94E+05	5,62E+05	5,94E+05
2024	5,66E+05	6,03E+05	5,66E+05	6,03E+05	5,66E+05	6,03E+05
2025	5,69E+05	6,06E+05	5,69E+05	6,06E+05	5,69E+05	6,06E+05
2026	5,69E+05	6,07E+05	5,67E+05	6,05E+05	5,65E+05	6,03E+05
2027	5,69E+05	6,06E+05	5,64E+05	6,01E+05	5,59E+05	5,96E+05
2028	5,69E+05	6,04E+05	5,59E+05	5,94E+05	5,50E+05	5,83E+05
2029	5,71E+05	6,02E+05	5,57E+05	5,87E+05	5,42E+05	5,72E+05
2030	5,71E+05	5,97E+05	5,52E+05	5,77E+05	5,32E+05	5,57E+05

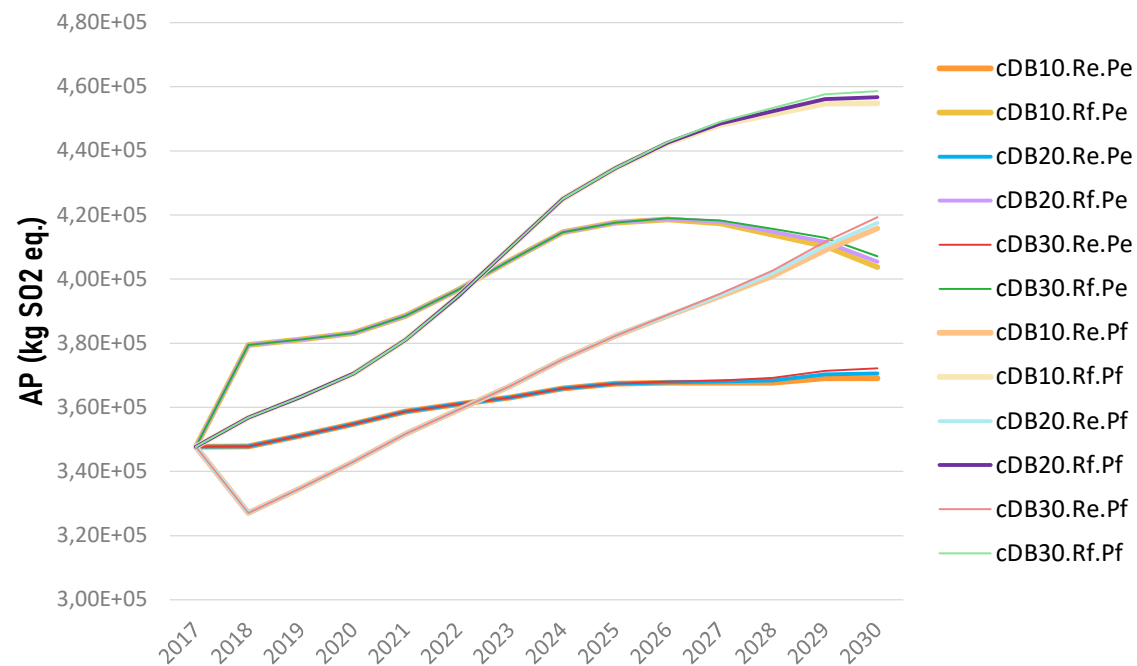
**Figura B.5. Potencial de formação de ozônio fotoquímico**

Resultados de avaliação de impactos totais anuais para os cenários de projeções normalizadas segundo o volume de passageiros citados na Tabela 6 no corpo do trabalho.

**Tabela B.6. AP (kg SO<sub>2</sub> eq.)**  
Potencial de acidificação terrestre - ReCiPe 2008 midpoint (H), com fatores locais ("Brazil") da versão ReCiPe 2016 (ecoinvent v.3.3 LCIA methods)

