

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA E INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
ENGENHARIA AMBIENTAL

REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO TRANSPORTE COLETIVO POR
ÔNIBUS A PARTIR DE CONTRATOS DE CONCESSÃO

Lourenço Marques Valentini

PORTO ALEGRE
FEVEREIRO DE 2024

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
ESCOLA DE ENGENHARIA E INSTITUTO DE PESQUISAS HIDRÁULICAS
ENGENHARIA AMBIENTAL

**REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO TRANSPORTE COLETIVO POR
ÔNIBUS A PARTIR DE CONTRATOS DE CONCESSÃO**

Lourenço Marques Valentini

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao programa de graduação em
Engenharia Ambiental da Universidade
Federal do Rio Grande do Sul, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Ambiental.
Orientadora: Prof. Dra. Rita Cássia Alves

PORTO ALEGRE
FEVEREIRO DE 2024

CIP - Catalogação na Publicação

Valentini, Lourenço Marques
REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO TRANSPORTE
COLETIVO POR ÔNIBUS A PARTIR DE CONTRATOS DE CONCESSÃO
/ Lourenço Marques Valentini. -- 2024.
76 f.
Orientador: Rita Cássia Alves.

Trabalho de conclusão de curso (Graduação) --
Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto
de Pesquisas Hidráulicas, Curso de Engenharia
Ambiental, Porto Alegre, BR-RS, 2024.

1. Mobilidade Urbana. 2. Transporte Coletivo. 3.
Gases de Efeito Estufa. 4. Mudanças Climáticas. 5.
Contratos de Concessão. I. Alves, Rita Cássia, orient.
II. Título.

**REDUÇÃO DE GASES DE EFEITO ESTUFA NO TRANSPORTE COLETIVO POR
ÔNIBUS A PARTIR DE CONTRATOS DE CONCESSÃO**

Lourenço Marques Valentini

Projeto Ambiental de Conclusão em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, defendido em 21/02/2024 pela Comissão avaliadora constituída por:

Banca examinadora:

.....
Ms. Bianca Dutra - PPGSR-CEPSRM-UFRGS

.....
Prof. Dr. Fernando Mainardi Fan - DOH-IPH-UFRGS

.....
Prof. Dra. Rita Cássia Alves - PPGSR-CEPSRM-UFRGS

Conceito: A

Agradecimentos

Agradeço à UFRGS, pela oportunidade de fazer um curso superior, conhecer pessoas incríveis vindas de muitos lugares e abrir minha cabeça de uma forma que não sabia ser possível.

Agradeço à minha mãe, Luciana, pelo apoio incansável ao longo da graduação e na elaboração deste trabalho. A ela devo o apreço pela vida e pelo conhecimento.

Agradeço ao meu pai, Guto, pelo estímulo constante ao estudo, suporte ao longo dos anos e por despertar em mim o gosto pela matemática, pela lógica e pela engenharia.

Agradeço à minha companheira, Ana Clara, pelas conversas cotidianas, pelo ambiente de apoio mútuo, pelas contribuições certeiras e pelos momentos de descanso, risadas e música.

Agradeço ao professor Júlio Celso Vargas e ao CNPq, por me permitirem logo no início da graduação ter uma oportunidade de pesquisa na área de mobilidade urbana, e por todos os valiosos aprendizados. Agradeço a Bibiana, Amanda, Luísa, Desirée, Sabrina, Guilherme e demais membros do HUM-MUS pelas trocas e experiências.

Agradeço a Alessandra Both e Bruno Souza pela oportunidade de trabalhar em um escritório de engenharia visando à mobilidade sustentável, e pelos conhecimentos adquiridos na CMS (EPTC) que foram parte importante da minha formação. Também agradeço aos colegas de estágio, Rodrigo, Karolina, Júlia, Júlia, Helena, Alisson, Nathália, Osmar, Luísa e Gabriel pelo companheirismo e dedicação em nossos projetos.

Ao WRI Brasil, pelo sonho vivo das cidades sustentáveis e pelo ambiente de trabalho acolhedor e focado em impacto. Agradeço aos colegas Henrique, Guillermo, Virgínia, Mariana, Cynthia, Francisco, Natália, Ana, Santiago, Eduardo, Pollyana, Heloant, Cristina, Paula e demais membros do WRI por todos os conhecimentos trocados e momentos compartilhados.

Aos amigos da Engenharia (Fernando, Pedro, Isabela, Alessandra, Clara, Hosama, Victor, Gabriel, Daniel, Gabriela, Júlia e Luyhana), pelos sonhos compartilhados, cooperação, leveza e construção conjunta da nossa visão de mundo. Obrigado também aos colegas formandos (Daniel, Daphne, Fernando, Gabriel, Isabela, Jefferson, Lucas, Luiza e Vitória) pelos motivos acima, e pelos momentos compartilhados nessa época tão especial.

Aos amigos do Conjunto de Folclore Internacional Os Gaúchos (que são minha segunda família), dos Pára-raios, dos Paralelos e da Killepsia por cultivarmos juntos a arte, e por tantos momentos, trocas e o descanso necessário das atividades acadêmicas e de estágio.

Aos amigos mais antigos, pelo afeto, e por mesmo estando mais distantes, seguirem importantes na minha trajetória (Pedro, Bernardo, Lorenzo, Víctor, Rafael, Gustavo, Vicente). Agradeço ao amigo Rafael Ferreira, por tantas boas e filosóficas conversas, e em especial por ter me incentivado a cursar Engenharia Ambiental.

*“...a minhoca de metal que corta as ruas
como um concorde apressado, cheio de força
voa, voa mais pesado que o ar
e o avião, o avião, o avião do trabalhador”*

(O Rappa - Rodo Cotidiano)

RESUMO

A urgência da crise ambiental no mundo e no Brasil se tornou um tema que responsabiliza a todos, coletiva e individualmente, a agir de forma a minimizar seus impactos e riscos para o Sistema Terra. Nas áreas profissional e acadêmica, a responsabilidade é a de aprofundar a análise e subsidiar políticas públicas para que medidas imediatas possam ser adotadas, bem como entender os intrincados mecanismos do impacto humano sobre o ambiente e seus nefastos resultados. O presente estudo se situa no campo das mudanças climáticas, trabalhando com o sistema antrópico da locomoção das pessoas nas cidades. O objetivo principal foi fazer uma revisão teórica e analisar qual a redução possível de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) proveniente da adoção de critérios ambientais em contratos de concessão do transporte público coletivo (TC) por ônibus no Brasil. A partir de ampla revisão de literatura em português e inglês, apresentam-se dados sobre as emissões de GEE no mundo e no Brasil, em particular as contribuições do setor de transporte coletivo por ônibus. São abordados também aspectos jurídicos, técnicos, econômicos e legais do instrumento nomeado Contrato de Concessão, bem como boas práticas em sua elaboração e tipos de cláusulas que podem ser incluídas, como as sociais, econômicas e da qualidade. A metodologia escolhida para este trabalho foi o uso de Análise de Sensibilidade a fim de determinar qual o potencial de redução de emissões das diversas metas ambientais na licitação do TC por ônibus no Brasil. Foram elencados 12 fatores, considerados os principais, que poderiam ser incluídos em contratos na forma de metas, critérios ou cláusulas, de forma a reduzir a pegada carbônica dos sistemas de TC. Por fim, são analisados 6 dos 12 fatores a partir de um estudo de caso em três capitais brasileiras. O estudo aponta a importância de inserir o tema na discussão pública e o impacto promissor dessas medidas na redução da emissão de GEE.

Palavras-chave: Mobilidade Urbana. Transporte Coletivo. Gases de efeito estufa.

ABSTRACT

The urgency of the environmental crisis in the world and in Brazil has become a topic that holds everyone, collectively and individually, accountable to act to minimize its impacts and risks to the Earth System. In the professional and academic spheres, there's a responsibility to deepen the analysis and provide support for public policies so that immediate measures can be adopted, as well as to understand the intricate mechanisms of human impact on the environment and its harmful outcomes. This study is situated in the field of climate change, focusing on the anthropic system of people's mobility in cities. The main objective was to conduct a theoretical review and analyze the potential reduction of Greenhouse Gas (GHG) emissions resulting from the adoption of environmental criteria in contracts for public procurement in bus services in Brazil. Through an extensive review of literature in Portuguese and English, data on GHG emissions worldwide and in Brazil are presented, particularly focusing on the contributions of the public bus transportation sector. Legal, technical, economic, and contractual aspects of the instrument named Concession Contract are also addressed, as well as best practices in its formulation and types of clauses that can be included, such as social, economic, and quality-related. The methodology chosen for this work was the use of Sensitivity Analysis to determine the potential reduction of emissions from various environmental targets in the public bus transportation concession bidding process in Brazil. From the literature review, 12 factors, considered as key, were identified as possible inclusions to contracts in the form of goals, criteria, or clauses to reduce the carbon footprint of public bus transportation systems. Finally, 6 of the 12 factors are analyzed through a case study in three Brazilian capitals. The study highlights the importance of integrating the topic into public discussion and the promising impact of these measures on reducing GHG emissions.

Keywords: Urban Mobility. Public Transport. Greenhouse Gases.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Os 9 Limites Planetários em suas condições atuais.....	21
Figura 2 - Três cidades brasileiras utilizadas como estudo de caso.....	45
Figura 3 - Cenário atual.....	61
Figura 4 - Cenário 1.....	61
Figura 5 - Cenário 2.....	62
Figura 6 - Cenário 3.....	62
Figura 7 - Cenário 4.....	63
Figura 8 - Cenário 5.....	63
Figura 9 - Cenário 6.....	64
Figura 10 - Cenário 7.....	64
Figura 11 - Redução de GEE média de cada cenário comparado com o cenário atual.....	65

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Global Warming Potencial de gases selecionados.....	54
Tabela 2 - Limites de GEE por fase do PROCONVE.....	54
Tabela 3 - Resumo das metas.....	56
Tabela 4 - Cenários de adoção de metas.....	57
Tabela 5 - Metas por cenário.....	58
Tabela 6 - Frota por tipo de motor nas cidades analisadas.....	58
Tabela 7 - Capacidade calorífica e densidade de D100 e B100.....	59
Tabela 8 - Emissões por tipo de motor.....	59

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ASC	Ammonia Slip Catalyst
BC	Black Carbon
BEB	Battery Electric Bus
BSFC	Brake-specific fuel consumption
BTE	Brake Thermal Efficiency
CH ₄	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO ₂	Dióxido de carbono (ou gás carbônico)
CO ₂ eq	Gás carbônico equivalente
CPP	Circular Public Procurement
CPS	Compras Públicas Sustentáveis
CPV	Compras Públicas Verdes
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
DPF	Diesel Particulate Filters
DRT	Demand Responsive Transport
EGR	Escape Gases Recirculation
EPI	Environmental Performance Indicators
GEE	Gases de Efeito Estufa
GPP	Green Public Procurement
GVRP	Green Vehicle Route Problem
GWP100	Global Warming Potential - 100 anos
HEB	Hybrid Electric Bus
H ₂ V	Hidrogênio Verde
I_MUS	Índice de Mobilidade Urbana Sustentável
NMHC	Non-methane Hydrocarbons
OC	Organic Carbon
PED	Pontos de embarque e desembarque
PNMC	Política Nacional sobre Mudança do Clima

ppm	Partes por milhão
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
SCR	Selective Catalytic Reduction
SGA	Sistema de Gestão Ambiental
SPP	Sustainable Public Procurement
TC	Transporte Coletivo
UE	União Europeia
WRI	World Resources Institute

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	15
2. OBJETIVOS.....	18
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	19
3.1 Limites Planetários, Mudanças Climáticas e Gases de Efeito Estufa (GEE).....	19
3.2 Contratos de Concessão.....	24
3.3 Compras Públicas Verdes.....	32
3.4 Indicadores de Mobilidade Sustentável e Performance Ambiental.....	37
3.5 Possíveis metas para contratos de concessão verdes.....	39
4. METODOLOGIA.....	43
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
5.1 Resumo das principais metas encontradas.....	46
5.2 Escolha das metas para análise quantitativa.....	56
5.3 Definição de cenários e apresentação dos resultados.....	57
6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES.....	66
6.1 Potencial de redução de emissões das metas citadas.....	66
6.2 Limitações e recomendações.....	66
REFERÊNCIAS	

1. INTRODUÇÃO

A urgência da crise ambiental no mundo e no Brasil se tornou um tema que responsabiliza a todos, coletiva e individualmente, a agir de forma a minimizar seus impactos e riscos para o Sistema Terra, que fornece e sustenta a vida a todas as espécies e à biosfera como um todo. Se trata especialmente da sobrevivência humana, mas também da manutenção da vida em todas as suas formas, inclusive a fauna, a flora e o ambiente natural, do qual somos parte. Nas áreas profissional e acadêmica, a responsabilidade é a de aprofundar a análise e subsidiar políticas públicas para que medidas imediatas possam ser adotadas, bem como entender os intrincados mecanismos do impacto humano sobre o ambiente e seus nefastos resultados. Como bem apontam Arruda, Cunha e Milioli (2020, p. 4):

Quanto mais a economia cresce, maior será a degradação ecológica, nos moldes do neoliberalismo vigente, maior serão os danos de todas as vertentes. Até porque, a rápida expansão do crescimento da economia determina, nesse veloz regime de exploração, a incorporação de novos territórios visando a obter recursos, fabricação de mercadorias e distribuição de produtos para os mercados consumidores, além de áreas para destinação de resíduos.

O presente estudo, um Projeto Ambiental de Conclusão do curso de Engenharia Ambiental, buscou trabalhar com um sistema antrópico que apresenta suas dificuldades - trata-se da ocupação de espaços densos, as cidades, onde crescentemente ocorre e transita a vida humana. Nelas, a economia de aglomeração e os efeitos de escala fazem com que os sistemas tendam a ser mais eficientes, e a informação e os produtos circulem com maior velocidade. Uma preocupação importante nesse cenário é a locomoção das pessoas, porque levanta questões sobre acesso e igualdade, além das emissões.

No contexto urbano brasileiro no século XXI, o Transporte Público Coletivo por ônibus é uma das principais formas de locomoção diária da população urbana, com aproximadamente 25 milhões de viagens por dia (NTU, 2023). Para termos deste estudo e nos termos da Lei 12587/2012, Art. 4, Inciso VI, entende-se “transporte

público” ou “transporte coletivo” (TC) como: “serviço público de transporte de passageiros acessível a toda a população mediante pagamento individualizado, com itinerários e preços fixados pelo poder público(...)” (Brasil, 2012).

No Brasil, o serviço de transporte coletivo urbano é de responsabilidade constitucional dos entes municipais, que se utilizam de mecanismos jurídicos tais como permissão, autorização e Contrato de Concessão para delegar tais serviços parcial ou totalmente à iniciativa privada - ainda que continuem responsáveis por fiscalizar as empresas, garantir a qualidade do transporte e fixar as tarifas. Esses sistemas se encontram atualmente em um ciclo vicioso, como explica Pelegi:

Com menos pessoas usando ônibus para se locomover – e conseqüentemente menos receita no sistema de ônibus, o cálculo da tarifa remete a uma passagem mais cara. Além disso, a queda de receita no segmento reduz também os investimentos no sistema de ônibus. Menos investimentos somados a menos receita implicam em serviços cada vez piores e mais caros. A queda de passageiros aumenta, retroalimentando um ciclo vicioso. (Pelegi apud Cruz, 2019, p. 13)

Santarém (2023) aponta 5 principais causas desse ciclo:

- 1) Redução de passageiras/os por migração para o automóvel (devido às políticas de expansão desse mercado e disponibilidade de crédito para aquisição de veículos particulares)
- 2) Redução de passageiros/as por crise econômica (que levou muitas pessoas a outros meios de transporte, inclusive a “mobilidade ativa compulsória”, ou seja, caminhar ou utilizar bicicleta por falta de alternativas)
- 3) Redução de passageiros/as por migração por “uberização” (competição com os aplicativos de serviços de mobilidade por automóvel e, mais recentemente, por motocicleta, devido especialmente aos horários ampliados, preços competitivos e comodidade)
- 4) Redução de passageiros/as por conflito social em torno da tarifa

A quinta causa apontada é a pandemia de COVID-19, que iniciou em 2020 e ocasionou a queda na demanda do TC em 24,4% entre 2019 e 2022 (NTU, 2023), deixando evidente esta problemática. O fenômeno de diminuição do número de passageiros, que já existia desde a década de 1990, levou gestores em todo o país a adotar subsídios públicos como forma a conter este ciclo, financiar o sistema e evitar seu colapso. Não há efetiva regulação legal acerca da governança e dos melhores caminhos de efetivar esses subsídios e ainda há dúvida se esses esforços serão suficientes para retirar o TC de seu ciclo vicioso, iniciando um ciclo virtuoso com transporte de qualidade e acessível. Portanto, é de extrema importância a elaboração de estudos que avaliem oportunidades resolutivas de reversão do ciclo vicioso, além da avaliação e melhoramento contínuo dos contratos de concessão. Nessa direção é que este trabalho aponta.

