UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

PROJETO DE REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO: UMA ABORDAGEM BASEADA EM OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA INFRAESTRUTURA PRIORITÁRIA E ELETRIFICAÇÃO DE FROTA DE ÔNIBUS

TATIANE BORCHERS

São Carlos
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS
CENTRO DE CIÊNCIAS EXATAS E DE TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA URBANA

PROJETO DE REDE DE TRANSPORTE PÚBLICO URBANO: UMA ABORDAGEM BASEADA EM OTIMIZAÇÃO MULTIOBJETIVO DA INFRAESTRUTURA PRIORITÁRIA E ELETRIFICAÇÃO DE FROTA DE ÔNIBUS

TATIANE BORCHERS

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana da Universidade Federal de São Carlos, como parte dos requisitos para a obtenção do título de Doutora em Engenharia Urbana.

Orientação: Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes

São Carlos
2025

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO CARLOS

Centro de Ciências Exatas e de Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana

Folha de Aprovação

Defesa de Tese de Doutorado da candidata Tatiane Borchers, realizada em 29/10/2025.

Comissão Julgadora:

Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes (UFSCar)

Prof. Dr. Madson Cortes de Almeida (UNICAMP)

Prof. Dr. Ricardo de Andrade Lira Rabelo (UFPI)

Prof. Dr. Danilo Sipoli Sanches (UTFPR)

Prof. Dr. Fábbio Anderson Silva Borges (UESPI)

O Relatório de Defesa assinado pelos membros da Comissão Julgadora encontra-se arquivado junto ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Urbana.

Aos despossuídos.

“que mundo errado que nos separou de nós
eu nunca soube reparar as estações
nessa de cê não poder parar sem sentir ficar pra trás
uma temporada ou mais de desilusões
na luta pra ninguém silenciar nossa voz
voltamos a falar dos sonhos pelas manhãs
a nossa terra fértil foi vencendo o concreto
o nosso reflorestamento erguendo-se em fé e eu
[...]
a guerra que nos reaproximou de nós
é a mesma que me pôs a repensar meus sonhos
o quanto neles era só publicidade?
fazendo acreditar que eram meus próprios planos
medo de fazer meus próprios planos serem
nossos planos mesmo que eu tombe antes de vê-los
agora vendo florescerem
inevitavelmente eu sei que estarei lá
no dia que eles finalmente cheguem
um dia desse eu tava meio cabreiro
sem saber o que pode me acontecer
e não ver o fruto que eu plantei em algum janeiro
mas tive um relampejo de que já estão aí
e a gente pode ser feliz agora mesmo
apesar da batalha, o pente cheio
as tecnologias ancestrais nós temos
pra induzir o sonho dentro de um pesadelo
entre um traçante e outro
dilatar o tempo e imaginar um mundo novo
eu que sou de onde a miséria seca as estações
vi a primavera florescer entre os canhões
e não recuar (lararara rara)
eu que sou de guerra
dei o sangue na missão de regar a terra
se eu tombar vão ser milhões pra multiplicar (lararara rara)
a única luta que se perde é a que se abandona e nós nunca
nunca abandonamos luta / nunca, nunca
hay que endurecer sem nunca sem nunca perder a ternura“
Don L