Ano	cDB10.Re.Pe	cDB10.Rf.Pe	cDB20.Re.Pe	cDB20.Rf.Pe	cDB30.Re.Pe	cDB30.Rf.Pe	cDB10.Re.Pf	cDB10.Rf.Pf	cDB20.Re.Pf	cDB20.Rf.Pf	cDB30.Re.Pf	cDB30.Rf.Pf
2017	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05	3,48E+05
2018	3,48E+05	3,80E+05	3,48E+05	3,80E+05	3,48E+05	3,80E+05	3,27E+05	3,57E+05	3,27E+05	3,57E+05	3,27E+05	3,57E+05
2019	3,51E+05	3,81E+05	3,51E+05	3,81E+05	3,51E+05	3,81E+05	3,35E+05	3,63E+05	3,35E+05	3,63E+05	3,35E+05	3,63E+05
2020	3,55E+05	3,83E+05	3,55E+05	3,83E+05	3,55E+05	3,83E+05	3,43E+05	3,70E+05	3,43E+05	3,70E+05	3,43E+05	3,70E+05
2021	3,59E+05	3,89E+05	3,59E+05	3,89E+05	3,59E+05	3,89E+05	3,52E+05	3,81E+05	3,52E+05	3,81E+05	3,52E+05	3,81E+05
2022	3,61E+05	3,97E+05	3,61E+05	3,97E+05	3,61E+05	3,97E+05	3,59E+05	3,95E+05	3,59E+05	3,95E+05	3,59E+05	3,95E+05
2023	3,63E+05	4,06E+05	3,63E+05	4,06E+05	3,63E+05	4,06E+05	3,67E+05	4,10E+05	3,67E+05	4,10E+05	3,67E+05	4,10E+05
2024	3,66E+05	4,15E+05	3,66E+05	4,15E+05	3,66E+05	4,15E+05	3,75E+05	4,25E+05	3,75E+05	4,25E+05	3,75E+05	4,25E+05
2025	3,67E+05	4,18E+05	3,67E+05	4,18E+05	3,67E+05	4,18E+05	3,82E+05	4,35E+05	3,82E+05	4,35E+05	3,82E+05	4,35E+05
2026	3,68E+05	4,19E+05	3,68E+05	4,19E+05	3,68E+05	4,19E+05	3,89E+05	4,42E+05	3,89E+05	4,43E+05	3,89E+05	4,43E+05
2027	3,68E+05	4,17E+05	3,68E+05	4,18E+05	3,68E+05	4,18E+05	3,95E+05	4,48E+05	3,95E+05	4,49E+05	3,95E+05	4,49E+05
2028	3,68E+05	4,14E+05	3,68E+05	4,15E+05	3,69E+05	4,16E+05	4,01E+05	4,51E+05	4,02E+05	4,52E+05	4,03E+05	4,53E+05
2029	3,69E+05	4,10E+05	3,70E+05	4,12E+05	3,71E+05	4,13E+05	4,09E+05	4,55E+05	4,10E+05	4,56E+05	4,12E+05	4,58E+05
2030	3,69E+05	4,04E+05	3,71E+05	4,05E+05	3,72E+05	4,07E+05	4,16E+05	4,55E+05	4,18E+05	4,57E+05	4,19E+05	4,59E+05

Figura B.6. Potencial de acidificação terrestre



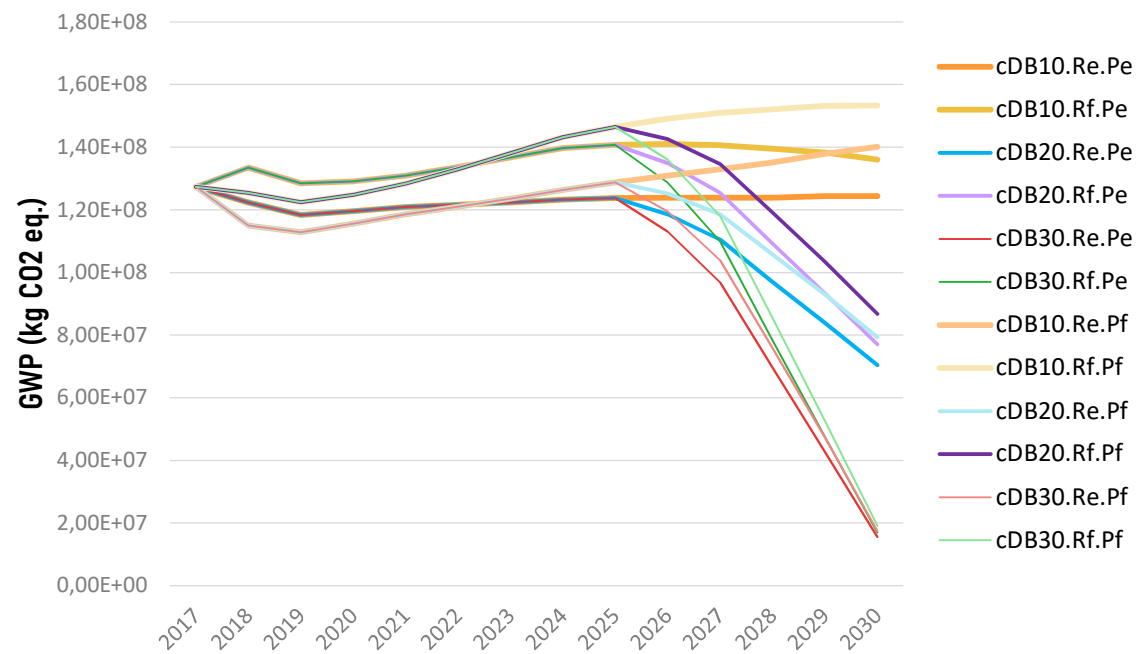


**Tabela B.7. GWP (kg CO2 eq.)**

Potencial de aquecimento global – horizonte de 100 anos - IPCC 2013 (ecoinvent v.3.3 LCIA methods)