2. OBJETIVOS

Este estudo teve como objetivo principal fazer uma revisão teórica e analisar qual a redução possível de emissão de Gases de Efeito Estufa (GEE) proveniente da adoção de metas, critérios e cláusulas ambientais em contratos de concessão do transporte público coletivo por ônibus no Brasil.

Como objetivos específicos, pode-se destacar:

- revisar na literatura nacional e internacional as possíveis metas, critérios e cláusulas ambientais envolvidas em contratos de concessão do transporte coletivo
- compreender através da literatura se é possível estimar o potencial de redução de emissões de cada meta, como forma de adaptação do setor de ônibus urbanos às mudanças climáticas
- indicar as viabilidades dos objetivos acima para estudos futuros

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão compreende o estado atual de parte dos estudos (a que se teve acesso durante o segundo semestre de 2023, período de realização do trabalho) sobre as emissões de GEE no mundo e no Brasil, em particular as contribuições do setor de transporte coletivo por ônibus. São abordados também aspectos jurídicos, técnicos, econômicos e legais do instrumento nomeado Contrato de Concessão, bem como boas práticas em sua elaboração e tipos de metas, critérios e cláusulas que podem ser incluídas, como as sociais, econômicas e da qualidade. Para termos deste trabalho, os termos “metas”, “critérios” e “cláusulas” serão tratados como similares e intercambiáveis.

A continuação da revisão se dá no aspecto ambiental dos contratos de concessão, apresentando o conceito de Compras Públicas Verdes (CPV), derivado de conceitos europeus como *Sustainable Public Procurement* (SPP), *Green Public Procurement* (GPP) ou ainda *Circular Public Procurement* (CPP). A quarta parte traz alguns Indicadores de Mobilidade Urbana de cunho ambiental e o conceito de performance ambiental. Por fim, são apresentadas possíveis metas para contratos de concessão sustentável a partir da literatura.

Para essa revisão, foram visitadas plataformas on-line com publicações em português e inglês, em seus variados formatos como teses, dissertações, artigos, anais de congressos e etc., dando preferência para trabalhos disponíveis na íntegra. Igualmente buscou-se priorizar publicações atuais (últimos cinco anos). algumas das principais plataformas foram: Google Acadêmico, Lume UFRGS, Portal de Periódicos CAPES e Science Direct.

3.1 Limites Planetários, Mudanças Climáticas e Gases de Efeito Estufa (GEE)

Um dos principais desafios atuais é a adequação da economia global aos limites do planeta, de forma a garantir que as próximas gerações tenham acesso aos recursos

naturais em toda sua plenitude, sem prejuízo em termos de quantidade nem qualidade. Um amplo estudo liderado por Richardson et al. (2023, p. 1) identificou 9 processos naturais na Terra que “são críticos para manutenção da estabilidade e resiliência do sistema terráqueo como um todo”, os chamados 9 Limites Planetários:

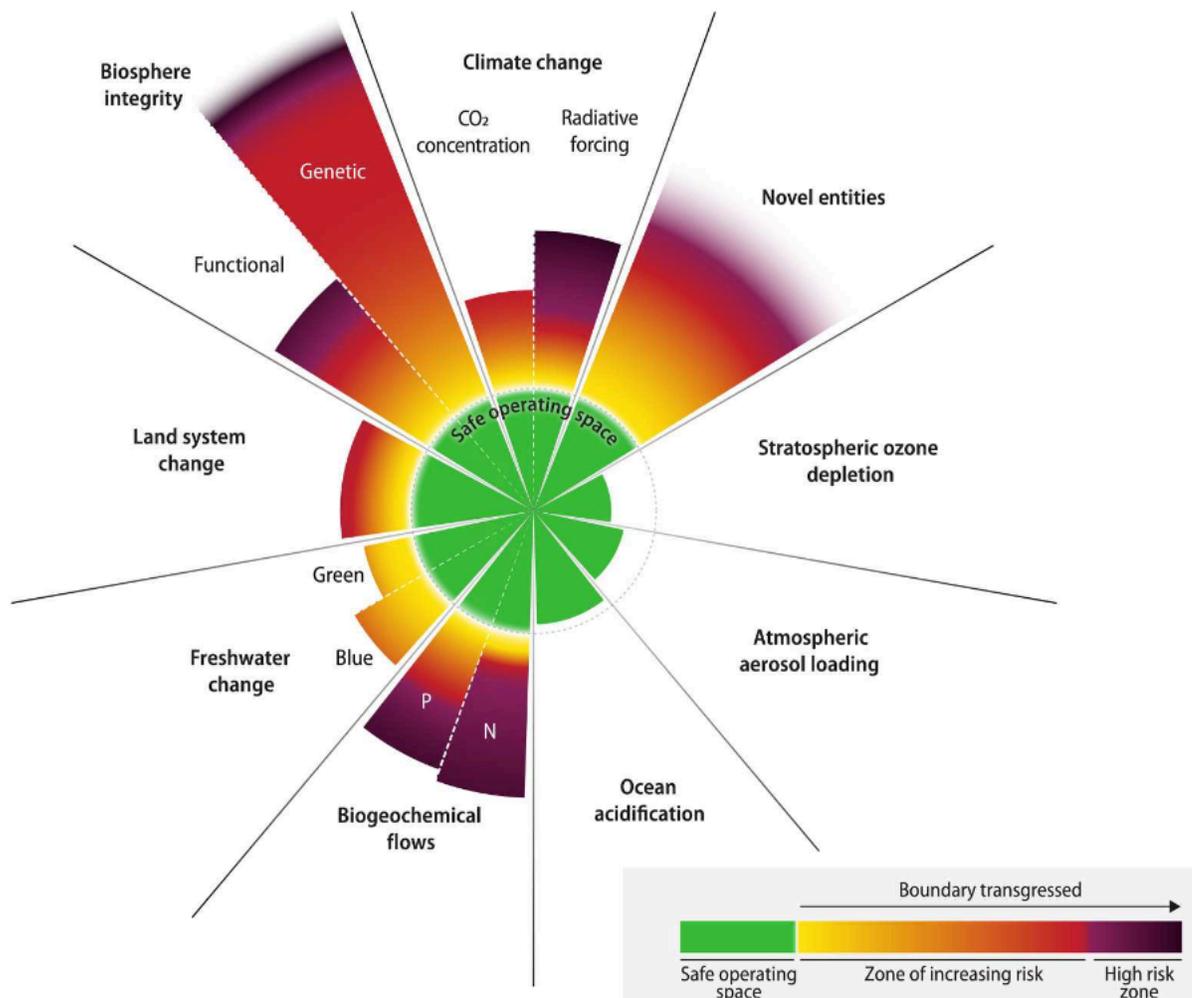
É claramente de interesse da humanidade evitar perturbar o sistema da Terra de uma forma que haja risco de mudanças ambientais globais tão marcadas. Os Limites Planetários [*planetary boundaries*] representam uma estrutura de trabalho sobre os sistemas e processos biofísicos e bioquímicos que regulam o estado do planeta dentro de uma amplitude que se sabe histórica e cientificamente que é provável que mantenha a estabilidade do Sistema Terra e dos sistemas de vida importantes para o bem-estar humano e para o desenvolvimento social experienciados durante o Holoceno.
(Tradução livre do original em inglês)

Os autores apontam que essa abordagem da Terra como um sistema único é fundamental, pois à medida que se separam as questões ambientais em fatores aparentemente desconectados (mudanças climáticas, perda de biodiversidade, poluição) se perde o valor sinérgico que as parcelas podem ter para o planeta - tanto de forma positiva quanto negativa. Atualmente, 6 dos 9 Limites foram superados, o que coloca grande tensão no Sistema Terra. A Figura 1, abaixo, ilustra os 9 Limites em seu estágio atual. Apesar de não ser o foco deste trabalho, para situar onde o estudo se insere no contexto ambiental global é importante apresentar brevemente os 9 Limites, sem ordem definida (em tradução livre a partir do original em inglês, e destacados em negrito os limites superados):

- **Mudanças climáticas** (*climate change*)
- **Mudanças na integridade da Biosfera** (que trata de temas como diversidade genética - *biosphere integrity*)
- Ozônio Estratosférico (*stratospheric ozone depletion*)
- Acidificação dos oceanos (*ocean acidification*)
- **Fluxos biogeoquímicos** (ciclos de fósforo e nitrogênio - *biogeochemical flows*)
- **Mudanças no uso do solo** (*land system change*)
- **Mudanças nas águas doces** (*freshwater change*)

- Aerossóis atmosféricos (*atmospheric aerosol loading*)
- **Poluentes emergentes** (químicos sintéticos liberados no ambiente sem controle de segurança, como microplásticos, fármacos e resíduos radioativos - *novel entities*)

Figura 1 - os 9 Limites Planetários em suas condições atuais



Fonte: Richardson et al., 2023

Este trabalho se localiza no limite das Mudanças Climáticas, em seu escopo Concentração de CO₂, um dos limites considerados superados. A discussão sobre a qualidade do ar e seus efeitos na saúde humana, bem como no efeito estufa e consequentes mudanças climáticas, está bastante avançada em termos acadêmicos

(Artaxo, 2021). Apesar disso, no âmbito político ainda é necessário implementar medidas para seu monitoramento e melhoria compondo banco de dados mais robustos e atualizados. No Brasil, as redes de monitoramento da qualidade do ar são bastante esparsas, muito aquém das necessidades, com a maioria dos estados não realizando qualquer monitoramento (IEMA, 2022). O Conselho Nacional de Meio-Ambiente (BRASIL, 2018b, p. 1), define como poluente atmosférico

qualquer forma de matéria em quantidade, concentração, tempo ou outras características, que tornem ou possam tornar o ar impróprio ou nocivo à saúde, inconveniente ao bem-estar público, danoso aos materiais, à fauna e flora ou prejudicial à segurança, ao uso e gozo da propriedade ou às atividades normais da comunidade.

Apesar das dificuldades técnicas e econômicas do monitoramento do ar para avaliar a poluição local, para efeitos globais é possível utilizar metodologias *top-down* ou *bottom-up* para estimar emissões. Como explica Bhave et. al. (2014, p. 2)

A abordagem *top-down* tipicamente envolve a análise quantitativa de mudanças climáticas esperadas, o que dá subsídio para modelos de impacto. Medidas para aliviar estes impactos são então modeladas e sua eficácia é comparada. A abordagem *bottom-up* primeiro caracteriza a vulnerabilidade social de forma qualitativa, seguida pela identificação e avaliação de opções de adaptação usando processos participativos. (Tradução livre a partir do original em inglês)

Essas metodologias são especialmente pertinentes no caso dos GEE, que são responsáveis pelas mudanças climáticas e afetam a saúde de bilhões de pessoas, degradando ecossistemas, ameaçando a biodiversidade e colocando em dúvida a continuidade da vida humana na Terra. Segundo o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, em seu relatório síntese (IPCC, 2023, p. 20), “é provável que GEEs tenham contribuído para um aumento de temperatura entre 1,0 e 2,0 graus Celsius” em todo o planeta desde 1850. Em 2019, os setores de energia, transportes, indústria e edificações contribuíram para 79% das emissões globais de GEE (IPCC, 2023 p. 20). Os dados apontam para a urgência na adoção de medidas mitigatórias e adaptativas, de forma coesa e coordenada em todo o mundo.

Este mesmo relatório aponta que em 1850, a concentração média de CO₂ na atmosfera era de 280 ppm (partes por milhão), enquanto em 2021 alcançou 410 ppm. Ele também demonstrou que as comunidades que menos contribuíram historicamente com emissões são as mais afetadas pelas mudanças do clima na forma de temperaturas elevadas extremas, precipitação intensa, secas e outros fatores. São mais de 3 bilhões de pessoas vivendo em áreas vulneráveis à mudança do clima, inclusive no Brasil, o que torna o dado mais dramático.

O Brasil apresenta vulnerabilidades importantes no que tange às mudanças climáticas. Segundo Artaxo (2020, p. 57), “o observado aumento da frequência e intensidade de eventos climáticos extremos tem impactado sobremaneira nossa população, a economia e o funcionamento dos ecossistemas”. O autor afirma ainda que estes eventos trazem impactos à “produção agrícola, à infraestrutura costeira, à disponibilidade de recursos hídricos, e à qualidade ambiental das cidades, entre muitos outros efeitos” (id., lb.). No contexto urbano, a presença das ilhas de calor e de enormes comunidades vivendo em situação de risco de desmoronamento e de cheias traz preocupação de que sigamos lamentando, ano após ano, altos números de pessoas mortas e desalojadas em eventos climáticos extremos.

Outro estudo, de 2020, se utilizou de modelagens climáticas para projetar o aquecimento previsto ao longo do território brasileiro, mostrando que “as projeções indicam um crescente aumento de eventos extremos de secas e estiagens prolongadas” (Dos Santos et al., 2020, p. 84). Além disso, afirmou que é esperado que as temperaturas mínimas e máximas aumentem em todas as regiões do Brasil, em intensidade igual ou superior ao aumento global, e que a precipitação aumente na região Sul do país, enquanto os eventos extremos de seca têm tendência a aumentar em partes das regiões Norte e Nordeste.

As maiores emissões de GEE no Brasil vêm da mudança do uso da terra e florestas, mais notadamente do desmatamento e das queimadas. Este setor representou 38% das emissões de GEE em 2020, segundo dados do Sistema de

Registro Nacional de Emissões (BRASIL, 2022). O setor de transportes como um todo foi responsável em 2020 pelo lançamento de 182 milhões de toneladas de CO₂ à atmosfera, sendo o modal rodoviário o maior contribuinte, com 67,9% desse valor. É possível atribuir parte desse ônus para os grandes veículos, como ônibus e caminhões, que emitem mais GEE quando comparados com veículos leves. No caso do transporte urbano, no entanto, é necessário levar em conta a ocupação de cada veículo para poder comparar as emissões *per capita*. Ferreira (2019) mostrou que levando em conta as emissões de CO₂ e a ocupação média, um ônibus tem emissões *per capita* 8 vezes menor que um automóvel. Dessa forma, este modal tem grande capacidade de absorver a demanda e transportá-la de forma sustentável, gerando benefícios sociais e econômicos.

Ainda que a implantação das ideias trazidas aqui dependa de fatores políticos (abordados na seção 3.2), a legislação brasileira já está se moldando à urgência do tema, tendo sido aprovada em 2009 a Lei Federal 12.187 (BRASIL, 2009), conhecida como Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC). O texto traz como uma de suas diretrizes “as medidas de adaptação para reduzir os efeitos adversos da mudança do clima e a vulnerabilidade dos sistemas ambiental, social e econômico”, e cita entre seus objetivos a mitigação da mudança climática através da redução de emissões antrópicas. Dessa forma, este trabalho traz relevantes apontamentos sobre a possibilidade de redução de emissões e adaptação do setor de ônibus urbanos para as mudanças climáticas, em coerência com a legislação apresentada.

3.2 Contratos de Concessão

A Constituição Federal do Brasil determina no Art. 6 que o transporte é um direito de todos cidadãos, e traz em seu Art. 30, inciso V, que é competência dos municípios: “organizar e prestar, diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, os serviços públicos de interesse local, incluído o de transporte coletivo, que tem caráter essencial” (BRASIL, 1988). A Carta Magna também traz no Art. 175

que as prestações de serviço pelo poder público deverão se dar “diretamente ou sob regime de concessão ou permissão, sempre através de licitação”.