Agradecimentos

Na sessão de agradecimentos é onde me permito soar humana e com uma voz em primeira pessoa. É onde a pesquisadora vira pessoa, processo tantas vezes negado a nós cientistas. Assim como na dissertação de mestrado, começo agradecendo a mim mesma pela perseverança de continuar a fazer um pouco do doutorado todos os dias ou todas as semanas, mesmo que as condições externas não fossem as mais favoráveis. Foi essa perseverança – apesar dos pesares – que permitiu que o doutorado fosse concluído. Muitas vezes só continuar a fazer alguma coisa já era difícil demais e não ter desistido desse título talvez tenha requerido os maiores esforços que já fiz na vida. Sei que terminar um doutorado não é fácil pra ninguém, mas para algumas pessoas é mais difícil do que para outras. Eu entrei na universidade pública a partir de políticas de cota para estudantes de escola pública e, para pessoas como eu, chegar até aqui era quase inimaginável. Digamos que as políticas de desmantelamento das universidades públicas e da pesquisa brasileiras também não colaboraram muito com o processo. E por causa disso, não foram poucas as vezes que eu senti que não pertencia ali. Todo esse ambiente faz a gente acreditar que o problema está na gente, na nossa história, na nossa falta de capacidade e não na estrutura das universidades em si. É como diz Don L: "uma luta contra o mundo / pra fazer parte do mundo que cê luta contra / [...] eu dez ano atrás, eu tenho saudade / será que eu consigo lembrar daquela fé / no fundo dos olhos de um velho eu? / de um jovem sonhador, eu". Se, por um acaso você que estiver lendo precisar de algum incentivo, gostaria de dizer que muito provavelmente os entraves que você está enfrentando não são culpa sua. Gostaria de deixar essa breve introdução para que quem ler esta tese saiba que a minha história de vida perpassa as escolhas da pesquisadora e para pedir um pouco de parcimônia nos julgamentos, eu fiz o que pude com as condições que me foram dadas. Mas mais importante que isso, é que mesmo tendo havido um esforço descomunal da minha parte, essa conquista não é só minha, ela é fruto da ajuda direta e indireta de muita gente.

Agradeço ao Victor, meu companheiro de tantas aventuras. Obrigada por ter feito tudo que tu conseguiu, mesmo nos momentos mais difíceis. Obrigada por ajudar a desenhar linhas de ônibus, por revisar meus textos e por ser minha fonte de suporte, amor e carinho nas tantas adversidades que aconteceram nesses últimos anos. Obrigada pela compreensão com as infinitas horas de trabalho, pelos fins de semana que não pude estar contigo fazendo

qualquer coisa, queria que esse tempo não nos tivesse sido tomado. Obrigada por fazer ciência comigo e por não desistir de construir o mundo que a gente sonha. Obrigada por dividir a vida, estar ao teu lado me faz uma pessoa melhor e mais feliz. Eu amo nossas conversas e nosso silêncio. Todas as palavras do mundo seriam insuficientes para eu demonstrar o quanto eu te amo e o quanto eu amo nós dois juntos. Obrigada por todo o nosso amor e por me fazer sentir amada todos os dias. Obrigada por me dar esperança de que a vida pode e deve ser muito mais.

Agradeço à minha família, aos meus pais Ademir e Neiva, à minha irmã Juliane e aos meus avós Ernesto (*in memorian*) e Terezinha. Aos meus pais, obrigada por todo o incentivo para que eu e a Juli continuássemos estudando e por todos os esforços e sacrifícios que vocês fizeram por uma vida inteira para que nós pudéssemos seguir nossos sonhos. Eu sei que minhas escolhas de vida não foram muito lineares e que isso preocupa vocês às vezes, espero que o doutorado também acalme um pouco o coração de vocês quanto a isso. Meus trajetos não lineares são mais demorados, mas eles também levam a algum lugar. Juli, obrigada por toda a ajuda, desde me ajudar a segurar a barra enquanto não tinha bolsa de doutorado até os pitacos sobre como eu deveria atualizar os preços por índices de inflação, obrigada por estar aberta a se reconectar e reconstruir. Aos meus avós, obrigada por todo o carinho e incentivo de toda uma vida. Vô, eu nunca vou esquecer que você me disse para não desistir da engenharia, quando eu tava tão perto de terminar, mas não tinha mais forças para continuar. Você tinha razão, era muito pouco o esforço que faltava para terminar e era também uma forma de reconhecimento por todo o esforço que eu tinha feito até ali. Esse momento está registrado como fotografia nas minhas memórias e, ao fazer o doutorado, ele voltou repetidamente à tona. Suas palavras continuaram ecoando nos dias mais difíceis e espero que você esteja orgulhoso, onde quer que você esteja. Sinto saudades todos os dias.