Ano	cDB10.Re.Pe	cDB10.Rf. Pe	cDB20.Re.Pe	cDB20.Rf.Pe	cDB30.Re.Pe	cDB30.Rf.Pe	cDB10.Re.Pf	cDB10.Rf.Pf	cDB20.Re.Pf	cDB20.Rf.Pf	cDB30.Re.Pf	cDB30.Rf.Pf
2017	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08	1,27E+08
2018	1,22E+08	1,33E+08	1,22E+08	1,33E+08	1,22E+08	1,33E+08	1,15E+08	1,25E+08	1,15E+08	1,25E+08	1,15E+08	1,25E+08
2019	1,18E+08	1,28E+08	1,18E+08	1,28E+08	1,18E+08	1,28E+08	1,13E+08	1,22E+08	1,13E+08	1,22E+08	1,13E+08	1,22E+08
2020	1,20E+08	1,29E+08	1,20E+08	1,29E+08	1,20E+08	1,29E+08	1,16E+08	1,25E+08	1,16E+08	1,25E+08	1,16E+08	1,25E+08
2021	1,21E+08	1,31E+08	1,21E+08	1,31E+08	1,21E+08	1,31E+08	1,19E+08	1,28E+08	1,19E+08	1,28E+08	1,19E+08	1,28E+08
2022	1,22E+08	1,34E+08	1,22E+08	1,34E+08	1,22E+08	1,34E+08	1,21E+08	1,33E+08	1,21E+08	1,33E+08	1,21E+08	1,33E+08
2023	1,22E+08	1,37E+08	1,22E+08	1,37E+08	1,22E+08	1,37E+08	1,24E+08	1,38E+08	1,24E+08	1,38E+08	1,24E+08	1,38E+08
2024	1,23E+08	1,40E+08	1,23E+08	1,40E+08	1,23E+08	1,40E+08	1,26E+08	1,43E+08	1,26E+08	1,43E+08	1,26E+08	1,43E+08
2025	1,24E+08	1,41E+08	1,24E+08	1,41E+08	1,24E+08	1,41E+08	1,29E+08	1,46E+08	1,29E+08	1,46E+08	1,29E+08	1,46E+08
2026	1,24E+08	1,41E+08	1,19E+08	1,35E+08	1,13E+08	1,29E+08	1,31E+08	1,49E+08	1,25E+08	1,43E+08	1,19E+08	1,36E+08
2027	1,24E+08	1,41E+08	1,10E+08	1,25E+08	9,68E+07	1,10E+08	1,33E+08	1,51E+08	1,19E+08	1,35E+08	1,04E+08	1,18E+08
2028	1,24E+08	1,39E+08	9,70E+07	1,09E+08	6,97E+07	7,84E+07	1,35E+08	1,52E+08	1,06E+08	1,19E+08	7,60E+07	8,55E+07
2029	1,24E+08	1,38E+08	8,39E+07	9,33E+07	4,27E+07	4,75E+07	1,38E+08	1,53E+08	9,30E+07	1,03E+08	4,73E+07	5,26E+07
2030	1,24E+08	1,36E+08	7,04E+07	7,71E+07	1,55E+07	1,70E+07	1,40E+08	1,53E+08	7,94E+07	8,68E+07	1,75E+07	1,91E+07

Figura B.7. Potencial de aquecimento global – horizonte de 100 anos

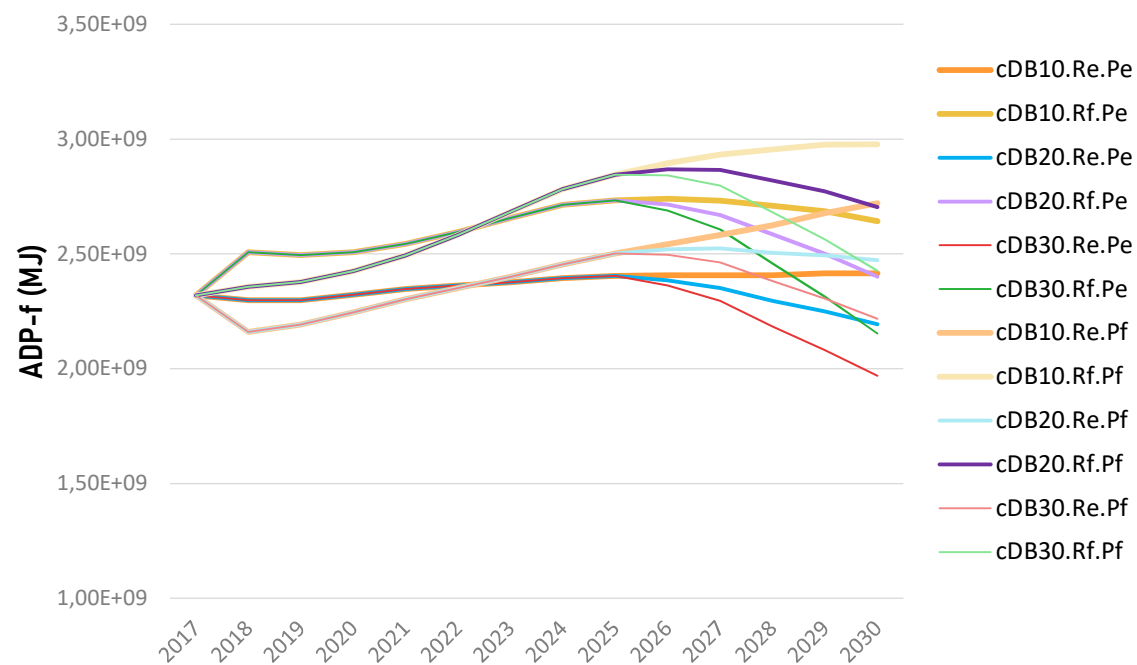


**Tabela B.8. ADP-f (MJ)**

Depleção potencial de recursos abióticos – elementos - CML 2001 (openLCA LCIA methods v.1.5.6)