A operação direta, quando a própria Prefeitura compra os veículos, detém as garagens e efetivamente opera as linhas, é uma solução pouco usada no Brasil. Entre as 28 cidades do Grupo de Benchmarking QualiÔnibus¹ (todas capitais ou cidades de médio porte), organizado pelo instituto WRI (*World Resources Institute*) Brasil, apenas Palmas (TO) opera de forma direta, através de sua agência pública ATCP. Também é comum em municípios com população muito pequena a Prefeitura operar um sistema simples, geralmente com apenas uma linha que percorre a parcela rural do território e leva ao centro da cidade, e vice-versa. De maneira geral, pode-se considerar que um sistema de TC pode ser concebido e ser viável financeiramente em municípios com pelo menos 50 mil habitantes. Singh (2022) relata sobre o caso da Índia, país onde a indústria de transporte público urbano

[...] é dominada por Empreendimentos Estatais de Transporte [N.T: STUs, na sigla em inglês], já que o setor privado é altamente fragmentado. No entanto, a maior parte das STUs vêm ao longo dos anos acumulando enormes perdas financeiras. Elas não são capazes de acompanhar os rápidos e substanciais aumentos na demanda; sua qualidade de serviço deteriorou, e sua parcela de mercado (*market share*) tem diminuído à medida que os passageiros optam pelo transporte privado e alternativo. (*Tradução livre do original em inglês*)

O equilíbrio econômico-financeiro do sistema é questão fundamental, pois o transporte público não deve ser interrompido de forma a não impedir o direito de ir e vir. Ao mesmo tempo, esse necessário equilíbrio pode ser usado como pretexto por operadores privados para explorar brechas nos contratos e gerar lucros indevidos. No caso da operação por licitação a entes privados, segue atual a ponderação de Itacarambi (1985, p. 10) de que

[...] o serviço de ônibus representa, por um lado, fonte direta de lucros dos empresários que exploram esse serviço e apoio ao negócio imobiliário urbano e, por outro lado, fator fundamental e imprescindível à reprodução da força de trabalho de ampla parcela da população urbana.

¹

Assim como os demais serviços públicos urbanos, há intensa discussão entre os benefícios e problemas decorrentes da privatização ou estatização. No caso do transporte coletivo, não é possível privatizá-lo devido às limitações constitucionais, mas a discussão pode se fazer de forma análoga comparando a municipalização do serviço (operação direta) e a delegação para entes privados. Independentemente das válidas e importantes discussões neste sentido, é comum se observar que a maior parte das cidades brasileiras, especialmente as de maior população, utilizam a concessão como forma de operação, por vezes somada a um operador público. Por isso, o foco deste trabalho está na concessão e regulação dos operadores privados, ainda que os mesmos princípios possam ser adotados em Regulamentos Internos e Estatutos de empresas públicas.

A Lei Federal 8987, de 1995, trouxe regulação para os regimes licitatórios, determinando a prestação de serviço adequado - aquele “que satisfaz as condições de regularidade, continuidade, eficiência, segurança, atualidade, generalidade, cortesia na sua prestação e modicidade das tarifas” (BRASIL, 1995). A partir desta lei, no Art 29, Inciso X, introduziu-se as figuras jurídicas da concessão através de licitação e da permissão, e definiu-se entre as incumbências do poder público “estimular o aumento da qualidade, produtividade, preservação do meio-ambiente e conservação” (BRASIL, 1995). As diferenças principais entre os contratos de concessão e as formas permissão e autorização são a solidez, segurança e estabilidade. Na concessão, um ente jurídico deve ganhar a licitação, respeitar o edital, o contrato e normas da agência reguladora, enquanto a permissão e a autorização são modelos considerados precários (requerem contrato e licitação, mas o primeiro pode ser celebrado junto a uma pessoa física e o segundo é um ato administrativo unilateral).

Apesar da legislação que regulamenta a licitação ser ampla e farta, os atores do setor de transporte público percebem lacunas na legislação, e grandes oportunidades de modernização. Há uma minuta para futuro projeto de lei chamada Marco Legal do Transporte Coletivo que trata dessas questões e, se aprovada, trará em seus princípios

e em muitos artigos os aspectos ambientais como condicionantes para os sistemas de TC, além de considerá-los parte dos requisitos mínimos de qualidade (a minuta foi disponibilizada publicamente pelo Ministério das Cidades em 2023). A legislação também poderá determinar que

Art. 28. A União poderá participar, mediante leis específicas, de apoio ao custeio dos serviços de transporte público coletivo visando assegurar o direito ao transporte, previsto no artigo 6º da Constituição Federal, e a melhoria da eficiência e qualidade dos serviços para a população, podendo fazê-lo das seguintes formas: [...]

III - como contrapartida ao alcance de metas de desempenho operacional, de satisfação e ambientais previamente estabelecidas nas normas de referência para a regulação da prestação dos serviços de transporte público coletivo expedidas pela União [...] (BRASIL, Ministério das Cidades, 2024)

Se aprovada (e mantida da forma como está no momento ou similar), essa legislação pode ter implicações na possibilidade dos contratos de concessão contribuírem para redução de emissões, uma vez que possibilita apoio financeiro por parte da União e outros entes beneficiados indiretamente das externalidades positivas dos sistemas de TC (Pompermayer, 2023), como a intensa movimentação da economia. O citado Marco Legal também tem o objetivo de oferecer, através dos contratos de concessão, incentivos para a melhoria da qualidade e redução dos custos. No cenário atual, há “barreiras à entrada de novos prestadores, tanto pela exigência de frota mínima suprida pelo concessionário como pela exigência de ativos essenciais (como as garagens) que dão vantagens de custos aos incumbentes” (Zaban et al., apud Pompermayer, 2023, p. 1).

Para entender este cenário atual, é importante comentar alguns dos fatores que podem ser considerados boas práticas ao licenciar os sistemas de transporte público. Tartaroti (2015) comenta sobre os contratos da cidade de Londres (Reino Unido), que desde o ano 2000 implantou Contratos de Incentivo à Qualidade (*Quality Incentive Contracts*) que “foram concebidos e aplicados de forma a induzir as empresas de ônibus a buscar uma produção para atingir o nível de qualidade esperado pelos usuários e pelo Poder Público” (Gómez-Lobe e Briones apud Tartaroti, 2015, p. 40).

Esses contratos têm duração máxima de 5 anos e hoje são celebrados junto a uma grande quantidade de empresas privadas, o que dilui os riscos da operação. Este princípio de contratos mais curtos também dá flexibilidade para a Prefeitura e é uma das recomendações do instituto de pesquisas WRI Brasil de “inovações em contratos de concessão para combater a crise do transporte coletivo no Brasil” (Lindau et al., 2022).

Tão relevante quanto a duração dos contratos é o modelo de licitação, que determina a forma que tomará o contrato. Usualmente, a modelagem pode ser:

- integral - quando uma única empresa torna-se responsável por muitos aspectos do sistema de transporte coletivo, ficando para o poder público usualmente o planejamento do sistema, a provisão da infraestrutura, a fiscalização e a definição das tarifas
- separada, dividindo a licitação “entre contratos de disponibilidade de ativos [como garagens e posse dos veículos] e da operação dos sistemas” (Pompermayer, 2023, p. 2).

Luttenberger (2015, p. 5) comenta que “dividir contratos em lotes menores pode fazer que especificações de contrato sejam mais atingíveis por empresas pequenas e médias (e sejam menos atrativas para empresas maiores)” (tradução livre do original em inglês). A separação das concessões em lotes fornece ao poder público maior flexibilidade, diminui o risco e também permite que cada contrato seja mais detalhado e atinja melhores resultados em termos de performance e qualidade. Esse tipo de modelo, conforme aponta Espinosa (2022, p. 4) surge a partir das “referências internacionais de: Londres, Singapura, Bogotá e Santiago, as quais indicam a factibilidade da separação entre a concessão da operação do sistema e a da provisão da frota”. A autora também ressalta que:

Os contratos de concessão vigentes atribuem aos operadores a obrigação de provisão da frota, controle da bilhetagem, da arrecadação e repartição tarifária, exploração de terminais, operação propriamente dita do serviço e provisão de

garagens [...]. A concentração de atividades administrativas e econômicas heterogêneas prejudica o foco em cada uma das partes autônomas, impedindo ganhos de produtividade, redução de custos, previsibilidade de despesas, obtenção de mão de obra especializada e benefícios na gestão de pessoas.

De maneira geral, é necessário que o poder público e seus agentes absorvam a lógica de que são responsáveis pelo sistema de transporte coletivo, e que o processo de licitação deve moldar este sistema, bem como forjar seus objetivos e metas, e não apenas delegá-lo para a iniciativa privada. As experiências internacionais e nacionais descritas acima mostram o grande potencial do modelo misto no qual múltiplas empresas se envolvem na operação, que é fiscalizada e planejada pelo poder executivo (e tendo ainda uma agência reguladora envolvida no processo, além da fiscalização dos órgãos judiciários de controle). Cada contrato de concessão pode prever qualquer número de cláusulas, a serem definidas pela Prefeitura local e servindo para adequar a futura operação (assim como a posse e aquisição de veículos e garagens) ao interesse público. Dessa forma, é possível listar tipos de cláusulas e metas que podem ser adicionadas, contendo múltiplos critérios.

Inicialmente, o poder público deve buscar incluir metas de cunho social, de forma a buscar diminuir as desigualdades. Já é bastante comum observar políticas tarifárias como estímulo à locomoção de parcelas da população, como estudantes, idosos e pessoas com deficiência. É possível ampliar este estímulo a partir de iniciativas como a aplicação de tarifas menores para moradores da periferia, favelas, comunidades urbanas e agrupamentos específicos como quilombos e aldeias, além de pessoas de baixa renda e outras situações de vulnerabilidade ou necessidade de proteção social.

Como já demonstrava Cardoso (2008), a partir de estudos detalhados da acessibilidade ao sistema em termos espaciais, é possível alterar fatores como a “localização dos pontos de ônibus, a falta de linhas e a frequência inadequada de determinadas linhas” (Cardoso, 2008, p. 113). Este último fator pode ser incluído como meta nos contratos e deve ser objeto da fiscalização do poder público, a fim de garantir a maior acessibilidade possível à população, enquanto os dois fatores anteriores

usualmente recaem diretamente sobre o poder público, no modelo de concessão tradicional do país.

Há políticas de mobilidade não tão efetivas do ponto de vista do interesse público, porém ainda muito utilizadas nos contratos de concessão. Por exemplo, políticas que relacionam o valor da tarifa à quilometragem percorrida fazem com que os moradores de periferia sofram o ônus de pagar mais pelo sistema, mesmo que, no geral, possuam renda menor àqueles que o utilizam em distâncias menores. Essas políticas poderiam funcionar em sociedades menos desiguais, ou onde a desigualdade não tivesse um caráter espacial tão evidente. Metas de performance também são comumente usadas, medindo fatores como o Índice de Passageiros por Quilômetro (IPK, na sigla em inglês) e outros de cunho econômico. Apesar de buscarem eficiência no sistema, essa abordagem, que foi a predominante em grande parte do século XX, não representa completamente os valores que o público espera do sistema de transporte coletivo. Os aspectos sociais, ambientais e de qualidade do serviço muitas vezes são diminuídos em importância pelos operadores, que buscam satisfazer apenas as metas operacionais.

Nos últimos anos, o debate sobre metas e cláusulas de contrato que incluam a qualidade do serviço tem se aprofundado, frente à demanda dos clientes do sistema. A competição com outros modos de transporte como os aplicativos de serviços de mobilidade fez com que as pessoas aumentassem seu nível de exigência com a qualidade do transporte e põe em discussão a necessidade de gerar-se um ciclo virtuoso no setor (Cabral, 2021). A metodologia QualiÔnibus, desenvolvida pelo instituto de pesquisas WRI Brasil, traz 18 aspectos da qualidade a serem monitorados pelos gestores dos sistemas de TC, em especial via Pesquisas de Satisfação com os clientes do sistema (WRI Brasil, 2020). São eles:

1. Acesso
2. Disponibilidade
3. Rapidez do deslocamento

4. Confiabilidade
5. Integração
6. Conforto dos pontos de ônibus
7. Conforto das estações
8. Conforto dos terminais
9. Conforto dos ônibus
10. Atendimento ao cliente
11. Informação ao cliente
12. Segurança pública
13. Segurança em relação a sinistros de trânsito
14. Exposição a ruído e poluição
15. Forma de pagamento e recarga
16. Gasto com transporte
17. Aspectos Gerais
18. Aspectos Financeiros

Esse conjunto de indicadores exemplifica fatores muitas vezes pouco percebidos ou valorizados pelos gestores, mas muito estimados pelos clientes. Analisá-los de forma global e incluir aferições destes nos contratos é importantíssimo para melhorar a qualidade do transporte e, assim, atrair e trazer de volta passageiros ao sistema.

Há questões políticas que não podem ser ignoradas ao discutir a temática dos contratos de concessão. Em muitas cidades, a implantação de contratos que prezem pela qualidade do transporte pode ser dificultada por diversos fatores, como agentes políticos que tenham restrições por variados motivos (causas econômicas ou eleitorais, por exemplo) ou em função do *lobby* de determinadas empresas. A montagem de um edital consistente requer uma estrutura institucional capaz de atuar nos níveis estratégico, tático e operacional (UITP, 2019). Uma das opções é instituir uma Sociedade de Propósito Específico responsável pela modelagem e confecção do edital,

que consiste em um grupo formado por representantes de diversas agências públicas e de regulação.

Outra dificuldade apresentada é a coesão do Contrato e da licitação com políticas urbanas mais amplas, como o próprio Plano Diretor, os orçamentos e planos econômicos municipais, os Planos de Mobilidade Urbana e políticas de transportes e de desenvolvimento urbano. Também é importante que os contratos dialoguem e sigam a legislação ambiental vigente, inclusive a PNMC. O transporte público pode ser uma ferramenta para gestores atingirem objetivos de desenvolvimento urbano e sustentabilidade, pois pode levar a mudanças no valor da terra e por ser o que conecta grande parte dos trabalhadores a seus destinos. Nesse contexto, políticas que levem em conta a metodologia de Desenvolvimento Orientado ao Transporte Sustentável (TOD, na sigla em inglês) podem ter muito valor. Atualmente, muitas cidades brasileiras estão próximas do fim de seus contratos de concessão (ou nunca tiveram contratos), o que constitui uma janela de oportunidade para os municípios modernizarem os contratos, prezando pela qualidade, integrando-nos à política urbana e incluindo o fator ambiental.

3.3 Compras Públicas Verdes

Os contratos celebrados pelos governos constituídos devem zelar pelo interesse público, inclusive o meio ambiente. Como lembra Silveira (2007, p. 6)

A Constituição Federal, promulgada em 1988, previu o direito ao meio ambiente saudável. Em seu artigo 225, estabeleceu os princípios básicos de defesa do meio ambiente, garantindo-o como um bem de todos. A preservação ambiental é, portanto, dever do Poder Público. Dessa forma, toda vez que há uma concessão de serviço público, deve ser buscada a preservação do meio ambiente.

O autor também aponta a necessidade de que durante a elaboração do contrato, sejam listadas as vulnerabilidades ambientais e as “condutas a serem tomadas pela concessionária de forma a impedir ou minorar eventuais danos”, garantindo também o

poder público o monitoramento dos contratos e a fiscalização da concessionária a partir de estudos ambientais periódicos (Silveira, 2007, p. 7). Dessa forma, é necessário entender o contexto global da aplicação de preceitos ambientalmente corretos nos contratos para aplicá-los no transporte coletivo.

Há três conceitos sendo aplicados em estudos de concessão com vistas ao aumento da performance ambiental, especialmente no continente europeu. São eles:

- 1) *Sustainable Public Procurement*, (SPP, traduzido livremente como Compras Públicas Sustentáveis), que são o conjunto de medidas tomadas por órgãos públicos ou privados que garantem que “produtos e serviços adquiridos pela organização atinjam seu valor baseado em análise de ciclo de vida e gerem benefícios não apenas para a organização, mas também para o meio ambiente, a sociedade e a economia” (ICLEI, 2014, p. 8).
- 2) *Green Public Procurement* (GPP, traduzido livremente como Compras Públicas Verdes), definido como “um processo no qual autoridades públicas buscam licitar a aquisição de bens, serviços ou trabalho com impacto ambiental reduzido em seu ciclo de vida [...]” (Sönnichsen e Clement, 2020, p. 2)
- 3) *Circular Public Procurement* (CPP, traduzido livremente como Compras Públicas Circulares), definido como

“o processo no qual autoridades públicas adquirem trabalhos, serviços ou bens que buscam contribuir para ciclos fechados de energia e materiais dentro de cadeias logísticas, além de minimizar, e na melhor das hipóteses evitar, impactos ambientais negativos e geração de resíduos ao longo de todo seu ciclo de vida” (Comissão Europeia apud. Sönnichsen e Clement, 2020, p. 2.
Tradução livre do original em inglês)

Há grande similaridade entre os conceitos, todos trazendo em comum a proposição de licitações e contratações do poder público passarem a se basear não apenas no melhor preço, mas também em análises de ciclo de vida e de qualidade

ambiental. A Europa é um dos lugares do mundo onde a discussão sobre GPP ou SPP está mais avançada, e por isso os exemplos a seguir são deste continente. Atualmente, a adoção de SPP é recomendada pela Comissão Europeia, mas é um instrumento voluntário, o que significa que os países membros da União Europeia (UE) não têm a obrigação de adotá-lo (Pouikli, 2021). Um estudo de Rosell (2022) revisou os contratos de concessão vinculados a diferentes setores de transporte na UE e descobriu que quase 24% dos contratos de aquisição de ônibus são considerados SPP, enquanto para serviços de ônibus a taxa foi mais próxima a 18%, e no setor de transporte público de forma geral aproximadamente 9%. Isso mostra o quão desafiador é tornar os contratos mais adequados ambientalmente, já que no lugar onde as discussões estão mais avançadas apenas uma pequena parcela dos contratos adota metas consideradas verdes.