Agradeço aos meus amigos e amigas de agora e de sempre! Tem gente que está na minha vida desde a graduação, tem gente que ficou mais próximo durante o doutorado, tem gente que eu tenho menos contato desde a pandemia, mas saibam que vocês tem todo o meu amor e gratidão, por antes, por agora e pelo que virá. Elisa, Camila, Gustavo, Isabel, Liza, Mavi, Lucas, Diego, Vanessa e todos outros que talvez eu fale com menos frequência, muito obrigada por tudo. Eli, Camila, Liza e Vanessa dividem as dores e as conquistas da engenharia comigo desde a graduação, Bel e Gus desde o intercâmbio, Diego divide as agruras e felicidades da vida acadêmica há muitos anos e Mavi e Lucas foram presentes que a Alemanha me trouxe. Muito obrigada por todos os conselhos, pela compreensão com as minhas ausências e por todo o amor que vocês compartilham comigo.

Agradeço à família de Victor por me acolher tão bem e por serem uma segunda família para mim. Ivan e Luciana, obrigada por tudo, por todo o incentivo, por entenderem nossos sonhos e aceitarem a distância imposta pela realização deles. Alexandre, obrigada

por todas as conversas sobre a vida e sobre as escolhas que a gente faz ao longo dela. A todos os Barbosenses, muito obrigada por todo o carinho.

Agradeço ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Augusto Souza Fernandes, por me dar a liberdade de pesquisar o que eu quisesse mesmo que isso parecesse irrealizável em tão pouco tempo e por me ajudar a voltar pro planeta terra quando eu desisti do irrealizável e voltei pro plano original. Tentar o irrealizável me ajudou a superar muitas cicatrizes pessoais e eu termino o doutorado com uma sensação de satisfação. Muito obrigada por todo o suporte e orientação em todo o caos que aconteceu nesses últimos quatro anos, obrigada por sempre aparecer com uma solução alternativa para todos os problemas no meio do caminho. Sem tua orientação, eu provavelmente teria desistido e esta tese de doutorado não teria sido concluída. Para além do caos, obrigada por me motivar com teu amor e fascínio por fazer ciência.

Besonders danken möchte ich dem Professor Dr.-Ing. Dirk Wittowsky, und all meinen Kollegen vom imobis an der Universität Duisburg-Essen: David, Dorota, Fabia, Jenitta, Johannes, Kai, Katharina, Kerstin, Mohammad, Paula und Yifan! Ich danke euch für den Austausch über Brasilien, China, Deutschland, Indien und den Iran und dafür, dass ihr mir immer ein offenes Ohr für all meine Probleme geschenkt habt. Meine Zeit in Deutschland war wunderbar, weil ich all die Unterstützung von euch bekommen habe.

Agradeço aos professores e professoras que contribuíram com a minha jornada até aqui, em especial a Professora Ana Margarita Larrañaga por me ensinar a fazer pesquisa e ao Professor Fernando Hideki Hirosue por me mostrar como o entusiasmo com o ensino da engenharia pode ser contagiante.

Agradeço ao Gabriel Moyses Bressaglia, por ter feito o código do NSGA-II e por revisar as partes do código do modelo que eu escrevi. Tuas perguntas e dúvidas me ajudaram a organizar melhor o modelo e a ajustar os detalhes dele, muito obrigada!

Agradeço à Deyse Guedes por todo o processo de cura que construímos juntas, por toda a paciência e conforto que recebi de ti diante das situações mais absurdas que a vida fez questão de apresentar nos últimos anos. Obrigada por me ajudar a construir caminhos bonitos mesmo no meio do caos e por me ajudar a transitar o próprio caos.

Agradeço ao Felipe Lobo, professor de alemão, que não apenas me ajudou a aprender uma nova língua, mas me ajudou a aprender a aprender. Talvez para muitos isso seja bobo, mas o processo de formação em engenharia gerou tanta insegurança em mim e em tantas outras pessoas, que não sobrou muita autoestima depois da conclusão da graduação. Com o Felipe, eu vivenciei como um ambiente de aprendizagem pode ser leve mesmo que o objeto de estudo seja complexo e isso não se restringiu apenas ao ambiente que compartilhamos, mas se alastrou pelas outras esferas da vida. Agora me permito errar para aprender e tenho paciência para continuar. Muito obrigada por isso.

Agradeço aos meus amores felinos, Lobo e Nyx, por me fazerem companhia infinita nas longas noites em que fiquei fazendo o doutorado, por todo o aconchego e amor que vocês me dão.