Ano	cDB10.Re.Pe	cDB10.Rf.Pe	cDB20.Re.Pe	cDB20.Rf.Pe	cDB30.Re.Pe	cDB30.Rf.Pe	cDB10.Re.Pf	cDB10.Rf.Pf	cDB20.Re.Pf	cDB20.Rf.Pf	cDB30.Re.Pf	cDB30.Rf.Pf
2017	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09	2,32E+09
2018	2,30E+09	2,51E+09	2,30E+09	2,51E+09	2,30E+09	2,51E+09	2,16E+09	2,36E+09	2,16E+09	2,36E+09	2,16E+09	2,36E+09
2019	2,30E+09	2,49E+09	2,30E+09	2,49E+09	2,30E+09	2,49E+09	2,19E+09	2,38E+09	2,19E+09	2,38E+09	2,19E+09	2,38E+09
2020	2,32E+09	2,51E+09	2,32E+09	2,51E+09	2,32E+09	2,51E+09	2,25E+09	2,42E+09	2,25E+09	2,42E+09	2,25E+09	2,42E+09
2021	2,35E+09	2,54E+09	2,35E+09	2,54E+09	2,35E+09	2,54E+09	2,30E+09	2,49E+09	2,30E+09	2,49E+09	2,30E+09	2,49E+09
2022	2,36E+09	2,60E+09	2,36E+09	2,60E+09	2,36E+09	2,60E+09	2,35E+09	2,58E+09	2,35E+09	2,58E+09	2,35E+09	2,58E+09
2023	2,38E+09	2,66E+09	2,38E+09	2,66E+09	2,38E+09	2,66E+09	2,40E+09	2,68E+09	2,40E+09	2,68E+09	2,40E+09	2,68E+09
2024	2,39E+09	2,71E+09	2,39E+09	2,71E+09	2,39E+09	2,71E+09	2,45E+09	2,78E+09	2,45E+09	2,78E+09	2,45E+09	2,78E+09
2025	2,40E+09	2,73E+09	2,40E+09	2,73E+09	2,40E+09	2,73E+09	2,50E+09	2,84E+09	2,50E+09	2,84E+09	2,50E+09	2,84E+09
2026	2,41E+09	2,74E+09	2,38E+09	2,71E+09	2,36E+09	2,69E+09	2,54E+09	2,90E+09	2,52E+09	2,87E+09	2,50E+09	2,84E+09
2027	2,41E+09	2,73E+09	2,35E+09	2,67E+09	2,30E+09	2,61E+09	2,58E+09	2,93E+09	2,52E+09	2,87E+09	2,46E+09	2,80E+09
2028	2,41E+09	2,71E+09	2,30E+09	2,59E+09	2,18E+09	2,46E+09	2,62E+09	2,95E+09	2,50E+09	2,82E+09	2,38E+09	2,68E+09
2029	2,42E+09	2,69E+09	2,25E+09	2,50E+09	2,08E+09	2,31E+09	2,68E+09	2,98E+09	2,49E+09	2,77E+09	2,31E+09	2,56E+09
2030	2,42E+09	2,64E+09	2,19E+09	2,40E+09	1,97E+09	2,15E+09	2,72E+09	2,98E+09	2,47E+09	2,70E+09	2,22E+09	2,43E+09

**Figura B.8.** Depleção potencial de recursos abióticos – elementos fósseis

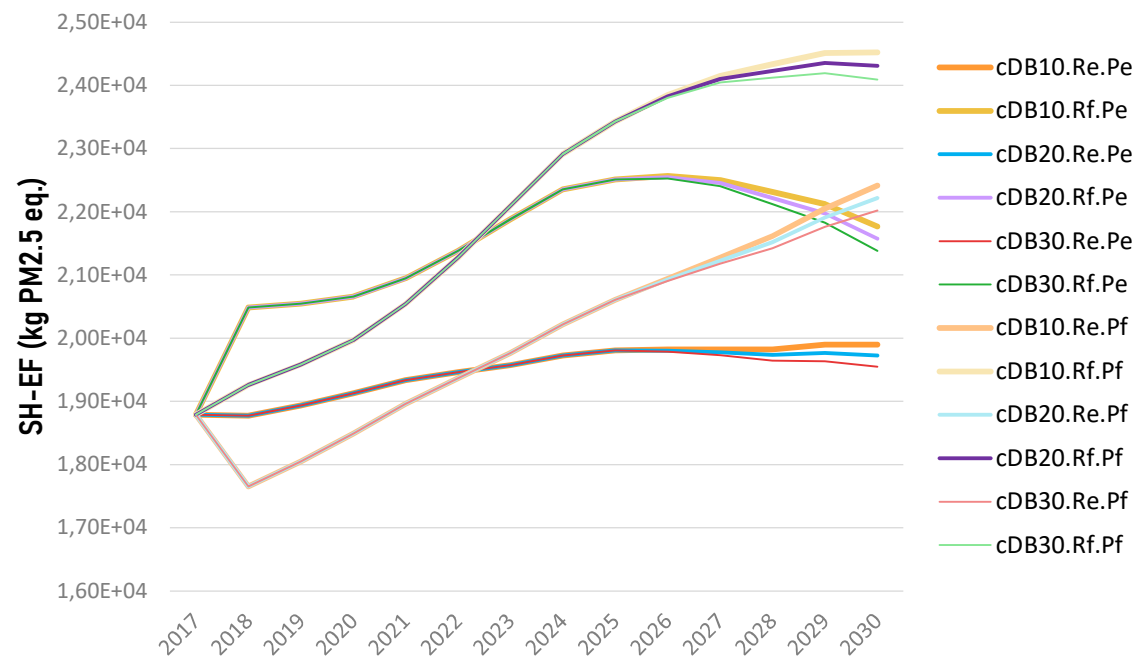


**Tabela B.9. SH-EF (kg PM2.5 eq.)**

Saúde Humana - Efeitos respiratórios -ILCD 2016 midpoint (ecoinvent v.3.3 LCIA methods)