Apesar do tema ser relativamente novo, foi apontado que contratos do tipo SPP tendem a se espalhar rapidamente, com agências de trânsito copiando umas às outras (mais do que se embasando em estudos acadêmicos) e com potencial para avanço rápido nos próximos anos. Os países onde a implementação de SPP está mais avançada são Noruega, França e Dinamarca, e a Suíça aparece como o país onde este tipo de contrato tem o maior impacto - o que é interessante, porque estes países figuram entre os 5 maiores provedores de serviço de transporte público na UE (Rosell, 2022).

No contexto europeu, essa discussão é acompanhada por extensas diretrizes da UE para contratos públicos, que levam a documentos detalhados. É possível traçar um paralelo com as regras de contratos de concessão no Brasil, que quando comparadas com os modelos de permissão e autorização podem ser entendidas como complexas. Um estudo da Universidade de Linköping, na Suécia, liderado por Lidestam e Abrahamsson (2010) argumentou a partir de um modelo matemático que, para uma região desse país, “regras detalhadas no processo de licitação pública levam a emissões de CO₂ maiores” (p. 4) devido às limitações de contratos em termos do tamanho dos ônibus. Essa ideia vai de encontro à hipótese inicial do presente trabalho

de que cláusulas e metas levariam a menores emissões (ainda que o estudo acima citado tenha avaliado fatores limitados e em uma realidade distante da brasileira).

Um dos fatores importantes a se analisar na quantificação de emissões oriundas do transporte coletivo é o tamanho dos veículos. Veículos grandes tendem a emitir mais, o que pode ser compensado por uma grande ocupação, levando a emissão *per capita* a cair. No caso de ineficiências no sistema de planejamento das linhas e localização de pontos de embarque e desembarque de ônibus (PED), porém, estes veículos podem ser comprometedores ao circularem com poucas pessoas. Nesse caso, seria preferível fazer uso de veículos menores, que poluem menos. Outro estudo de Lidestam (2014, p.5) expandiu a investigação para abranger cálculos econômicos, indicando que as “emissões podem diminuir em até 47% com o uso de ônibus menores, enquanto os custos aumentariam em no máximo 10%” . São indicações promissoras, a serem testadas em outros contextos.

Segundo o ICLEI (2014) - Local Governments for Sustainability, em seu Manual Procura+ , algumas das especificações técnicas que contribuem para SPP são (em tradução livre do original em inglês):

- veículos aptos a receber dois ou mais tipos de combustíveis (veículos flex)
- estabelecimento de níveis máximos de emissões e ruído
- estabelecimento de níveis mínimos de eficiência energética
- presença de indicadores de mudança de marcha, de consumo de combustível e monitores de pressão dos pneus
- requerimentos de design para a desmontagem e reciclagem dos veículos ao fim da vida útil
- possibilidade de haver veículos elétricos, híbridos ou movidos a combustíveis alternativos

No contexto lusófono e em especial brasileiro, os conceitos de SPP e GPP são aplicados através das traduções Compras Públicas Sustentáveis (CPS) e Compras Públicas Verdes (CPV), sendo a última a escolhida neste texto para tratar do conceito de forma geral. No Brasil, ainda não há “uma estratégia concreta relacionada às CPV, destacando-se a inexistência de critérios comuns e verificáveis, propulsores de boas práticas na área” (Timm et al., 2020, p. 2). As autoras fizeram um estudo de caso da cidade de Porto Alegre (RS), que em seu termo de referência para contratação do TC por ônibus (Porto Alegre - Edital 01/2015 apud Timm et al., 2020) prevê cinco metas de desempenho ambiental:

- (i) renovação de, no mínimo, 10% da frota total a cada ano;
- (ii) idade média máxima da frota de 05 anos;
- (iii) a iluminação geral interna do veículo deverá ser através de painéis de lâmpadas tipo LED;
- (iv) dinâmica de processos de monitoramento e controle do sistema através de Sistemas Inteligentes de Transportes (ITS);
- (v) “no tocante aos materiais utilizados, à preocupação com o meio ambiente (...) deverão observar os projetos básicos mais recentes desenvolvidos pelos fornecedores e fabricantes” (p. 6)

Os itens já são aplicados nos atuais contratos da cidade e em especial os itens (i), (ii) e (iv) têm potencial de grande redução de emissões - os dois primeiros por levar a frota a modelos mais recentes, portanto embutidos de tecnologia mais eficiente e menos poluente, e o item (iv) por potencialmente contribuir na otimização das rotas, o que aumenta a eficiência do sistema como um todo e tende a diminuir suas emissões ou, ao menos, aumentar sua demanda - o que diminui as emissões *per capita*. Todavia, as autoras apontam que não houve no edital uma exploração mais profunda do potencial da inovação ambiental e os “critérios de desempenho ambiental comumente empregados em CPV no contexto europeu” (Timm et al., 2020, p. 6). São elencados a seguir critérios que as autoras sugerem como alternativas neste cenário, levando em conta que para haver viabilidade na adoção destes a sua inserção deve ser gradual:

- (i) exigência da troca dos ônibus com recomendações específicas de desempenho (como a certificação euro VI);
- (ii) monitoramento das emissões a partir de dados de rodagem já disponíveis da EPTC [Empresa Pública de Transporte e Circulação do município];
- (iii) substituição do diesel S10 por uma parcela de biodiesel, posterior substituição por energias limpas (elétrico, bateria, etc);
- (iv) monitoramento do desempenho do veículo através da eficiência energética (km/l);
- (v) otimização das rotas, a partir da avaliação de demanda de passageiros

Percebe-se que já há avanço teórico no tema das CPV, mas que sua aplicação ainda é lenta quando comparada com os desafios a serem enfrentados, em especial pela urgência da crise climática.

3.4 Indicadores de Mobilidade Sustentável e Performance Ambiental

A performance ambiental de um sistema se refere ao resultado do conjunto de práticas de gestão ambiental (em geral, através de um Sistema de Gestão Ambiental - SGA - com responsabilidades, atores, metas e monitoramento definidos) aplicadas. Selitto et al. (2015), dividiram os impactos em 5 parcelas: **Atmosfera**, que se refere ao tema deste estudo, e o principal impacto - o lançamento de GEE (além de poluentes locais com grande impacto à saúde humana, como material particulado); **Efluentes**, tratando da qualidade da água; **Resíduos Sólidos**, direcionando a abordagem para os descartes e produtos que não podem ser aproveitados ao fim de sua vida útil; **Uso do solo**, o aspecto espacial do sistema; e **Recursos naturais**, tratando de energia e água, principalmente.

Os Indicadores de Performance Ambiental (EPI, na sigla em inglês) devem ser mirados em tratar do resultado da ação ambiental tomada, e não necessariamente no impacto financeiro que tais ações podem trazer para uma empresa, ou mesmo potenciais ganhos em marketing que podem ser levantados a partir dessas ações. Por isso, é importante estabelecer, monitorar e avaliar tais indicadores no contexto dos

contratos de concessão, a fim de garantir uma performance ambiental adequada às necessidades do planeta e às metas propostas.

Um estudo de 2019 realizou uma análise bibliométrica de trabalhos que tenham tratado de indicadores de desempenho em mobilidade. Foi evidenciado que os artigos contendo indicadores de sustentabilidade ambiental dos sistemas passaram a ser publicados em maior quantidade a partir de Black et al (2002), que

desenvolveram a perspectiva de modos de transporte não-motorizados e a perspectiva ambiental porque verificaram a necessidade de agrupar a ideia de sustentabilidade (que é dada pela associação de fatores sociais, econômicos e ambientais) com os sistemas de transporte (Braga et al, 2019, p. 6).

Os principais indicadores de cunho ambiental encontrados por Braga, ou seja, os que mais frequentemente apareceram nos artigos revisados, foram:

- i) poluição do ar (CO, CO₂ e outras emissões)
- ii) consumo de combustíveis fósseis
- iii) parcela da população exposta a ruídos decorrentes do trânsito
- iv) eficiência energética
- v) emissão de substâncias tóxicas
- vi) uso do solo

No contexto brasileiro, Marcela Costa (Costa, 2008) desenvolveu um índice denominado I_SUM (Índice de Mobilidade Urbana Sustentável, na sigla em inglês), com muitos indicadores compilados abrangendo múltiplos domínios. Para os impactos ambientais, utilizou os mesmos aspectos i, ii e iii usados por Braga, com a diferença de que dividiu o aspecto i em dois indicadores (emissões de CO e emissões de CO₂) e incluiu dois outros aspectos (abaixo em negrito), bastante relevantes no cenário nacional. Dessa forma, os indicadores do domínio “Aspectos Ambientais” do I_SUM são:

- i) emissões de CO

- ii) emissões de CO₂
- iii) parcela da população exposta a ruídos decorrentes do trânsito
- iv) presença de Estudos de Impacto Ambiental do sistema e de eventuais obras viárias**
- v) consumo de combustíveis fósseis
- vi) uso de energia limpa (através de ônibus elétricos e híbridos) ou combustíveis alternativos (como hidrogênio verde e biodiesel)**

Acerca do item iv encontrado por Costa (id., lb.), é importante salientar que recentemente, Termos de Referência de empreendimentos têm solicitado a avaliação de GEE, na forma de uma Avaliação Ambiental Estratégica. Esta avaliação pode integrar os editais de concessão das obras e da operação do sistema. Para este trabalho, foi considerado importante restringir a pesquisa aos itens i e ii de Braga, com objetivo de quantificar as possíveis reduções de emissão de GEE. Detalhamentos acerca de externalidades negativas como ruído, poluição de caráter local, substâncias tóxicas e uso do solo foram desenvolvidas por Zheng et al. (2013), e Jeon & Amekudzi-Kennedy (2005). No caso do uso do solo, por exemplo, Zheng e colegas exploram o aumento da urbanização proporcional ao crescimento da população e a área ocupadas pelas garagens, faixas e demais estruturas do sistema de transporte coletivo. A fim de entender quais medidas mitigadoras desses seis efeitos podem ser incluídas como cláusulas, critérios ou metas ambientais em contratos, buscou-se exemplos no Brasil e no mundo como parte da metodologia de pesquisa.

3.5 Possíveis metas para contratos de concessão verdes

Parte deste trabalho buscou entender o cenário internacional da performance ambiental em contratos de concessão, especialmente no caso do transporte público coletivo por ônibus e de emissões de GEE. A agência pública de transportes da Finlândia (FTA) adotou em seus contratos de concessão uma série de medidas para mitigar desafios ambientais. Por ser uma única agência, responsável tanto por obras quanto pela concessão da operação de sistemas de transporte, foi possível adotar

medidas específicas, como limites de emissão de GEE nas obras viárias e pavimentação, e amplas, como planejamento futuro de transportes segundo princípios de ecoeficiência. Uma de suas medidas, que poderia ter impacto em contratos de concessão em terras brasileiras, foi a necessidade de motoristas de ônibus serem aprovados em um curso de direção com técnicas ambientalmente adequadas (Ojanen, 2019,), ou direção sustentável.

Direção sustentável (ou como é mais comumente referido, do inglês *eco-driving*) é um conjunto de técnicas que visam a redução de emissões de GEE e ruído - sem que isso necessariamente impacte no tempo de viagem. Essas técnicas se relacionam à velocidade operacional (que tende a economizar combustível se mantida próxima de constante), aceleração, desaceleração, escolha de rota, ociosidade e outros fatores (Huang et al., 2018). Na Grécia, um curso de direção sustentável fornecido a todos motoristas do maior operador público de transporte coletivo levou a uma redução de 10,2% no consumo de combustíveis durante o período das aulas, conforme apresentado por Zarkadoula et al. (2007). Após esse período, foi observado que a redução perene obtida foi de 4,35% quando comparada com o consumo antes do curso. Apesar do estudo não ser muito atual, ele indica claramente que ações de educação continuada têm grande potencial de redução de emissões.

É importante que as técnicas de direção sustentável sejam acompanhadas de um medidor de consumo de combustível em tempo real no painel dos veículos, para que haja feedback para o motorista. Estima-se que um programa de *eco-driving* possa aumentar o pulo de eficiência em duas vezes - ou seja, um aumento de 5% sem um medidor seria elevado a 10% na presença do medidor (Barkenbus, 2010,). Isto se dá porque o medidor serve como estímulo e feedback para o motorista, que pode então saber que está aplicando a técnica de maneira correta e facilitar a alteração de comportamento. “Muitos [motoristas] tentam até mesmo transformar a técnica em um jogo, procurando formas de maximizar a economia de combustível” (Kurani apud Barkenbus 2010, p. 766, tradução livre do original em inglês).

No cenário do transporte público brasileiro, os indicadores para mensuração da performance ambiental usados pelos operadores de transporte são similares aos indicados em países estrangeiros. Um estudo conduzido por De Abreu et. al. (2011) entrevistou gerentes de gestão ambiental de dois operadores privados da cidade de Fortaleza (CE) e chegou à conclusão que, à época, a única medida a ser tomada para diminuição de emissões seria o uso de biodiesel. Apesar da grande propensão e oportunidade que o Brasil têm para desenvolver sua estrutura industrial de biocombustíveis, levanta-se a questão se isso seria o suficiente para diminuir as emissões do transporte coletivo para níveis adequados.

Segundo Scheffer (2020), um trabalho de revisão de literatura a respeito de índices de mobilidade urbana sustentável mostrou que o índice mais utilizado entre 19 trabalhos analisados foi “o I_MUS, com oito aplicações, seguido pelo Índice de Impacto da Mobilidade (MII), com três aplicações, e os demais, com uma aplicação” (Costa apud Scheffer, 2020). A autora também afirma que entre 2010 e 2018, uma média de 2,55 trabalhos por ano foram feitos utilizando o I_SUM como base metodológica, ainda que poucos tenham aplicado a ferramenta em sua totalidade.

No domínio “Aspectos Ambientais”, observou-se “dificuldade na coleta de dados, relatada por vários autores” (Scheffer, 2020), em especial nos indicadores Emissões de CO e de CO₂, inclusive em grandes cidades brasileiras. Isso denota a dificuldade que ainda se têm de obter dados acurados em relação às emissões do setor, e também dialoga com uma possível dificuldade no método estabelecido pelo índice I_SUM. No entanto, o indicador “Consumo de combustíveis fósseis” foi relatado como sendo de fácil obtenção, e tendo sido usado em todas as aplicações do índice, muito provavelmente devido à plataforma online disponibilizada pela ANP (Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis).

A partir desta revisão, nota-se a pertinência deste tema e sua relevância para as cidades brasileiras. Percebeu-se que a legislação está bastante atualizada com os estudos científicos recentes, especialmente no contexto ambiental. Os contratos de

concessão têm embasamento jurídico forte, mas ainda não há legislação única que incentive o setor a adotar as boas práticas citadas na literatura. Pôde-se entender o estado-da-arte do tema das metas ambientais em contratos de concessão como estando em estágio inicial no Brasil, sendo tratado de forma anexa a estudos mais amplos de mobilidade urbana sustentável. Na Europa, o tema tem avançado com o uso de diretrizes da UE para SPP, mas não foram encontrados trabalhos tratando especificamente do potencial de redução de GEE com o uso deste instrumento.

4. METODOLOGIA

A metodologia escolhida para este trabalho foi o uso de Análise de Sensibilidade a fim de determinar qual o potencial de redução de emissões das diversas cláusulas contendo critérios ambientais nos contratos de concessão do transporte coletivo por ônibus em 3 capitais brasileiras. Análise de Sensibilidade (*Sensitivity Analysis* ou SA, na sigla em inglês) (Lilburne e Tarantola, 2009) é um método que permite verificar as diferentes contribuições de variáveis para um resultado final, variando de forma separada cada uma delas. A criação de cenários é parte importante desse método. Para este estudo foi utilizada a Análise de Sensibilidade Local, que “considera a variação de uma única variável de entrada e sua influência na saída” (Santana, 2023).