Agradeço aos que lutam comigo por um outro mundo, por me ensinarem tanto e me fazerem continuar acreditando.

Agradeço a quem contribuiu indiretamente com esta tese, ao trabalho de inúmeras pessoas que vieram antes de mim – que sequer conheço – mas que permitiram que eu pudesse construir minhas contribuições ao mundo. Em especial a artistas que embalaram as intermináveis horas de trabalho e a pessoas que desenvolveram e lutaram pela construção de software livre, por me inspirarem a seguir por esse caminho também.

Agradeço ao Deutscher Akademischer Austauschdienst (DAAD) pelo financiamento recebido para realização de parte da pesquisa de doutorado na Universidade de Duisburg-Essen [Grant Number 57645446]. Muito além da experiência de pesquisa, intercâmbios acadêmicos e institucionais também são intercâmbios culturais e de perspectivas, além de encontros que perduram para além da nossa vida como cientistas. O período de intercâmbio na Alemanha certamente contribuiu para que esta tese tivesse um ganho de qualidade nos resultados finais.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Acho que esse parágrafo tem um tom um pouco distinto dos demais, mas é algo que está entalado na minha garganta tem anos. No primeiro e no último ano do doutorado – não só, mas principalmente – eu trabalhei muitas horas a mais do que uma jornada de trabalho regulamentada por leis trabalhistas. Foram de dez a dezesseis horas de trabalho por dia, sem fins de semana, para que essa tese fosse produzida e escrita. Tenho certeza de que não sou a única. Se somos obrigados a fazer isso para que consigamos entregar o que se espera como trabalho de doutorado é porque há alguma coisa errada: ou com o nível de exigência em relação ao que produzimos ou em relação ao tempo que temos para produzir essas exigências. Somos constantemente desumanizados – tratados como produtos que produzem produtos – e pressionados a normalizar essas jornadas de trabalho absurdas com uma remuneração pífia, sempre com a promessa de que no próximo nível receberemos as recompensas pelo nosso esforço. A verdade é que recompensa tem pouca e esgotamento tem sobrando. O excremento de quadrúpedes é, em geral, mais valorizado que cientistas no Brasil. Isso se reflete nas estruturas de financiamento federais, nos desdobramentos desse financiamento nas universidades e nos programas de pós-graduação e graduação. O ambiente acadêmico não possui o ar mais respirável do mundo, é impregnado por suas artimanhas, picuinhas, trapaças e lambeções em lugares não citáveis em uma tese. Muito me surpreende, dado esse cenário, a incrível persistência e resiliência que observei ao

encontrar jovens cientistas, uma paixão pela ciência que sequer esse ambiente fétido é capaz de abalar. É meu mais profundo desejo que não precisemos mais passar por tamanhas humilhações ao exercer nosso trabalho e contribuir para o avanço científico de nosso país e do mundo; nos momentos que expresso isso, geralmente sou chamada de utópica, mas acredito piamente que há de chegar o dia em que a ciência brasileira vai superar os tapinhas nas costas e os sorrisos falsos para se debruçar sobre a enorme tarefa que temos à nossa frente. Quanto a mim, ao me negar a dançar essa dança de cadeiras marcadas, passei por inúmeros episódios que, apesar de me fazerem tremer mais que um cachorro pequeno, não abalaram minha convicção de que ciência pode ser muito mais do que esses seres de visão limitada conseguem conceber. Entretanto, ao mesmo tempo que mantenho minha convicção em continuar fazendo ciência apesar de tudo a que fui submetida durante o processo de doutoramento, é inegável que fui abalada por tais eventos e que a qualidade da tese que aqui apresento é menor do que o projeto que idealizei. Tenham parcimônia ao julgar meu trabalho, foi o melhor que consegui fazer após sucessivas crises de ansiedade desencadeadas por distintos episódios no programa de pós-graduação e na universidade brasileira em que o desenvolvi. Conto também com a sorte de que ninguém lê agradecimentos, então ao mesmo tempo que digo tudo isso e tiro um peso de meu coração, sei que isso não será lido por quase ninguém, exceto alguns poucos que como eu, se divertem ao ler essa sessão que faz de nós cientistas, um pouco mais humanos.