Ano	cDB10.Re.Pe	cDB10.Rf.Pe	cDB20.Re.Pe	cDB20.Rf.Pe	cDB30.Re.Pe	cDB30.Rf.Pe	cDB10.Re.Pf	cDB10.Rf.Pf	cDB20.Re.Pf	cDB20.Rf.Pf	cDB30.Re.Pf	cDB30.Rf.Pf
2017	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04	1,88E+04
2018	1,88E+04	2,05E+04	1,88E+04	2,05E+04	1,88E+04	2,05E+04	1,77E+04	1,93E+04	1,77E+04	1,93E+04	1,77E+04	1,93E+04
2019	1,89E+04	2,05E+04	1,89E+04	2,05E+04	1,89E+04	2,05E+04	1,81E+04	1,96E+04	1,81E+04	1,96E+04	1,81E+04	1,96E+04
2020	1,91E+04	2,07E+04	1,91E+04	2,07E+04	1,91E+04	2,07E+04	1,85E+04	2,00E+04	1,85E+04	2,00E+04	1,85E+04	2,00E+04
2021	1,93E+04	2,09E+04	1,93E+04	2,09E+04	1,93E+04	2,09E+04	1,90E+04	2,05E+04	1,90E+04	2,05E+04	1,90E+04	2,05E+04
2022	1,95E+04	2,14E+04	1,95E+04	2,14E+04	1,95E+04	2,14E+04	1,94E+04	2,13E+04	1,94E+04	2,13E+04	1,94E+04	2,13E+04
2023	1,96E+04	2,19E+04	1,96E+04	2,19E+04	1,96E+04	2,19E+04	1,98E+04	2,21E+04	1,98E+04	2,21E+04	1,98E+04	2,21E+04
2024	1,97E+04	2,24E+04	1,97E+04	2,24E+04	1,97E+04	2,24E+04	2,02E+04	2,29E+04	2,02E+04	2,29E+04	2,02E+04	2,29E+04
2025	1,98E+04	2,25E+04	1,98E+04	2,25E+04	1,98E+04	2,25E+04	2,06E+04	2,34E+04	2,06E+04	2,34E+04	2,06E+04	2,34E+04
2026	1,98E+04	2,26E+04	1,98E+04	2,25E+04	1,98E+04	2,25E+04	2,09E+04	2,38E+04	2,09E+04	2,38E+04	2,09E+04	2,38E+04
2027	1,98E+04	2,25E+04	1,98E+04	2,25E+04	1,97E+04	2,24E+04	2,13E+04	2,42E+04	2,12E+04	2,41E+04	2,12E+04	2,40E+04
2028	1,98E+04	2,23E+04	1,97E+04	2,22E+04	1,96E+04	2,21E+04	2,16E+04	2,43E+04	2,15E+04	2,42E+04	2,14E+04	2,41E+04
2029	1,99E+04	2,21E+04	1,98E+04	2,20E+04	1,96E+04	2,18E+04	2,20E+04	2,45E+04	2,19E+04	2,44E+04	2,18E+04	2,42E+04
2030	1,99E+04	2,18E+04	1,97E+04	2,16E+04	1,95E+04	2,14E+04	2,24E+04	2,45E+04	2,22E+04	2,43E+04	2,20E+04	2,41E+04