Neste trabalho, o resultado final é a emissão de GEE dos sistemas de transporte coletivo por ônibus de três cidades brasileiras, e cada uma das cláusulas e metas ambientais presentes nos contratos representa uma variável a ser alterada. Dessa forma, se pode compreender qual a diminuição possível de emissões, dados diferentes cenários de adoção das metas. Primeiramente, foram resumidas as principais metas encontradas na etapa de revisão bibliográfica, chegando-se a 12 cláusulas que podem ser em contratos de concessão com vistas à diminuição de emissões de GEE (ver resumo na seção 5.1). Depois, foram escolhidas as metas para análise quantitativa a partir da disponibilidade de dados de redução de emissões.

A seguir, as metas foram agrupadas em sete cenários de forma a explorar as combinações de redução de emissões de cada uma. A adoção de software para otimização de rotas foi incluída em todos os cenários. As demais metas foram agrupadas de forma que todas pudessem ser simuladas simultaneamente, tendo em vista que algumas delas são mutuamente excludentes. Por exemplo, ao eletrificar completamente a frota, não é possível utilizar biocombustíveis nem dispositivos de troca de marcha, já que estes veículos não têm marcha. As técnicas de eco-driving foram desenvolvidas para veículos a diesel, que tem uma forma de operação distinta dos veículos elétricos devido a diferenças na potência, torque e outras características

operacionais - é possível que parte das técnicas poderiam resultar em maior eficiência em veículos elétricos, mas como isso não foi testado na literatura, não será avaliado. Ainda que eletrificação e hibridização da frota tenham sido abordados de forma conjunta nas metas, para a quantificação foi necessário separá-las. Não foram considerados cenários de aumento ou diminuição do tamanho da frota, apenas sua substituição. Assim, foram montados 7 cenários, cada um prevendo a aplicação de diferentes conjuntos de metas, apresentados na seção 5.3 deste trabalho.

Para montar o modelo utilizado, foram consultadas 20 das cidades participantes do Grupo de Benchmarking QualiÔnibus, com pedidos de informações sobre sua frota total e frota dividida em número de veículos por tipo de motor (elétrico, híbrido ou adequado às fases P-5, P-7 ou P-8 do PROCONVE). Três capitais brasileiras cederam dados sobre sua frota para este trabalho e foram utilizadas como estudo de caso: Porto Alegre (RS), Belo Horizonte (MG) e Salvador (BA). Também foram utilizados dados privados de quilometragem total para as três cidades, disponibilizados pelo instituto WRI Brasil, que os coletou para o ano de 2022. A localização das três cidades é ilustrada pelo mapa da Figura 2 abaixo.

Figura 2 - Três cidades brasileiras utilizadas como estudo de caso



Fonte: Autor (2024)

Também foram utilizadas na análise as emissões por tipo de motor, calculadas a partir da literatura. Para o cálculo das emissões anuais, foi considerado que a quilometragem rodada na cidade é distribuída de maneira proporcional entre a frota, tendo-se assim a quilometragem rodada por tipo de motor. Este número então é multiplicado pela emissão de CO₂eq por quilômetro e dividido por 1.000.000 para obter-se a quantidade de GEE emitida pelo TC da cidade, em toneladas por ano.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Resumo das principais metas encontradas

A partir da revisão bibliográfica, foram elencados doze fatores, considerados os principais, que poderiam ser incluídos em contratos na forma de metas, critérios ou cláusulas, de forma a reduzir a pegada carbônica dos sistemas de TC, sem ordem definida. Conforme levantado neste estudo, estas seriam as metas mais relevantes para análise:

- **Adoção de software para otimização de rotas**

Conforme apontado por Timm et al. (2020), o uso de softwares de otimização de rotas pode ter benefícios ambientais e de eficiência do sistema. A literatura sobre o Problema das Rotas Sustentáveis para Veículos (tradução livre de *Green Vehicle Route Problem*, ou GVRP) está bastante avançada, especialmente na diminuição de emissões relacionadas às operações logísticas. No caso das operações de TC, o trabalho de Moura (2022) apontou que, para a cidade de Porto Alegre em algumas condições específicas, o uso da otimização de rotas pode reduzir as emissões de GEE em aproximadamente 7%.

- **Aferição de eficiência mínima dos motores**

Usualmente, os testes de eficiência dos motores de veículos pesados são feitos apenas com o motor, em testes padrão que não levam em conta as condições reais do uso diário. São calculados parâmetros como a eficiência térmica dos sistemas de frenagem (*Brake Thermal Efficiency*, ou BTE, na sigla em inglês) e o consumo de combustível específico da frenagem (*Brake-specific Fuel Consumption*, ou BSFC, na sigla em inglês) (Rosero et al., 2020). Por isso, exigir das concessionárias aferições periódicas realizadas durante uma operação real, ou condições similares, pode levar a um maior controle da

manutenção desses sistemas e, portanto, a menores emissões. Para este trabalho, não foi quantificada qual a redução de GEE possível com essa abordagem.

- ***Eco-driving* (direção sustentável)**

Como abordado anteriormente no capítulo 3.5, foi verificado que a adoção de formação continuada para os motoristas na forma de cursos de *eco-driving* pode reduzir em até 10,2% as emissões de GEE (Zarkadoula et al., 2007), embora essa taxa caia para 4,35% após a finalização dos cursos. Pode-se considerar que a taxa dobre mediante a presença de medidores de consumo de combustível em tempo real (Barkenbus, 2010), chegando a uma taxa de redução de emissões de 8,7%. Dessa forma, pode ser formalizado nos contratos de concessão a obrigação de fornecer aos motoristas cursos de *eco-driving* periódicos.

- **Eletrificação da frota**

A mudança da frota para veículos elétricos é um dos fatores de maior potencial de redução de emissões, apesar de também ser provavelmente o de maior investimento financeiro. Outra alternativa é o uso de veículos híbridos, utilizando combustíveis fósseis ou biodiesel, além da energia elétrica. Da Silva & De Mendonça (2020) realizaram um estudo de caso para a cidade de Brasília (DF) comparando as emissões de um ônibus a diesel (adequado à fase P-6 do PROCONVE - Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) com veículos híbridos (HEB - *Hybrid Electric Bus*) e elétricos (BEB - *Battery Electric Bus*). Os resultados foram de uma diminuição de emissões de GEE de 64,7% para os BEB e de 23,9% para os HEB, além de uma diminuição de consumo de combustível de 18,8% no caso dos HEB. Vale ressaltar que, em termos de controle de emissões de GEE (representados por Hidrocarbonetos não-metânicos, NMHC, e metano, CH₄), a fase P-6 do PROCONVE é idêntica

em seus limites à fase P-7 (equivalentes às regulações europeias conhecidas como Euro IV e Euro V, respectivamente). Mais detalhes sobre o PROCONVE são abordados no item Renovação de frota.

- **Estímulo à integração e compartilhamento de dados**

Apontado pelo WRI Brasil como um dos aspectos da qualidade, a Integração trata da facilidade de usar duas linhas de ônibus em uma mesma viagem, e também da integração modal (por exemplo, usar um mesmo cartão de bilhetagem eletrônica nos ônibus, na micromobilidade e em sistemas de transporte por ferrovias, ou a possibilidade de levar sua bicicleta ao embarcar no ônibus). Entende-se como micromobilidade alternativas como bicicletas e patinetes compartilhados. Nos contratos de concessão, muitas vezes recai para a concessionária a responsabilidade pela bilhetagem, o que leva a dificuldade de acesso aos dados e mudanças no sistema de pagamento por parte das prefeituras. Dessa forma, incluir cláusulas sobre a governança dos dados ou até mesmo separar os editais de operação dos editais de bilhetagem eletrônica pode fornecer ao poder público maior flexibilidade e integração intra e intersistêmica. Oeschger et al. (2020, p. 18) afirmam que

a integração exitosa da micromobilidade e transporte público pode promover mudança de modal, com pessoas deixando de usar automóvel nos contextos urbanos e suburbanos, e portanto sendo um instrumento valioso para a descarbonização do transporte e redução dos impactos ambientais do setor, além de contribuir para cidades mais saudáveis e habitáveis.

(Tradução livre do original em inglês)

Ainda faltam estudos para entender de maneira mais profunda os reflexos destas políticas de integração na demanda do TC, na escolha modal e nas emissões de GEE, mas entende-se que a tendência é de que integrações bem-feitas, práticas e acessíveis contribuam de forma positiva para estes fatores. Tal contribuição pode ser facilitada caso haja a separação de lotes do contrato ou a atribuição clara do compartilhamento de dados e incentivo à integração.

- **Idade média máxima da frota estabelecida em contrato**

A idade média da frota é um dos fatores que já é adotado em muitos contratos de concessão, como por exemplo na cidade de Porto Alegre, onde é prevista uma idade média máxima de 5 anos. Isso tende a levar a uma maior satisfação dos clientes em função da qualidade de serviço. Também pode se considerar que tende a melhorar o desempenho ambiental devido aos novos veículos serem mais eficientes. A quantificação do benefício ambiental de um critério como esse depende do padrão de emissões adotado pelo veículo, e não necessariamente pela idade do mesmo, e portanto tal quantificação é abordada no item Renovação de frota.

- **Mecanismos de mitigação de emissões - instalação e controle do desgaste**

Atualmente, há uma grande variação de dispositivos que podem ser instalados nos ônibus de forma a mitigar parte de suas emissões, especialmente de gases nitrogenados. Em especial, algumas das tecnologias muito utilizadas são o *Selective Catalytic Reduction* (SCR, ou Redução Catalítica Seletiva, em tradução livre do original em inglês), seja em pares ou integrados a *Diesel Particulate Filters* (DPF, ou Filtros de Diesel Particulado, em tradução livre do original em inglês), além de absorvedores passivos de NO_x (Joshi, 2019). Os parâmetros de redução de emissões da UE, sendo o mais recente conhecido como Euro VI, já exigem algumas dessas tecnologias, mas foi demonstrado que sua eficiência na diminuição de poluição pode ser até maior, o que já leva a discussões em torno de um futuro padrão Euro VII. É possível equipar ônibus mais antigos com esse tipo de tecnologia, com grande benefício ambiental. No caso de ônibus que já possuem essas tecnologias ou similares, é necessário passar por manutenções periódicas a fim de garantir sua eficácia e controlar adequadamente o desgaste das peças. A inclusão das tecnologias e a sua

manutenção são fatores que podem ser levados em conta pelo gestor público ao licitar sistemas de TC, levando a reduções de emissões.

- **Marketing**

Como apontado pelos aspectos da qualidade QualiÔnibus (WRI Brasil, 2020), Informação e atendimento ao cliente são alguns dos pontos que trazem qualidade ao sistema. Assim, junto de outras ações de melhoramento do TC, implementar campanhas de *marketing* para mostrar essas ações têm potencial de trazer clientes para o sistema (e portanto, aumentar a demanda e reduzir emissões *per capita*). Foi demonstrado que o nível de qualidade do transporte público tem relação com a propriedade de automóvel (Holmgren, 2020), evidenciando este potencial. É possível que a própria prefeitura absorva essa atividade em seus meios de divulgação, mas incluir a necessidade de campanhas permanentes como parte do contrato de concessão pode dar mais agilidade ao processo. O estudo de qual a conversão das ações de marketing em novos clientes do sistema, e posterior cálculo de redução de emissões, não foi realizado para este trabalho e portanto essa possível cláusula não será avaliada de forma quantitativa.

- **Níveis mínimos de utilização de biocombustíveis**

A grande fertilidade da terra, e a facilidade em plantar cana-de-açúcar são alguns dos fatores que posicionam o Brasil em uma condição única globalmente para ser um pólo de produção e pesquisas em biocombustíveis, como o etanol e o biodiesel. Atualmente, há obrigatoriedade de incluir pelo menos 12% de biodiesel no petrodiesel (diesel fóssil) utilizado em caminhões e ônibus, o que é muito benéfico ambientalmente e para o crescimento desta indústria, além de evitar importações de combustíveis fósseis estrangeiros. Esta medida resulta no diesel convencional ser chamado de B12. É previsto que esse percentual aumente para 14% em março de 2024 (B14), e alcance o chamado

B15 (15% de biodiesel no petrodiesel) até 2025 (MME, 2023). Este aumento de 2% na taxa de biodiesel presente no petrodiesel, prevista para 2024, levará a uma redução de emissões de 5 milhões de toneladas de CO₂, segundo o Ministério de Minas e Energia.

Existem também outras formulações de biodiesel, com o número após o B indicando a porcentagem em volume de biodiesel usado. Dessa forma, o combustível B100 é composto por biodiesel puro, e é apontado como um dos mais sustentáveis, ainda que seu uso leve a maiores emissões de NO_x. Segundo Mukhopadhyay e Chakraborty (2021), em um estudo sobre biodiesel derivado de óleo de palma, o B100 apresenta emissões totais de GEE em média 26,4% inferiores às emissões advindas do B10. São necessários estudos mais específicos para o contexto brasileiro, que se utiliza mais de cana-de-açúcar e soja, e comparar o B15 com B100 pode levar a resultados mais precisos sobre a redução de emissões da substituição total dos combustíveis por biodiesel puro no país. Também cabe ressaltar que é preciso integrar as políticas de biocombustíveis com políticas agrícolas para evitar outros impactos ambientais, especialmente relacionados ao uso da terra e de recursos naturais, bem como potenciais problemáticas com pesticidas (Lecksiwilai, 2020). Além disso, há um custo em adequar os veículos existentes a esse combustível, que é bastante mais viscoso que o petrodiesel e pode causar entupimentos devido à sedimentação em peças internas do motor. Atualmente, é considerado que o uso de até 20% de biodiesel no petrodiesel (B20) é totalmente seguro para os motores atuais, sem adaptações.

Para este trabalho, usou-se uma regra proporcional para calcular a redução de emissões do B100 em relação ao B14, a ser usado por todos os veículos a diesel no Brasil a partir de 2024, chegando ao valor de emissões totais de GEE aproximadamente 25,2% menores para o B100. Este será o valor usado para a etapa quantitativa.

- **Presença de dispositivos de retorno ao motorista**

Alguns dispositivos, como indicadores de mudança de marcha e de consumo de combustível, podem ser instalados nos ônibus de forma barata e gerar grande impacto no trabalho do motorista, incluindo um *feedback* instantâneo à forma que dirige o veículo. Outros dispositivos, como monitores de pressão nos pneus, podem ser valiosos ao informar imediatamente ao motorista caso haja algum problema, aumentando a segurança do veículo. Como visto anteriormente, os indicadores de consumo de combustível têm grande potencial de auxiliar na execução de técnicas de direção sustentável. Indicadores de mudança de marcha precisos também podem contribuir na diminuição de emissões. Um estudo por Yum et al. (2013) fez testes com motoristas em rotas reais de TC e encontrou uma diminuição média de 15,3% nas emissões de GEE após a implantação de indicadores de troca de marcha (ainda que tenha sido observado também um aumento de 10% no tempo de operação das linhas, devido a uma troca de marcha mais rápida no momento da aceleração, fazendo com o que o veículo demore mais para ganhar velocidade).

É discutível se a adoção deste item é benéfica no cenário global, considerando que o aspecto da Rapidez é relacionado com a satisfação dos clientes (WRI Brasil, 2020) e que um maior número de clientes diminui as emissões per capita. Apesar disso, se adotada em conjunto com outras medidas que contribuam para a rapidez do sistema (como a implantação de pré-pagamento no PED, otimização das rotas e uso de corredores e faixas exclusivas), esta medida tem potencial grande de redução de emissões. Nos editais de concessão, pode-se incluir este como um critério obrigatório a ser implementado pela(s) concessionária(s), e as instruções para seu uso correto podem fazer parte de treinamentos de direção sustentável.

- **Renovação da frota segundo os parâmetros estabelecidos pelo PROCONVE P-8**

Está vigente no Brasil a Resolução 490 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (BRASIL, 2018a), que estabelece a fase PROCONVE P-8 do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores. O programa exige que veículos novos atendam a uma série de requisitos ambientais, alinhados com a exigência europeia conhecida como Euro VI. Isso inclui redução nas emissões máximas de particulado, NO_x e monóxido de carbono (CO), além de exigir para certificação que os testes sejam realizados em operações reais. Para isto, são usados equipamentos como Recirculador de Gases de Escape (EGR, na sigla em inglês), Catalisador de Oxidação do Diesel (DOC, na sigla em inglês), DPF, SCR (já usado desde o Proconve P-7, fase anterior do Programa) e Catalisador da Combinação de Amônia (ASC, na sigla em inglês). Os veículos após adaptados às novas exigências passam a custar entre 15 e 20% a mais que quando comparados com os veículos equivalentes habilitados para o PROCONVE P-7, mas têm emissões poluentes locais muito menores.