Resumo

No contexto de emergência climática, onde as cidades têm um impacto significativo nas emissões de gases de efeito estufa, o setor de transportes está entre os principais responsáveis tanto pelas emissões como também pelo esgotamento de recursos não renováveis. Esta tese traz uma análise do impacto da inserção de estratégias de sustentabilidade em sistemas de transporte público por ônibus para redução de emissões de dióxido de carbono (CO_2), material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_{x}). Foi elaborada uma modelagem que considera as perspectivas de passageiros, operadores e da comunidade geral dentro do processo de planejamento de sistemas de transporte, ao mesmo tempo que abordava aspectos de sustentabilidade ambiental, econômica e social. Nesse sentido, foi definido um modelo de otimização multiobjetivo para o problema do projeto de rede de transporte público urbano, cujas variáveis de decisão foram a implantação de vias exclusivas para transporte público e a eletrificação das frotas de ônibus. As funções objetivo buscaram minimizar os custos de construção, aquisição, manutenção e operação e as emissões de construção e operação de um sistema de transporte público por ônibus. O modelo da Agência Europeia do Ambiente foi utilizado para a formulação do modelo de emissões, uma vez que ele leva em consideração a tecnologia e categoria dos veículos e a velocidade de operação, a última sendo parâmetro de ligação entre as duas variáveis de decisão. Para resolver o modelo matemático foi empregada a metaheurística NSGA-II (Algoritmo genético de classificação por não dominância II, do inglês *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*)), sendo este aplicado à cidade de Belo Horizonte - MG. O estudo de caso foi definido a partir de análise qualitativa sobre os princípios e investigação da disponibilidade de dados abertos nas capitais estaduais brasileiras. Os resultados obtidos apontaram que as estratégias propostas são capazes de melhorar a qualidade dos sistemas de transporte público, diminuindo as emissões de CO_2, MP e NO_{x}. A análise dos cenários demonstrou que quando as medidas foram aplicadas conjuntamente, com utilização de recarga noturna e de oportunidade durante o dia, os custos embora elevados trouxeram maiores benefícios ambientais e sociais para passageiros e a comunidade em geral, com reduções de emissões operacionais em relação ao cenário base da ordem de 39,1 a 57,8% para CO_2, de 92,9 a 94,9% para MP e 86,3 a 90,5% para NO_{x}. Como contribuições, buscou-se superar a lacuna de complexidade matemática em relação à complexidade de aplicação, com a utilização de um modelo de emissões dependente da tecnologia, categoria e velocidade de operação dos ônibus e aplicação em uma rede de grande porte.

Palavras-chave: Cidades inteligentes. Emissões de transporte. Mudanças climáticas. Otimização multiobjetivo. Sustentabilidade. Transporte público.

Abstract

In the context of the climate emergency, where cities have a significant impact on greenhouse gas emissions, the transport sector is one of the main contributors to both emissions and the depletion of non-renewable resources. This thesis presents an analysis of the impact of integrating sustainability strategies into bus public transport systems to reduce carbon dioxide (CO_2), particulate matter (PM), and nitrogen oxide (NO_x) emissions. The modelling approach considered the perspectives of passengers, operators, and the community within the transport planning process, while simultaneously addressing environmental, economic, and social sustainability aspects. A multi-objective optimisation model was developed for the Urban Transport Network Design Problem, whose decision variables were the implementation of exclusive bus lanes and the electrification of bus fleets. The objective functions aimed to minimise the construction, acquisition, maintenance, and operation costs, as well as the construction and operational emissions of a bus public transport system. The European Environment Agency's model was used for the emission modelling formulation; it takes into account the technology and category of the vehicles and their operating speed, the latter being a linking parameter between the two decision variables. To solve the mathematical model, the metaheuristic NSGA-II (Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II) was employed, which was applied to the city of Belo Horizonte, Minas Gerais, Brazil. The case study was defined based on a qualitative analysis of principles and an investigation of the availability of open data in Brazilian state capitals. The results indicated that the strategies proposed are capable of improving the quality of public transport systems by reducing CO_2, PM and NO_x emissions. The scenario analysis demonstrated that when the measures were applied jointly, using overnight and opportunity charging during the day, the costs, although high, yielded greater environmental and social benefits for passengers and the community, with reductions in operational emissions compared to the baseline scenario of approximately 39.1 to 57.8% for CO_2, 92.9 to 94.9% for PM, and 86.3 to 90.5% for NO_x. As contributions, this thesis sought to overcome the gap between mathematical complexity and application complexity by using an emission model dependent on bus technology, category, and operating speed, and by applying it to a large-scale network.