**Figura B.9.** Saúde Humana – Efeitos Respiratórios

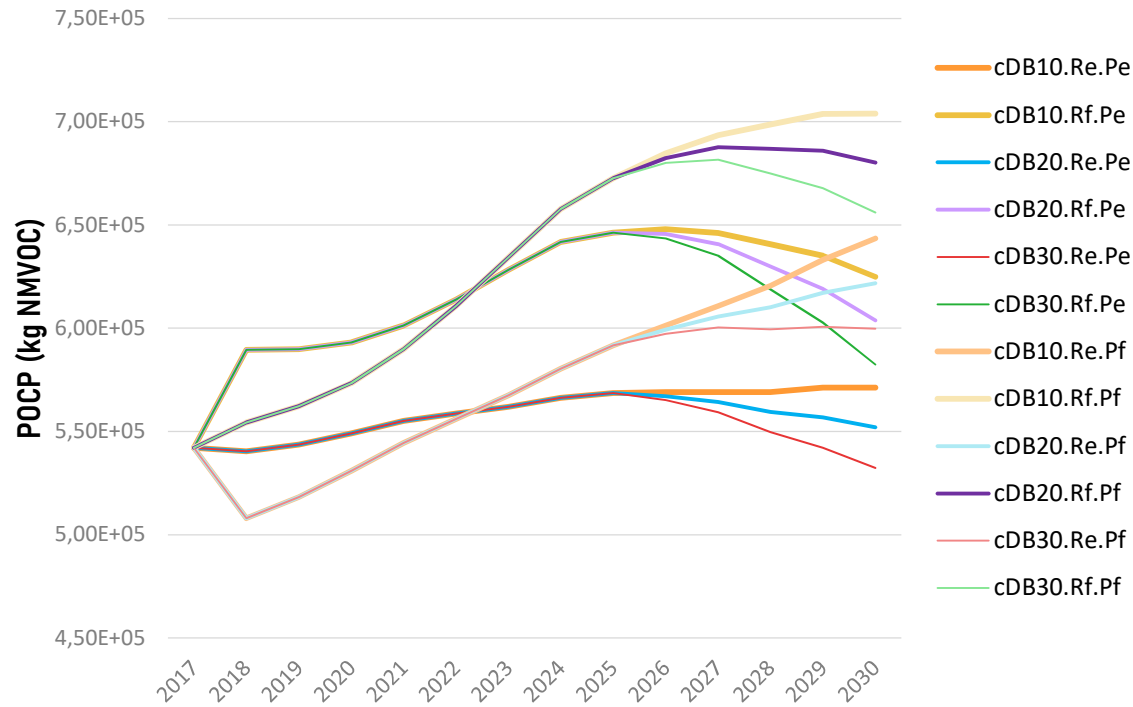


**Tabela B.10. POCP (kg NMVOC)**

Potencial de formação de ozônio fotoquímico –ReCiPe 2008 midpoint (H) (ecoinvent v.3.3 LCIA methods)

Ano	cDB10.Re.Pe	cDB10.Rf.Pe	cDB20.Re.Pe	cDB20.Rf.Pe	cDB30.Re.Pe	cDB30.Rf.Pe	cDB10.Re.Pf	cDB10.Rf.Pf	cDB20.Re.Pf	cDB20.Rf.Pf	cDB30.Re.Pf	cDB30.Rf.Pf
2017	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05	5,42E+05
2018	5,40E+05	5,90E+05	5,40E+05	5,90E+05	5,40E+05	5,90E+05	5,08E+05	5,54E+05	5,08E+05	5,54E+05	5,08E+05	5,54E+05
2019	5,44E+05	5,90E+05	5,44E+05	5,90E+05	5,44E+05	5,90E+05	5,18E+05	5,62E+05	5,18E+05	5,62E+05	5,18E+05	5,62E+05
2020	5,49E+05	5,93E+05	5,49E+05	5,93E+05	5,49E+05	5,93E+05	5,31E+05	5,73E+05	5,31E+05	5,73E+05	5,31E+05	5,73E+05
2021	5,55E+05	6,01E+05	5,55E+05	6,01E+05	5,55E+05	6,01E+05	5,44E+05	5,90E+05	5,44E+05	5,90E+05	5,44E+05	5,90E+05
2022	5,59E+05	6,14E+05	5,59E+05	6,14E+05	5,59E+05	6,14E+05	5,56E+05	6,11E+05	5,56E+05	6,11E+05	5,56E+05	6,11E+05
2023	5,62E+05	6,28E+05	5,62E+05	6,28E+05	5,62E+05	6,28E+05	5,68E+05	6,34E+05	5,68E+05	6,34E+05	5,68E+05	6,34E+05
2024	5,66E+05	6,42E+05	5,66E+05	6,42E+05	5,66E+05	6,42E+05	5,80E+05	6,58E+05	5,80E+05	6,58E+05	5,80E+05	6,58E+05
2025	5,69E+05	6,46E+05	5,69E+05	6,46E+05	5,69E+05	6,46E+05	5,92E+05	6,73E+05	5,92E+05	6,73E+05	5,92E+05	6,73E+05
2026	5,69E+05	6,48E+05	5,67E+05	6,46E+05	5,65E+05	6,44E+05	6,01E+05	6,85E+05	5,99E+05	6,82E+05	5,97E+05	6,80E+05
2027	5,69E+05	6,46E+05	5,64E+05	6,41E+05	5,59E+05	6,35E+05	6,11E+05	6,93E+05	6,06E+05	6,88E+05	6,00E+05	6,82E+05
2028	5,69E+05	6,41E+05	5,59E+05	6,30E+05	5,50E+05	6,19E+05	6,21E+05	6,99E+05	6,10E+05	6,87E+05	5,99E+05	6,75E+05
2029	5,71E+05	6,35E+05	5,57E+05	6,19E+05	5,42E+05	6,03E+05	6,33E+05	7,04E+05	6,17E+05	6,86E+05	6,01E+05	6,68E+05
2030	5,71E+05	6,25E+05	5,52E+05	6,04E+05	5,32E+05	5,82E+05	6,44E+05	7,04E+05	6,22E+05	6,80E+05	6,00E+05	6,56E+05

Figura B.10. Potencial de formação de ozônio fotoquímico





## **ANEXO A – Consumo e Média de eficiência de veículos em 2017-2018**

Tabela resumo com dados fornecidos pela EPTC com valores totais de consumo de combustível segundo o tipo de veículos para os anos de 2017, bem como rodagem e a eficiência média calculada de acordo com as características dos veículos da frota (no ano de 2017)

<b>Categoria de consumo</b>	<b>Quantidade (unidade)</b>	<b>Consumo (litros)</b>	<b>Rodagem (km)</b>	<b>Coefficiente de rendimento médio (l/km)</b>
Micro Dianteiro	1	5.853	21.773	0,27
Leve Traseiro	39	679.909	1.884.237	0,36
Pesado Dianteiro	682	18.591.784	46.855.459	0,40
Pesado Dianteiro Ar	145	4.617.801	10.336.346	0,45
Pesado Traseiro	185	5.942.218	13.021.425	0,46
Pesado Traseiro Ar Cx	223	8.287.337	15.192.794	0,55
Pesado Traseiro Ar	127	4.397.215	8.977.469	0,49
Pesado Traseiro Cx	136	4.621.917	8.785.596	0,53
Trucado Dianteiro	14	281.213	653.522	0,43
Especial Dianteiro	12	299.796	579.073	0,52
Especial Central Ar Cx	30	1.318.537	1.768.094	0,75
Especial Central Cx	14	601.065	853.381	0,70
Especial Traseiro Ar Cx	44	1.840.242	2.562.908	0,72
Especial Traseiro Cx	60	2.526.227	4.003.569	0,63
<b>Total</b>	<b>1.712</b>	<b>54.011.115</b>	<b>115.495.646</b>	<b>0,47</b>