Foram utilizados parâmetros de *Global Warming Potential* de 100 anos - GWP100 (ou seja, o quanto cada gás contribui em 100 anos para o aquecimento global, quando comparado ao gás carbônico) para converter os limites de vários gases em CO₂ equivalente (CO₂eq), segundo informações do modelo Roadmap v2.3 (ICCT, 2023). Há outros materiais que contribuem para o efeito estufa por um breve período após sua emissão, os chamados forçantes climáticos (carbono preto e carbono orgânico - BC e OC, respectivamente, nas siglas em inglês), que não foram considerados.

NMHC se refere aos hidrocarbonetos não-metânicos, ou seja, a soma de todos os hidrocarbonetos exceto o metano. Para estes, foi calculado o GWP100 a partir do trabalho de Hodnebrog et al. (2017), somando os GWP100

encontrados pelos autores para etano, propano e butano (respectivamente, 10.2, 9.5 e 6.5), e acrescentando a parcela de oxidação dos NMHC's a CO₂ para cada um deles. Esta parcela, de 3.67 GWP-100 (Fry et al. apud Hodnebrog, p. 3, 2017), se soma a cada um dos valores para atingir a soma de GWP-100 = 37,21. A tabela 1 abaixo resume o GWP destes gases.

Tabela 1 - Global Warming Potencial de gases selecionados

GÁS	GWP-100
Metano - CH ₄	28,5
NMHC	37,21

Fonte: Autor (2024)

Na Tabela 2, verifica-se os limites de emissão de GEE dos veículos por fase do PROCONVE. Não foi incluída a fase P-6, pois devido a dificuldades no abastecimento do mercado brasileiro com diesel de baixo teor de enxofre, ela foi cancelada. As fases P-4 e anteriores não foram incluídas pois os veículos que obedeciam os padrões impostos por elas já têm pelo menos 18 anos de idade, bastante acima do que as cidades brasileiras consideram o máximo para seguir em operação. Para cada gás, é apresentado o limite, e posteriormente convertido para CO₂ equivalente utilizando os valores da Tabela 1. A última coluna apresenta a soma do CO₂eq de todos os gases.

Tabela 2 - limites de GEE por fase do PROCONVE

Fase PROCONVE	Fase EURO	Limite CH ₄ (g/kWh)	CH ₄ em CO ₂ eq (g/kWh)	Limite NMHC (g/kWh)	NMHC em CO ₂ eq (g/kWh)	CO ₂ eq total (g/kWh)
P-5 (2006)	Euro III (2000)	1,6	45,600	0,78	29,024	74,624
P-7 (2012)	Euro V (2008)	1,1	31,350	0,55	20,465	51,815

Fase PROCONVE	Fase EURO	Limite CH ₄ (g/kWh)	CH ₄ em CO ₂ eq (g/kWh)	Limite NMHC (g/kWh)	NMHC em CO ₂ eq (g/kWh)	CO ₂ eq total (g/kWh)
P-8 (2023)	Euro VI (2014)	0,75	21,375	0,24	8,930	30,305

Fonte: adaptado de Transport Policy (2021)

A partir dos valores acima, é possível calcular a redução de GEE total por fase do Programa dividindo o valor de CO₂eq do P-8 pelos valores das demais fases, e subtraindo o resultado de 1. Desta forma, tem-se uma redução de **41,51%** em emissões de GEE substituindo ônibus da fase P-7 pela fase P-8, e uma redução de **59,34%** substituindo ônibus da fase P-5 pela fase P-8.

- **Vistoria de fumaça preta nos veículos**

A presença de fumaça preta no escapamento dos veículos indica que a combustão dentro do motor foi incompleta, causando a liberação de alta densidade de material particulado. Isso indica a necessidade de regulagem no motor, e pode facilmente ser verificado em vistorias de rotina na frota com o uso de uma Escala de Ringelmann (Martelli, 2022). É estimado que, no ano 2000, foram emitidas no mundo entre 780 mil e 840 mil toneladas de fumaça preta por parte de motores a diesel em carros, caminhões e ônibus. Segundo dados privados disponibilizados pelo WRI Brasil referentes ao ano de 2023, apenas 6 entre 28 grandes cidades brasileiras² executam a vistoria. Iniciativas de dessulfurização (remoção de enxofre) do diesel e uso de biodiesel são fundamentais nesse aspecto, podendo diminuir muito a quantidade de fumaça preta liberada.

² O instituto de pesquisas WRI Brasil organiza um grupo de cidades brasileiras chamado Grupo de Benchmarking QualiÔnibus, incluindo muitas capitais e algumas cidades de menor porte. Os membros coletam anualmente Indicadores da Qualidade. Estes dados não são públicos, mas foram disponibilizados para a realização deste trabalho. Mais informações sobre o Grupo estão disponíveis em <https://www.wribrasil.org.br/projetos/grupo-de-benchmarking-qualionibus>

5.2 Escolha das metas para análise quantitativa

Todas as metas para as quais se verificou na literatura a quantificação da redução de GEE foram escolhidas para integrar a Análise de Sensibilidade, e estão marcadas em verde na Tabela 3 abaixo. Outros critérios, não utilizados neste trabalho, seriam a facilidade de implantação e o investimento inicial.

Tabela 3 - resumo das metas, critérios e cláusulas

Meta, critério ou cláusula	Possibilidade de redução de GEE
Software para otimização de rotas	-7% ³
Eficiência mínima dos motores	Não calculada
Eco-driving	-8,7% ⁴
Eletrificação da frota	-64,7% para elétricos; -23,9% para híbridos ⁵
Integração e dados	Não calculada
Idade média máxima da frota	Não calculada
Mecanismos de mitigação de emissões	Não calculada
Marketing	Não calculada
Biocombustíveis	-25,2% para B100 ⁶
Dispositivos de retorno ao motorista	-15,3% para indicadores de troca de marcha ⁷
Renovação da frota (PROCONVE P-8)	-41,51% para P-7; -59,34% para P-5 ⁸
Vistoria de fumaça preta nos veículos	Não calculada

³ Moura (2022)

⁴ Inferido pelo autor a partir de Zarkadoula et al. (2007) e Barkenbus (2010)

⁵ Da Silva e De Mendonça (2020)

⁶ Inferido pelo autor a partir do estudo de Mukhopadhyay e Chakraborty (2021), conforme explicitado na seção 5.1 deste trabalho

⁷ Yum et al. (2013)

⁸ Inferido pelo autor a partir dos trabalhos de BRASIL, Ministério do Meio-Ambiente (2018a), (Fry et al. (2021), ICCT (2023), Hodnebrog et al. (2017), e Transport Policy (2024), conforme explicado na seção 5.1 deste trabalho

Fonte: Autor (2024)

5.3 Definição de cenários e apresentação dos resultados

As metas foram agrupadas nos cenários apresentados na Tabela 4, abaixo.

Tabela 4 - cenários de adoção de metas

Cenário	Nome
1	Eletrificação imediata
2	Eletrificação em 5 anos (20% da frota por ano), sem uso de B100
3	Eletrificação em 5 anos (20% da frota por ano), com uso de B100 na parcela da frota a diesel
4	Hibridização da frota em 5 anos (20% por ano), sem uso de B100
5	Hibridização da frota em 5 anos (20% por ano), com uso de B100 na parcela da frota a diesel
6	Renovação para P-8 em 5 anos (20% por ano), sem uso de B100
7	Renovação para P-8 em 5 anos (20% por ano), com uso de B100

Fonte: Autor (2024)

No caso da eletrificação, aponta-se um desafio relacionado à disponibilidade de energia verde no Brasil, que potencialmente deverá crescer para se adequar a essa demanda, e à disponibilidade de baterias. Baseando-se nas 7 metas possíveis (Software para otimização de rotas, *Eco-driving*, Eletrificação da frota - BEB, Hibridização da frota - HEB, Biocombustíveis - B100, Indicador de troca de marcha e Renovação de frota - P-8), foram elencadas as metas a serem analisadas em cada cenário, marcadas em verde na tabela 5, abaixo.

Tabela 5 - metas por cenário

Cenário	Software rotas	Eco-driving	BEB	HEB	Biodiesel B100	Indicador troca de marcha	Frota P-8
1							
2							
3							
4							
5							
6							
7							

Fonte: Autor (2024)

As frotas das cidades por tipo de motor são dispostas na Tabela 6 abaixo. Os motores referentes às fases P-6 e P-7 do PROCONVE foram agrupados, devido às características similares no que tange à emissão de GEE.

Tabela 6 - frota por tipo de motor nas cidades analisadas

<i>Cidade / tipo de motor</i>	P-5 (Euro III)	P-6 e P-7 (Euro IV e V)	P-8 (Euro VI)	Elétricos	Frota total
Belo Horizonte	0	2450	258	0	2708
Porto Alegre	21	1189	112	0	1322
Salvador	0	1730	20	8	1758

Fonte: Autor (2024)

Para quantificar as emissões de CO₂eq, utilizou-se um consumo de combustível médio de 2,7km/L (ou 0,370L/km) para os veículos a diesel (Mader, 2019). Hulwan & Joshi (2011) apresentam os dados de capacidade calorífica e densidade para o diesel puro (D100) e biodiesel puro (B100). Apesar do diesel vendido no Brasil ter um percentual de biodiesel, serão usados os dados referentes ao D100 como referência. A partir dos dados, é possível converter a capacidade calorífica de kJ/kg para kJ/L, e

então, para kWh/L utilizando o fator de $1\text{kWh} = 3600\text{ kJ}$. Esse cálculo é apresentado na Tabela 7. Esses valores serão comparados com a quilometragem rodada por ano para estimar as emissões.

Tabela 7 - capacidade calorífica e densidade de D100 e B100

Combustível	Capacidade calorífica (kJ/kg)	Densidade (kg/L)	Capacidade calorífica (kJ/L)	Capacidade calorífica (kWh/L)
D100	44893	0,8378	37611,3	10,448
B100	38085	0,8969	34158,4	9,488

Fonte: Autor (2024), adaptado de Hulwan & Joshi (2011)

De posse destes dados, é possível estimar a quantidade de CO_2eq emitida por quilômetro rodado, para cada tipo de veículo, na Tabela 8 abaixo. A inclusão da eficiência do motor poderia modificar um pouco a capacidade calorífica real. Para os veículos híbridos (HEB), é levada em conta a redução de 18,8% no consumo de combustível, usando-se portanto um consumo de 2,19km/L, ou 0,457L/km. Para os veículos elétricos, considerou sua emissão como sendo 64,7% menor que os veículos P-6 e P-7. Foi considerado que os veículos de cada fase do PROCONVE emitam exatamente o máximo permitido de cada poluente. Nenhuma das cidades utiliza atualmente o combustível B100, sendo que as três optam pelo diesel fóssil convencional, que representa 12% de biodiesel até março de 2024 (B12), e 14% de biodiesel (B14) a partir desta data.

Tabela 8 - Emissões por tipo de motor

Tipo de motor	CO_2eq (g/kWh)	CO_2eq para D100 (g/L)	CO_2eq para B100 (g/L)	Consumo (L/km)	CO_2eq para D100 (g/km)	CO_2eq para B100 (g/km)
P-5 (Euro III)	74,624	779,672	708,033	0,370	288,478	261,972
P-6 e P-7 (Euro IV e V)	51,815	541,363	491,621	0,370	200,304	181,900

Tipo de motor	CO ₂ eq (g/kWh)	CO ₂ eq para D100 (g/L)	CO ₂ eq para B100 (g/L)	Consumo (L/km)	CO ₂ eq para D100 (g/km)	CO ₂ eq para B100 (g/km)
P-8 (Euro VI)	30,305	316,627	287,534	0,370	117,152	106,388
Híbrido	39,431	411,977	374,123	0,457	188,274	170,974
Elétrico	-	-	-	-	70,707*	70,707*

Fonte: Autor (2024)

*O fator de conversão para calcular as emissões dos veículos elétricos leva em conta o combustível D100.

Montou-se então, um modelo que calcula as mudanças de frota ano após ano, tendo como base a quilometragem percorrida no ano de 2022 em cada uma das cidades, dado cedido pelo WRI Brasil:

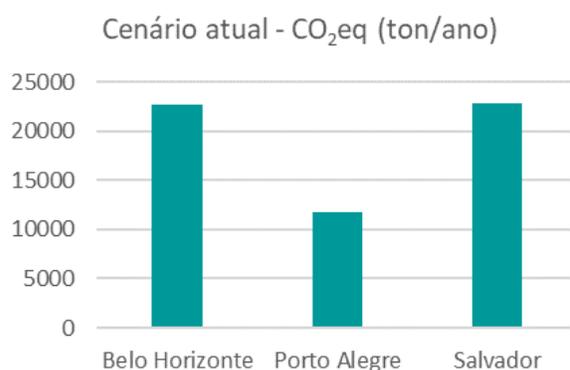
- Belo Horizonte: 118,2 milhões de quilômetros
- Porto Alegre: 60,4 milhões de quilômetros
- Salvador: 115,0 milhões de quilômetros

Considerou-se que a quilometragem é distribuída de maneira proporcional na frota, atribuindo a cada tipo de motor um percentual que representa sua contribuição para a quilometragem naquela cidade, e naquele ano. Este processo foi repetido para cada cenário, adequando os números de frota às metas de eletrificação, hibridização e renovação para o padrão P-8. Multiplicando a parcela da quilometragem pela quilometragem total e pelo fator de gramas de CO₂eq por quilômetro, e dividindo por 1.000.000, tem-se a contribuição de emissões de GEE de cada tipo de motor por cidade por ano, em toneladas.

Para os motores P-5, P-6/P-7, P-8 e híbridos em todos cenários exceto o primeiro, foi aplicada na conta uma diminuição de 24% devido à adoção de técnicas de *eco-driving* (-8,7%) e indicadores de troca de marcha (-15,3%). É possível que essas duas reduções sejam sobrepostas, e não somadas como foi considerado para este

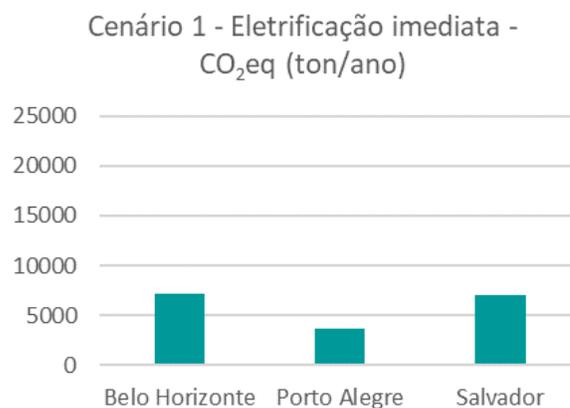
trabalho. O benefício devido à adoção de otimização de rotas (-7%) foi aplicado a todos os valores calculados. A Figura 4, abaixo, mostra a grande diminuição de emissões do Cenário 1 (eletrificação imediata) e pode ser comparada diretamente com a Figura 3, que representa as emissões no Cenário atual, com as frotas existentes de cada cidade.