Keywords: Climate change. Multi-objective optimisation. Public transportation. Smart cities. Sustainability. Transport emissions.

Lista de figuras

Figura 1 – Visão geral da metodologia proposta. 36
Figura 2 – Tendências globais e regionais das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes. 46
Figura 3 – Emissões de CO_2 per capita em 2023 considerando emissões de queima de combustíveis fósseis e processos industriais, excluindo emissões de mudança de uso do solo. 47
Figura 4 – Emissões de gases de efeito estufa no Brasil de 1990 a 2023 por setor de emissão. 48
Figura 5 – Métodos de otimização clássicos. 73
Figura 6 – Procedimento do NSGA-II. 99
Figura 7 – Exemplo de uma fronteira de Pareto com soluções dominadas e não dominadas. 100
Figura 8 – Cálculo da distância de aglomeração no NSGA-II. 101
Figura 9 – Procedimento de mutação para variáveis binárias. 101
Figura 10 – Panorama de disponibilidade de dados de transporte público por ônibus e implantação de sistemas prioritários. 117
Figura 11 – Panorama de frotas de ônibus com combustíveis alternativos. 118
Figura 12 – Evolução urbana de Belo Horizonte de 1918 a 2018 e localização do município 122
Figura 13 – Rede prioritária de ônibus existente em Belo Horizonte (2024). 130
Figura 14 – Sistema de ônibus existente em Belo Horizonte (2024) 131
Figura 15 – Histograma da extensão das rotas em Belo Horizonte (2024) 133
Figura 16 – Demonstração de ajustes feitos nas rotas do arquivo GTFS na região do cruzamento da Avenida do Contorno com o Viaduto Leste em Belo Horizonte. 134
Figura 17 – Composição da frota de Belo Horizonte (2024) por tecnologia i categoria k. 138
Figura 18 – Distribuição horária de viagens para um dia típico de operação em Belo Horizonte. 144
Figura 19 – Distribuição de velocidades em km/h por intervalo de tempo t obtida a partir dos dados de GTFS de Belo Horizonte com o complemento para QGIS *Trajectools*. 146
Figura 20 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de CO_2. 152
Figura 21 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de MP. 153
Figura 22 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de NO_x. 153

Figura 23 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de CO_2, com ênfase nas taxas de mutação. 154
Figura 24 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de MP, com ênfase nas taxas de mutação. 155
Figura 25 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de NO_x, com ênfase nas taxas de mutação. 156
Figura 26 – Relação entre custo e emissões de CO_2 no horizonte de projeto para o cenário de infraestrutura. 162
Figura 27 – Relação entre custo e emissões de MP no horizonte de projeto para o cenário de infraestrutura. 163
Figura 28 – Relação entre custo e emissões de NO_x no horizonte de projeto para o cenário de infraestrutura. 164
Figura 29 – Distribuição das parcelas de custos no cenário de infraestrutura para cada modelo de poluente. 165
Figura 30 – Extensão de vias exclusivas por tipologia no cenário de infraestrutura para cada modelo de poluente. 165
Figura 31 – Consumo anual de diesel no cenário de infraestrutura para cada modelo de poluente. 166
Figura 32 – Relação entre custo e emissões de CO_2 no horizonte de projeto para o cenário de eletrificação 168
Figura 33 – Relação entre custo e emissões de MP no horizonte de projeto para o cenário de eletrificação. 169
Figura 34 – Relação entre custo e emissões de NO_x no horizonte de projeto para o cenário de eletrificação. 169
Figura 35 – Distribuição das parcelas de custos no cenário de eletrificação para cada modelo de poluente. 170
Figura 36 – Número de rotas eletrificadas no cenário de eletrificação para cada modelo de poluente. 171
Figura 37 – Composição da frota no cenário de eletrificação para cada modelo de poluente. 172
Figura 38 – Consumo anual de diesel e de energia no cenário de eletrificação para cada modelo de poluente. 173
Figura 39 – Relação entre custo e emissões de CO_2 no horizonte de projeto para o cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada. 174
Figura 40 – Proporção de emissões de construção e operação nas emissões de CO_2 no horizonte de projeto para o cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada. 174
Figura 41 – Relação entre custo e emissões de MP no horizonte de projeto para o cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada. 177