## **ANEXO B - Inventários de Viana (2008) para diesel e biodiesel**

Para a análise dos resultados foram utilizados dados adaptados a partir dos dados criado por Viana (2008), segundo a disponibilidade de dados da base de dados Ecoinvent 3.3. Os inventários são apresentados a seguir.

<b>DIESEL</b>							
<i>Original data: Viana, 2008</i>							
<i>Content: The original data account processes related to petroleum extraction in national soils and waters, extraction of imported petroleum and its maritime transport, production of electricity and petroleum oil refining. The presented inventory considers the calorific power allocation for the products of petroleum oil refining. The allocation to the production of diesel is of 39.06% total consumption and emissions.</i>							
<b>Flow</b>	<b>Category</b>	<b>Adapted Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Provider</b>	<b>Comments</b>	<b>Original Data quality entry</b>	<b>Justification</b>
<b>Inputs</b>							
energy, unspecified	elementary	1,95E-01	GJ				
coal, hard, unspecified, in ground	process	1,57E+00	kg				
liquified petroluem gas	elementary	4,46E+01	kg	market for liquefied petroleum gas, S - RoW			
petroleum	process	1,17E+03	kg	market for petroleum, S - GLO			
water, ground	elementary	1,40E+04	kg				
uranium ore, as U	process	3,31E-05	kg	market for uranium ore, as U, S - GLO			
renewable fuels	elementary	3,39E-01	kg				
<b>Outputs</b>							
- From Technosphere							
diesel	process	1000	kg				
- To Enviroment							
methane	elementary	2,75E+00	kg				
carbon monoxide	elementary	5,91E-01	kg				
carbon dioxide	elementary	2,51E+02	kg				
water vapour	elementary	2,67E-01	kg				

Hydrocarbons, unspecified	elementary	1,25E-01	kg				
metals, unspecified	elementary	1,88E-06	kg				
ammonia	elementary	7,07E-10	kg				
NM VOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	elementary	1,00E+00	kg				
nitrogen oxides	elementary	1,39E+00	kg				
nitrous oxide	process	1,30E-03	kg				
particulates, unspecified	elementary	1,46E-01	kg				
sulfur dioxide	elementary	1,12E+00	kg				
hydrogen sulfides	elementary	2,19E-04	kg				
radioactive species, unspecified	elementary	1,15E+00	kBq				
Acidity, unspecified	elementary	2,00E-08	kg				
BOD5, Biological Oxygen Demand	elementary	3,50E-02	kg				
COD, Chemical Oxygen Demand	elementary	2,16E-01	kg				
Chlorides, unspecified	elementary	2,55E-02	kg				
Heavy metals, unspecified	elementary	4,86E-06	kg				
Hydrocarbons, unspecified	elementary	2,07E-03	kg				
Metals, unspecified	elementary	1,18E-06	kg				
Nitrogen compounds	elementary	2,41E-06	kg				
Saponifiable oils and fats	elementary	1,65E-05	kg				
Dissolved solids	elementary	5,89E-06	kg				
Suspended solids, unspecified	elementary	1,11E-01	kg				
Water discharges from petroleum/natural gas extraction, onshore	process	3,27E-03	kg				
Oils, unspecified	elementary	1,62E-02	kg				
metallic ions, unspecified	elementary	9,39E-06	kg				
sodium, ion	elementary	1,71E-02	kg				
Radioactive species, unspecified	elementary	1,78E+00	kBq				
Oils, unspecified	elementary	3,07E-01	kg				

heat, waste	elementary	9,72E-04	GJ				
-------------	------------	----------	----	--	--	--	--

### BIODIESEL FROM SUNFLOWER OIL

*Original data:* Viana, 2008

*Content:* The original data account processes related to sunflower seed production, sunflower oil production, sugar-cane production, anhydrous ethyl alcohol production, caustic soda production and biodiesel. The presented inventory considers mass allocation for sunflower oil and dumpling resulted from the oil extraction, where 26.4% is allocated for the sunflower oil. The mass allocation was also applied to separate total consumption and emissions as 90.7% to the sunflower biodiesel versus 8.3% for glycerin.