Figura 3 - Cenário atual



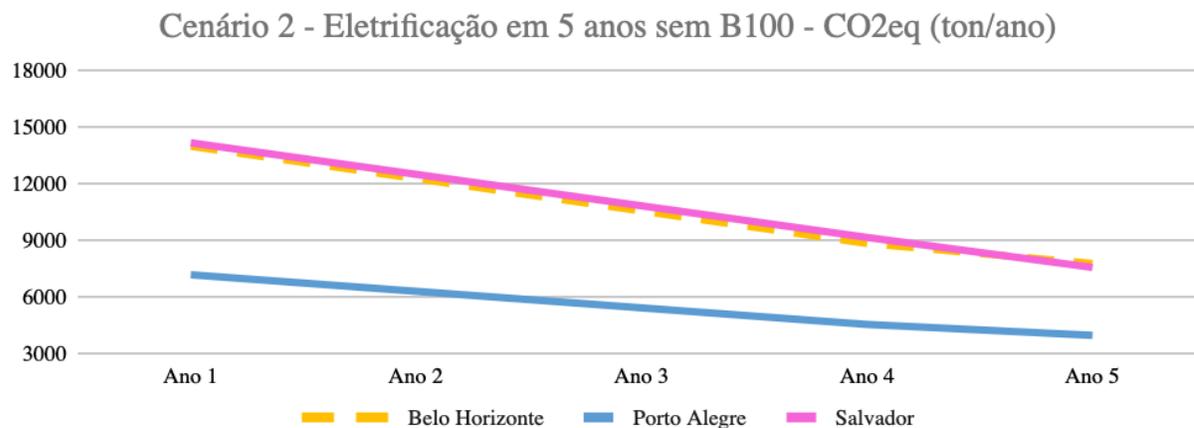
Fonte: Autor (2024)

Figura 4 - Cenário 1

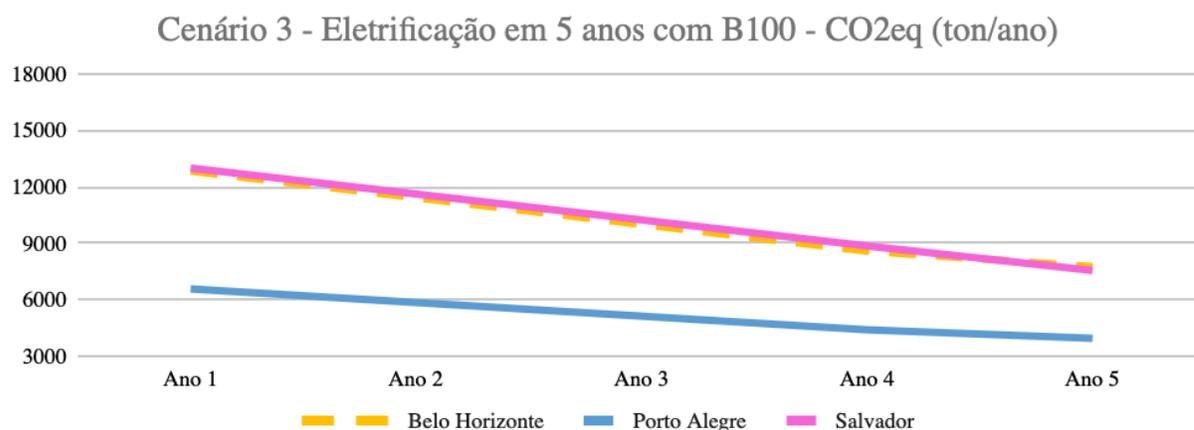


Fonte: Autor (2024)

A seguir, são apresentados os demais cenários. Nas Figuras 5 e 6, representando os cenários 2 e 3, nota-se a redução de emissões de GEE no caso da eletrificação de toda a frota em 5 anos, respectivamente sem utilizar o biodiesel puro B100 na parcela da frota que roda a diesel, e utilizando-no.

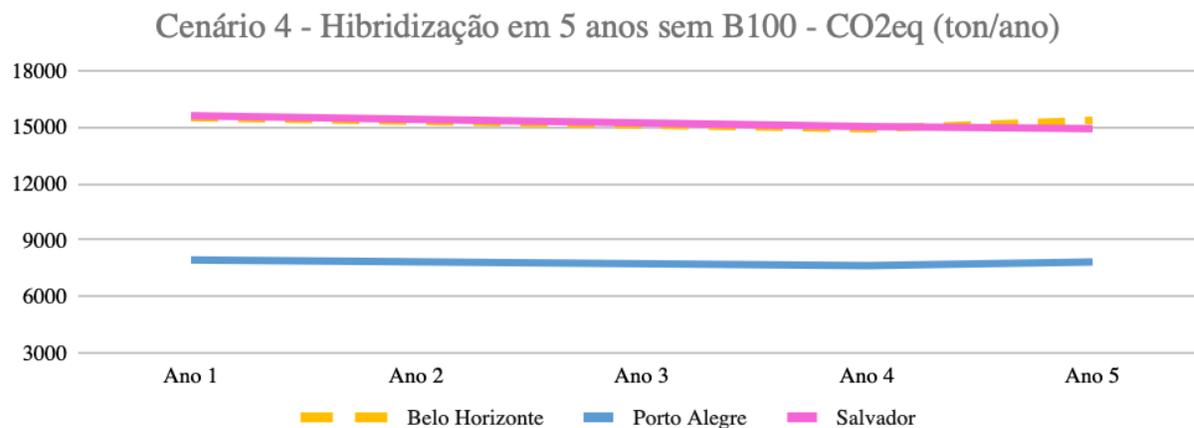
Figura 5 - Cenário 2

Fonte: Autor (2024)

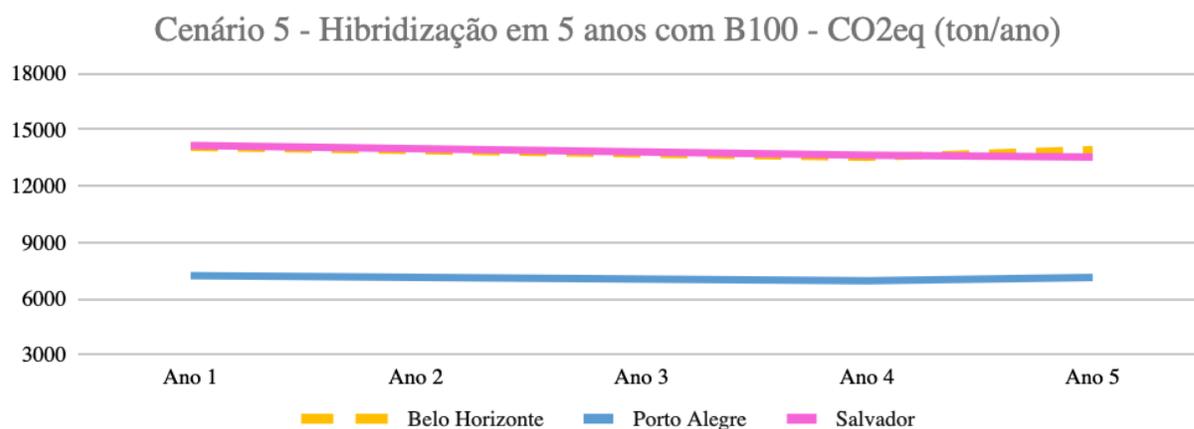
Figura 6 - Cenário 3

Fonte: Autor (2024)

Abaixo, nas Figuras 7 e 8, são apresentados os cenários de hibridização da frota, sem o uso de biodiesel puro B100 (cenário 4) e com o uso de biodiesel puro (cenário 5).

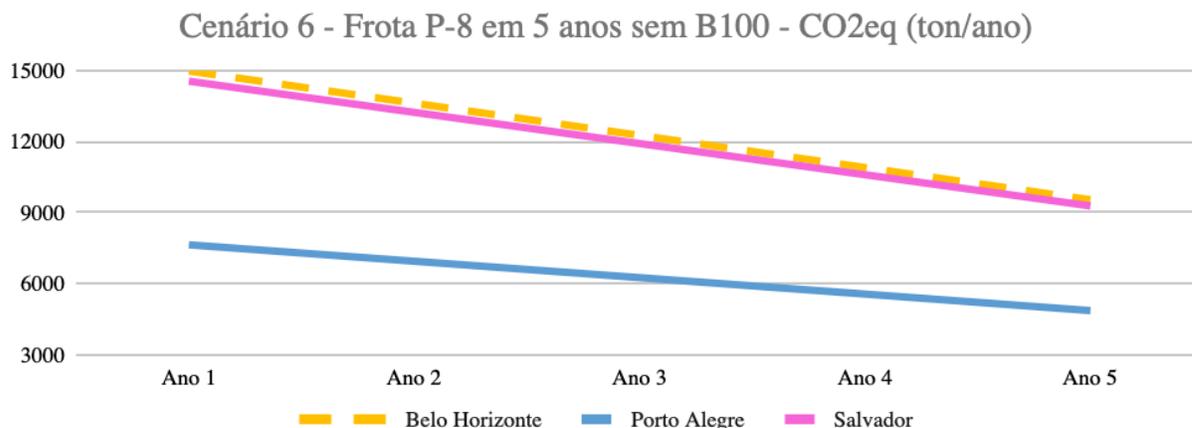
Figura 7 - Cenário 4

Fonte: Autor (2024)

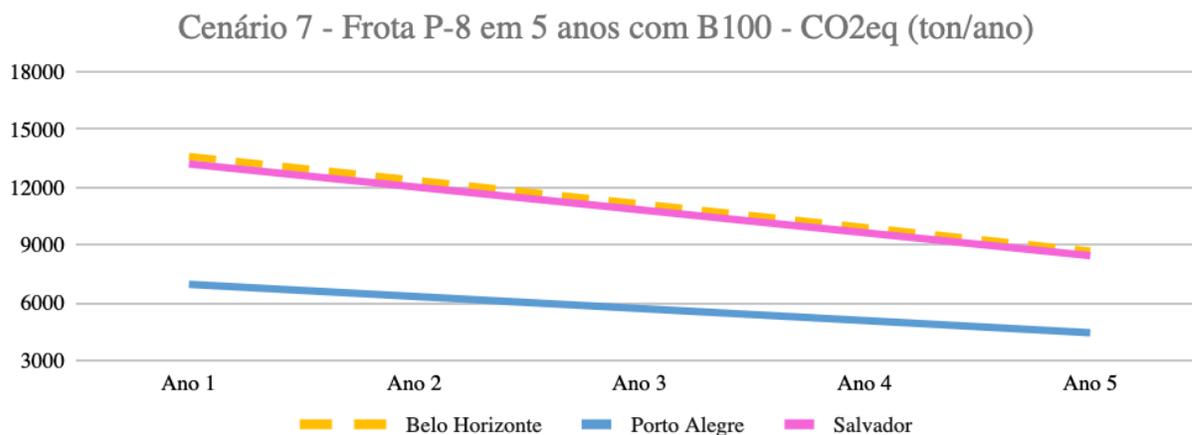
Figura 8 - Cenário 5

Fonte: Autor (2024)

Os últimos cenários, 5 e 6, são apresentados nas Figuras 9 e 10 abaixo e tratam da renovação de toda a frota para se adequar às normas P-8 do PROCONVE, substituindo 20% da frota por ano.

Figura 9 - Cenário 6

Fonte: Autor (2024)

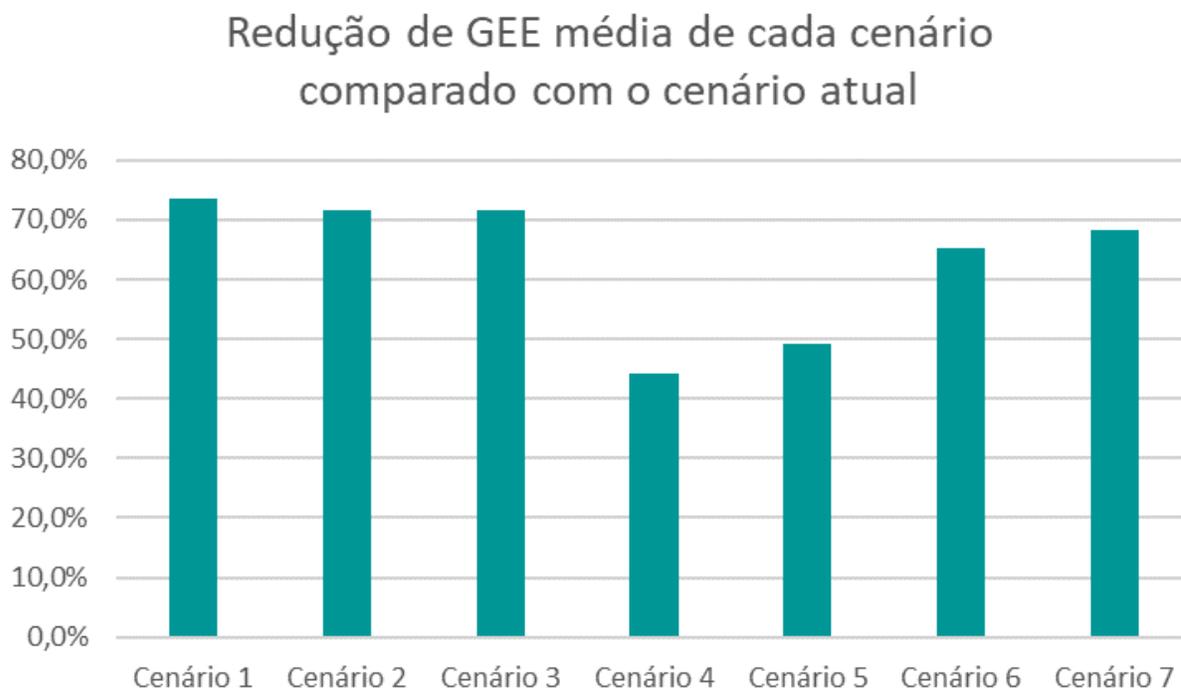
Figura 10 - Cenário 7

Fonte: Autor (2024)

Percebe-se que os cenários de eletrificação (1, 2 e 3) tiveram as maiores reduções de emissões quando comparados com o cenário atual, seguidos pelos cenários 6 e 7, que tratam da renovação da frota para veículos adequados ao PROCONVE P-8. Os cenários 4 e 5, que tratam da hibridização da frota, observaram grande redução nas emissões, mas bastante inferior aos demais, como se observa na Figura 10, abaixo. Muito provavelmente isso se deu pois os veículos híbridos que foram usados como fonte para os dados eram comparáveis ao PROCONVE P-6. Espera-se

que veículos HEB mais modernos tenham desempenho mais parecido com os demais cenários, podendo esta ser uma opção para o aprofundamento futuro deste estudo. Na Figura 11 abaixo, calculou-se a redução média de cada cenário para as três cidades.

Figura 11 - Redução de GEE média de cada cenário comparado com o cenário atual



6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

A partir do estudo realizado acima, fica evidente a grande importância de se inserir o tema da potencial redução de emissões de GEE através de metas em contratos de concessão, especialmente nos âmbitos acadêmico e do poder público. Este trabalho buscou estudar algumas das metas possíveis, bem como sua aplicação, e quantificar sua externalidade ambiental positiva. Assim, foram identificadas doze medidas com potencial para serem incluídas em contratos na forma de metas, critérios ou cláusulas, todas com repercussões em termos de emissão de GEE. Das doze, seis puderam ser quantificadas e levar a um estudo de caso em três cidades brasileiras, como forma de demonstrar o enorme impacto possível dessas medidas.

6.1 Potencial de redução de emissões das metas citadas

Com base nos resultados encontrados, é possível afirmar que há grande possibilidade de redução de emissões de GEE no transporte coletivo por ônibus a partir de contratos de concessão, servindo esta como ferramenta para adaptação do setor às mudanças climáticas. Caso as medidas sugeridas sejam postas em prática, foi identificado uma possível redução de emissões entre 44% e 74% quando comparado com as emissões atuais dos sistemas de transporte coletivo analisados. Essa grande redução pode se dar simplesmente através do uso de ferramentas já existentes, como os editais de concessão, e levaria a um alinhamento com as diretrizes e objetivos da legislação vigente, inclusive o Plano Nacional de Mudanças Climáticas, além de contribuir para metas locais, regionais e nacionais de emissões. Isto leva à forte recomendação para o poder público analisar estas questões em caráter de urgência, a fim de diminuir sua pegada carbônica e aproximar-se das metas estabelecidas.

6.2 Limitações e recomendações

Algumas das limitações deste trabalho devem ser citadas, como o escopo focado apenas em sistemas de TC por ônibus em cidades brasileiras, e delimitado à

redução de emissão de GEE. A aferição da eficiência dos motores é um fator que poderia levar a uma maior precisão nos resultados. A maior parte das medidas consideradas também trazem diminuição de emissão de gases de efeito local, com grande repercussão para a saúde coletiva nas cidades. Não foram analisadas outras ações ambientalmente positivas, como proteção à contaminação do solo devido a potenciais vazamentos dos motores, ou que beneficiariam o transporte coletivo, como os níveis de ruído e a integração das paradas de ônibus à paisagem urbana.

A falta de dados sobre o estado atual das modelagens da licitação do TC e formas de operação limita a análise do cenário nacional como um todo. Não se sabe, por exemplo, quantos sistemas de ônibus no Brasil são operados de forma direta pela prefeitura, quantos são licitados usando contratos de concessão e quantos são licitados em formas precárias como autorização e permissão. Os estudos usados como base para quantificar a redução de emissão de GEE de cada medida ainda são esparsos e, em alguns casos, pouco precisos. É necessário ampliar estes estudos, de forma a entender melhor qual a contribuição potencial de cada medida, estabelecendo Análises de Ciclo de Vida (ACV) como padrão-ouro de averiguações de emissões, pois levam em conta toda a vida útil dos produtos e serviços, não apenas sua contribuição ao fim-de-túnel. Isto possibilitará também que comparações como as feitas por este trabalho levem a resultados de maior precisão. Por fim, o custo financeiro, a análise custo-benefício e análise de facilidade de implantação no ambiente político de cada medida são lacunas desta investigação, que podem ser preenchidas por estudos posteriores.