<b>Flow</b>	<b>Category</b>	<b>Adapted Amount</b>	<b>Unit</b>	<b>Provider</b>	<b>Comments</b>	<b>Original Data quality entry</b>	<b>Justification</b>
<b>Inputs</b>							
heat, district or industrial, natural gas	process	3,93E-01	GJ	market for heat, district or industrial, natural gas, S - RoW			
cooling energy	process	2,75E-01	GJ	market for cooling energy, S - GLO			
energy, from coal	elementary	6,57E-02	GJ				
energy, unspecified	elementary	2,36E+00	GJ				
nuclear	elementary	7,91E-04	GJ				
coal, hard, unspecified, in ground	elementary	1,92E-01	kg				
heat, district or industrial, natural gas	process	3,14E+01	kg	market for liquefied petroleum gas, S - RoW			
petroleum coke	process	1,53E+02	kg	market for petroleum coke, S - GLO			
air	elementary	1,63E+01	kg				
water, unspecified natural origin	elementary	2,16E+02	m <sup>3</sup>				
uranium ore, as U	process	2,69E-04	kg	market for uranium ore, as U, S - GLO			
renewable fuels	elementary	4,09E-02	kg				

phosphate ore, in ground	elementary	1,02E+03	kg				
Sylvite, 25% in sylvinitite, in ground	elementary	7,63E+01	kg				
sulfur, in ground	elementary	2,97E+01	kg				
limestone, in ground	elementary	1,28E+03	kg				
sunflower seed	process	2,99E+00	kg	market for sunflower seed, S - GLO			
Cyclohexane	process	2,10E-01	kg	market for cyclohexane, S - GLO			
water, process, salt, ocean	elementary	3,02E+00	kg				
steam, in chemical industry	process	5,12E+02	kg	market for steam, in chemical industry, S - GLO			
<b>Outputs</b>							
- From Technosphere							
biodiesel from sunflower oil	process	1000	kg				
- To Enviroment							
methane	elementary	7,42E-01	kg				
carbon monoxide	elementary	9,17E+00	kg				
carbon dioxide	elementary	-8,05E+03	kg				
water vapour	elementary	1,21E+02	kg				
Hydrocarbons, unspecified	elementary	1,85E+01	kg				
metals, unspecified	elementary	2,47E-07	kg				
ammonia	elementary	2,24E+00	kg				
NMVOC, non-methane volatile organic compounds, unspecified origin	elementary	2,68E-01	kg				
nitrogen oxides	elementary	5,58E+00	kg				
nitrous oxide	process	9,02E-01	kg				
particulates, unspecified	elementary	1,96E+01	kg				
sulfur dioxide	elementary	8,49E-01	kg				
hydrogen sulfide	elementary	4,22E-05	kg				
hydrogen fluoride	elementary	2,41E-03	kg				

alachlor	elementary	2,08E-01	kg				
Trifluralin	elementary	2,14E-01	kg				
Trichlorfon	elementary	1,15E-01	kg				
Herbicied, unspecified	elementary	1,02E-02	kg				
Chlorpyrifos	elementary	1,44E-04	kg				
Chlorine	elementary	4,30E-05	kg				
Hydrogen	elementary	1,63E-04	kg				
dichloromethane	process	6,03E-05	kg				
radioactive species, unspecified	elementary	1,45E+01	kBq				
Acidity, unspecified	elementary	2,53E-07	kg				
BOD5, Biological Oxygen Demand	elementary	1,49E-01	kg				
COD, Chemical Oxygen Demand	elementary	4,06E+00	kg				
Chlorides, unspecified	elementary	5,09E+00	kg				
Heavy metals, unspecified	elementary	8,52E-07	kg				
Hydrocarbons, unspecified	elementary	2,95E-04	kg				
Metals, unspecified	elementary	1,49E-05	kg				
Nitrogen compounds	elementary	2,49E+00	kg				
Saponifiable oils and fats	elementary	2,08E-04	kg				
Dissolved solids	elementary	1,70E+03	kg				
Suspended solids, unspecified	elementary	1,36E-02	kg				
Water discharges from petroleum/natural gas extraction, onshore	process	3,95E-04	kg				
Oils, unspecified	elementary	1,96E-03	kg				
metallic ions, unspecified	elementary	1,16E-06	kg				
sodium, ion	elementary	2,97E+00	kg				
potassium, ion	elementary	6,50E-02	kg				
Calcium, ion	elementary	8,44E-02	kg				
Magnesium, ion	elementary	4,89E-01	kg				
organic substances,	elementary	4,78E-06	kg				



unspecified							
Phosphate	elementary	4,38E-01	kg				
wastewater from vegetable oil refinery	process	2,73E-04	m <sup>3</sup>				
alachlor	elementary	5,60E-01	kg				
Trifluralin	elementary	5,76E-01	kg				
Trichlorfon	elementary	3,10E-01	kg				
Herbicide, unspecified	elementary	2,77E-02	kg				
Chlorpyrifos	elementary	3,89E-04	kg				
Mercury	elementary	4,89E-07	kg				
Radioactive species, unspecified	elementary	2,24E+01	kBq				
Other minerals, extracted for use	elementary (resource)	1,85E+02	kg				
Oils, unspecified	elementary (to soil)	3,79E-02	kg				
spent catalytic converter NOx reduction	process	2,01E+00	kg				
magnetite	process	1,67E+02	kg				
Sulfur	elementary	3,03E-07	kg				
hazardous waste, for underground deposit	process	8,19E-01	kg				
alachlor	elementary	1,16E+00	kg				
Trifluralin	elementary	1,20E+00	kg				
Trichlorfon	elementary	6,43E-01	kg				
Herbicide, unspecified	elementary	5,75E-02	kg				
Chlorpyrifos	elementary	8,08E-04	kg				
ash, from combustion of bagasse from sugarcane	process	6,26E-03	kg				
Glycerine	process	9,26E+00	kg				
heat, waste	elementary	1,17E-04	GJ				
Water vapour	elementary	4,41E-02	GJ				