Algumas iniciativas com potencial de reduzir emissões de GEE não foram tratadas neste trabalho por serem tradicionalmente, no contexto brasileiro, ligadas a ações do próprio poder público, que não são delegadas a operadores privados. Por exemplo, o uso de tecnologias inovadoras nos semáforos leva à priorização do transporte coletivo (e portanto, menos emissões) e sistemas de alerta de semáforo dentro dos veículos permitem que o motorista inicie a frenagem antes mesmo de enxergar o semáforo, tornando a operação mais eficiente e potencialmente mais

confortável. Outra medida com grande potencial de reduzir emissões é a implantação de corredores e faixas exclusivas de ônibus, que permitem manter uma velocidade operacional mais constante e diminuem os tempos de viagem.

Para trabalhos posteriores, há muitas possibilidades de aprofundamento, como a verificação de qual impacto estes resultados têm em metas internacionais, nacionais, regionais e locais de emissões, e o impacto financeiro e no sistema de saúde. No âmbito dos sistemas de TC, há inovações cujo potencial ambiental ainda pode ser melhor explorado, como sistemas sob demanda (DRT - *demand responsive transport*), e o uso de veículos movidos a hidrogênio verde (H₂V).

REFERÊNCIAS

ARRUDA, Danilo Barbosa; CUNHA, Belinda Pereira da Cunha; MILIOLI, Geraldo. Crise ambiental e sociedade de risco: o paradigma das alterações climáticas diante do direito ambiental e da sustentabilidade. **Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza** 4, p. 15, 2020.

ARTAXO, Paulo. As três emergências que nossa sociedade enfrenta: saúde, biodiversidade e mudanças climáticas. **Estudos Avançados**, v. 34, p. 53-66, 2020.

ARTAXO, Paulo. O estado da qualidade do ar no Brasil. **Working Paper WRI Brasil**, p. 32, 2021.

BARKENBUS, Jack N. Eco-driving: An overlooked climate change initiative. **Energy policy**, v. 38, n. 2, p. 762-769, 2010.

BHAVE, Ajay Gajanan; MISHRA, Ashok; RAGHUWANSHI, Narendra Singh. A combined bottom-up and top-down approach for assessment of climate change adaptation options. **Journal of Hydrology**, v. 518, p. 150-161, 2014.

BLACK, John A.; PAEZ, Antonio; SUTHANAYA, Putu A. Sustainable urban transportation: performance indicators and some analytical approaches. **Journal of urban planning and development**, v. 128, n. 4, p. 184-209, 2002.

BOND, Tami C. et al. Bounding the role of black carbon in the climate system: A scientific assessment. **Journal of geophysical research: Atmospheres**, v. 118, n. 11, p. 5380-5552, 2013.

BRAGA, Izaac Paulo Costa et al. Urban mobility performance indicators: A bibliometric analysis. **Gestão & Produção**, v. 26, 2019.

BRASIL. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal, 1988. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/constituicao/constituicao.htm. Acesso em: 2 de julho de 2019.

BRASIL, Ministério das Cidades, 2024. **Marco Legal do Transporte Público Coletivo**. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/aceso-a-informacao/acoes-e-programas/mobilidade-urbana/marco-legal-do-transporte-publico-coletivo>. Acessado em 06/02/2024

BRASIL, Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações, 2022. **Estimativas anuais de emissões de gases de efeito estufa no Brasil**, 6a ed. Disponível em: <https://www.gov.br/mcti/pt-br/acompanhe-o-mcti/sirene/publicacoes/estimativas-anuais-de-emissoes-gee/arquivos/6a-ed-estimativas-anuais.pdf>. Acessado em 03/02/2024

BRASIL, Ministério de Minas e Energia. Conselho Nacional de Política Energética, **CNPE, Resolução 8**, 2023

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, 1990. **Resolução 003 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/MMA/RE0003-280690.PDF>. Acessado em 04/02/2024

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, 2018a. **Resolução 490 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=767. Acessado em 10/02/2024

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, 2018b. **Resolução 491 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA)**. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=369516>. Acessado em 04/02/2024

BRASIL, Ministério do Meio Ambiente, 2016. **Pretendida Contribuição Nacionalmente Determinada para Consecução do Objetivo da Convenção-quadro das Nações Unidas sobre mudança do clima**. Disponível em: <http://educaclima.mma.gov.br/wp-content/uploads/2019/08/NDC-brasileira-2015-portug-u%C3%AAs.pdf>. Acessado em 17/01/2024.

BRASIL, Palácio do Planalto. **Lei Federal 8987**, 1995. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/LEIS/L8987cons.htm. Acessado em 02/02/2024

BRASIL, Palácio do Planalto. **Lei Federal 12187**, 2009. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2009/lei/l12187.htm. Acessado em 22/02/2024

BRASIL, Palácio do Planalto. **Lei Federal 12587**, 2012. Política Nacional de Mobilidade Urbana. Disponível em https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2011-2014/2012/lei/l12587.htm. Acessado em 01/02/2024

CABRAL, Henrique de Mello. Aspectos de qualidade em concessões do transporte coletivo por ônibus: estudo de caso de Belo Horizonte e Porto Alegre. **Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS**. 2021.

CARDOSO, Carlos Eduardo de Paiva. Análise do transporte coletivo urbano sob a ótica dos riscos e carências sociais. **Pontifícia Universidade Católica de São Paulo, Tese de Doutorado**. 2008.

COSTA, M. da S. Um índice de mobilidade urbana sustentável. **Escola de Engenharia de São Carlos-USP. São Carlos**, 2008.

COSTA, Priscila Bahia; MORAIS NETO, Gregório Coelho de; BERTOLDE, Adelmo Inácio. Urban mobility indexes: a brief review of the literature. **World Conference on Transport Research, Proceedings [...] Shanghai**, p. 10-15, 2017

CRUZ, Elaine Plaster. Sistema de transporte coletivo por ônibus de Porto Alegre: desafios de inseri-lo como um direito social a partir do Edital de Concorrência 1/2015. **Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Trabalho de Conclusão de Especialização**. 2019.

DA SILVA, Camila Padovan; DE MENDONÇA BRASIL, Augusto César. AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE ECONOMIA DE ENERGIA E REDUÇÃO DE EMISSÕES DE CO2 EM UM SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO. **Revista Estudos e Pesquisas em Administração**, v. 4, n. 1, p. 124-141, 2020.

DE ABREU, Mônica Cavalcanti Sá et al. Práticas de gestão ambiental e seus fatores determinantes em empresas de transporte coletivo urbano. **Revista da FAE**, v. 14, n. 2, p. 52-67, 2011.

DOS SANTOS A, Diego Jatobá et al. Mudanças futuras de precipitação e temperatura no Brasil a partir dos níveis de aquecimento global de 1, 5°C, 2°C e 4°C. **Sustainability in Debate - Brasília**, v. 11, n.3, p. 74-90, 2020.

ESPINOSA, Gabriela. **Avaliação do projeto de infraestrutura do BRT no Estado do Rio de Janeiro**. 2022. Tese de Doutorado. PUC-Rio.

FERREIRA, Mariane Sobral Afonso. Uma análise da emissão de poluentes dos modais de transporte urbano brasileiro à luz do metabolismo social. **Universidade Federal de Alagoas, Dissertação de Mestrado**, 2019.

HODNEBROG, Øivind; DALSSØREN, Stig B.; MYHRE, Gunnar. Lifetimes, direct and indirect radiative forcing, and global warming potentials of ethane (C₂H₆), propane (C₃H₈), and butane (C₄H₁₀). **Atmospheric Science Letters**, v. 19, n. 2, p. e804, 2018.

HOLMGREN, Johan. The effect of public transport quality on car ownership—A source of wider benefits?. **Research in Transportation Economics**, v. 83, p. 100957, 2020.

HUANG, Yuhan et al. Eco-driving technology for sustainable road transport: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 93, p. 596-609, 2018.

HULWAN, Dattatray Bapu; JOSHI, Satishchandra V. Performance, emission and combustion characteristic of a multicylinder DI diesel engine running on diesel–ethanol–biodiesel blends of high ethanol content. **Applied Energy**, v. 88, n. 12, p. 5042-5055, 2011.

ICCT - Roadmap model v2.3. 2023. Disponível em: <https://theicct.github.io/roadmap-doc/versions/v2.3/>. Acessado em 10/02/2024

ICLEI Europe - Local Governments for Sustainability. **The Procura+ Manual - A Guide to Implementing Sustainable Public Procurement**, 3rd Edition, 2014.

IEMA - Instituto Energia e Meio ambiente. **Recomendações para a expansão e a continuidade das redes de monitoramento da Qualidade do Ar no Brasil**, 2022. Disponível em https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2022/07/IEMA_policypaper_qualidade_dedoar.pdf. Acessado em 05/04/2024

IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the **Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 2023.

ISLAM, Adrita; LOWNES, Nicholas. When to go electric? A parallel bus fleet replacement study. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 72, p. 299-311, 2019.

ITACARAMBI, Paulo Augusto Oliveira. **A administração da operação dos transportes coletivos por ônibus em São Paulo: pública ou privada?**. 1985. Tese de Doutorado.

JEON, Miyeon Christy; AMEKUDZI, Adjo. Addressing sustainability in transportation systems: definitions, indicators, and metrics. **Journal of infrastructure systems**, v. 11, n. 1, p. 31-50, 2005.

JOSHI, Ameya. Review of vehicle engine efficiency and emissions. **SAE International Journal of Advances and Current Practices in Mobility**, v. 1, n. 2019-01-0314, p. 734-761, 2019.

LECKSIWILAI, Naruetep; GHEEWALA, Shabbir H. Life cycle assessment of biofuels in Thailand: Implications of environmental trade-offs for policy decisions. **Sustainable Production and Consumption**, v. 22, p. 177-185, 2020.

LIDESTAM, Helene; ABRAHAMSSON, Mats. Environmental evaluation of public procurement for bus transports. **Management of Environmental Quality: An International Journal**, v. 21, n. 5, p. 645-658, 2010.

LIDESTAM, Helene. Sustainable bus transports through less detailed contracts. **Renewable energy**, v. 61, p. 141-146, 2014.

LINDAU, Luis Antonio; ALBUQUERQUE, Cristina; PETZHOLD, Guillermo; BARCELOS, Mariana Müller; BLANK, Cynthia. 5 inovações em contratos de concessão para combater a crise do transporte coletivo no Brasil. **WRI Brasil**, 2022. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/5-inovacoes-em-contratos-de-concessao-para-combater-crise-do-transporte-coletivo-no-brasil>. Acessado em 31/01/2024

LUTTENBERGER, Axel; LUTTENBERGER, Lidija Runko. Environmental aspects of public procurement in transport sector. **17th International Conference on Transport Science–ICTS**. 2015.

MADER, Michelle Maruska. **Análise da influência do dióxido de carbono nas emissões de gases e consumo de combustível em ônibus de transporte coletivo da grande Florianópolis**. 2019. Tese de Doutorado.

MARTELLI, Anderson. Mudanças Climáticas devido às ações antropogênicas e as ações realizadas pelo município de Itapira-SP como Medidas Mitigadoras. **UNICIÊNCIAS**, v. 26, n. 1, p. 51-57, 2022.

MOURA, Danton de Moraes Ayres. Otimização do transporte público visando a integração entre zonas central e sul de Porto Alegre utilizando o software de simulação SUMO. **Trabalho de Conclusão de Curso, UFRGS**, 2022.

MUKHOPADHYAY, Punam; CHAKRABORTY, Rajat. LCA of sustainable biodiesel production from fried *Borassus flabellifer* oil in energy-efficient reactors: Impact assessment of multi fuel-additives on pour point, NOx and engine performance. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 44, p. 100994, 2021.

NTU - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos. **Anuário NTU: 2022-2023** - Brasília: NTU, 2023. Disponível em: <https://www.ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638272765778419772.pdf>. Acessado em 02/02/2024

OESCHGER, Giulia; CARROLL, Páraig; CAULFIELD, Brian. Micromobility and public transport integration: The current state of knowledge. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 89, p. 102628, 2020.

OJANEN, Saara. The role of environmental aspects in Finnish Transport Agency's public procurements. **Dissertação de Mestrado, Jyväskylä University School of Business and Economics**, 2019.

POMPERMAYER, Fabiano Mezadre. Novo marco do transporte público coletivo urbano: melhorias para aumentar sua efetividade. **IPEA - Boletim Radar Nº72**, 2023.

POUIKLI, Kleoniki. Towards mandatory Green Public Procurement (GPP) requirements under the EU Green Deal: reconsidering the role of public procurement as an environmental policy tool. In: **ERA Forum**. Berlin/Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2021. p. 699-721.

RICHARDSON, Katherine et al. Earth beyond six of nine planetary boundaries. **Science advances**, v. 9, n. 37, p. eadh2458, 2023.

ROSELL, Jordi. Green public procurement in the public transport sector. **Universitat de Girona, OAP - Documents de Treball**, 2022.

ROSETO, Fredy et al. Real-world fuel efficiency and emissions from an urban diesel bus engine under transient operating conditions. **Applied Energy**, v. 261, p. 114442, 2020.

SANTANA, Lucas Trigueiro. Análise de sensibilidade local e global na avaliação técnico-econômica de usinas fotovoltaicas. 2023.

SANTARÉM, Paíque Duques. Ensaio sobre o incontornável: do ciclo vicioso da tarifa ao ciclo virtuoso da Tarifa Zero. **Journal of Sustainable Urban Mobility**, v. 3, n. 1, p. 21-32, 2023.

SCHEFFER, Ana Paula et al. Índice de mobilidade urbana sustentável: uma contribuição ao método a partir da aplicação na cidade de Passo Fundo. **Universidade de Passo Fundo, Dissertação de mestrado**, 2020.

SELLITTO, Miguel Afonso et al. Tool for environmental performance assessment of city bus transit operations: case studies. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v. 17, p. 1053-1064, 2015.

SILVA, Antônio Néelson Rodrigues da; COSTA, M. da S.; RAMOS, Rui AR. Development and application of I_SUM: an index of sustainable urban mobility. **2010 Transportation Research Board Annual Meeting, Minho University**, 2010.

SILVA, Jacqueline Maria da. O que significa PROCONVE P8/EURO 6? Montadoras explicam adaptação dos caminhões para alcançar os níveis de emissões. **Blog Pé na Estrada**, 2023. Disponível em:

<https://penaestrada.com.br/o-que-significa-proconve-p8-euro-6-montadoras-explicam-a-daptacao-dos-caminhoes-para-alcancar-os-niveis-de-emissoes/>. Acessado em 12/02/2023

SILVEIRA, Evandro Luís Dias da. Exigências ambientais em contratos de concessão pública. 2007.

SINGH, Sanjay Kumar. State transport undertakings in India: Status and issues. **SSRN**, 2022.

SÖNNICHSEN, Sönnich Dahl; CLEMENT, Jesper. Review of green and sustainable public procurement: Towards circular public procurement. **Journal of cleaner production**, v. 245, p. 118901, 2020.

TARTAROTI, Rafael. **Modelos de concessão de transporte coletivo por ônibus: o caso da cidade de São Paulo e suas alternativas**. 2015. Tese de Doutorado.

TIMM, Janaine FG et al. Proposta de inclusão de critérios de compras públicas verdes em um estudo de caso de transporte coletivo em Porto Alegre-RS. **Encontro Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído**, v. 18, n. 1, p. 1-8, 2020.

Transport Policy. Brazil: Heavy-Duty: Emissions. 2021

Disponível em <https://www.transportpolicy.net/standard/brazil-heavy-duty-emissions/>
Acessado em 11/02/2024

TU, Ran et al. Effective and acceptable eco-driving guidance for human-driving vehicles: a review. **International journal of environmental research and public health**, v. 19, n. 12, p. 7310, 2022.

UITP, 2019. Transformando cidades com sistemas BRT (Bus Rapid Transit) - Como integrar o BRT? **Informe VREF, UITP e COE BRT**. Disponível em: https://cms.uitp.org/wp/wp-content/uploads/2020/07/Report-VREF-BRT-UITP-ES_June_last_version_web.pdf. Acessado em 03/02/2024

WRI Brasil. Indicadores de Qualidade QualiÔnibus - Metodologia e Estrutura. 2020

YUM, Siho et al. Improvement of Fuel Economy of a City Bus using Shift Indicator. **Transactions of the Korean Society of Automotive Engineers**, v. 21, n. 5, p. 34-39, 2013.

ZARKADOULA, Maria; ZOIDIS, Grigoris; TRITPOULOU, Efthymia. Training urban bus drivers to promote smart driving: A note on a Greek eco-driving pilot program. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 12, n. 6, p. 449-451, 2007.

ZHENG, Jason et al. Guidelines on developing performance metrics for evaluating transportation sustainability. **Research in Transportation Business & Management**, v. 7, p. 4-13, 2013.