Figura 42 – Relação entre custo e emissões de NO_x no horizonte de projeto para o cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada. 179
Figura 43 – Distribuição das parcelas de custos para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada. 181
Figura 44 – Extensão de vias exclusivas para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada. 182
Figura 45 – Número de rotas eletrificadas para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada. 183
Figura 46 – Distribuição da frota por tecnologia e categoria para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada. . . 184
Figura 47 – Consumo anual de diesel para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada. 185
Figura 48 – Relação entre custo e emissões de CO_2 no horizonte de projeto para todos os cenários. 186
Figura 49 – Relação entre custo e emissões de MP no horizonte de projeto para todos os cenários. 186
Figura 50 – Relação entre custo e emissões de NO_x no horizonte de projeto para todos os cenários. 187
Figura 51 – Distribuição da proporção seleção de segmentos viários para implantação de infraestrutura prioritária para transporte público por ônibus. 188
Figura 52 – Proporção de seleção média de segmentos viários para implantação de pistas exclusivas para transporte público por ônibus. 189
Figura 53 – Proporção de seleção média de segmentos viários para implantação de faixas exclusivas para transporte público por ônibus. 189
Figura 54 – Proporção de seleção média de rotas do sistema convencional. 191
Figura 55 – Proporção de seleção média de rotas do sistema MOVE. 192
Figura 56 – Proporção de seleção média de rotas do sistema suplementar. 192

Lista de tabelas

Tabela 1 – Parâmetros do modelo. 89
Tabela 2 – Detalhamento dos parâmetros do arquivo *rede*. 104
Tabela 3 – Detalhamento dos parâmetros do arquivo *rotas*. 104
Tabela 4 – Panorama geral das capitais brasileiras, incluindo instrumentos legislativos e dados de demanda de mobilidade. 111
Tabela 5 – Dados de mobilidade de capitais brasileiras analisados sob a perspectiva dos oito princípios de dados abertos 115
Tabela 6 – Equivalência entre as categorias de ônibus urbanos de São Paulo e do modelo EEA. 137
Tabela 7 – Características dos padrões de veículos da frota de Belo Horizonte. . . 137
Tabela 8 – Equivalência entre as categorias de ônibus urbanos de Belo Horizonte e do modelo EEA. 138
Tabela 9 – Custos unitários de aquisição de ônibus. 139
Tabela 10 – Custos de manutenção por tecnologia i e categoria de veículo k no ano base e no horizonte de projeto. 140
Tabela 11 – Análise de rotas viáveis para eletrificação de acordo com estados de carga da bateria. 141
Tabela 12 – Análise de velocidades médias por tipologia de via prioritária e por intervalo de tempo t. 149
Tabela 13 – Síntese dos resultados de testes de parâmetros do NSGA-II. 157
Tabela 14 – Dados de consumo de diesel, custos e emissões para o ano base (2024). 158
Tabela 15 – Síntese dos resultados do cenário continuidade. 160
Tabela A.1 – Estudos de otimização para planejamento e políticas de transporte sustentável, em ordem cronológica. 225
Tabela A.2 – Tipos de dados de entrada utilizados em estudos de otimização para planejamento de transporte sustentável. 233
Tabela B.1 – Proporção média de seleção de rotas 234

Lista de abreviaturas e siglas

ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANP	Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis
ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BRT	Sistema de ônibus rápido (do inglês *Bus Rapid Transit*)
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CH_4	Metano
CO	Monóxido de carbono
CO_2	Dióxido de carbono
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
CTP	Custo Total de Propriedade (do inglês *TCO, Total Cost Ownership*)
DOC	Catalisadores de oxidação diesel (do inglês *Diesel oxidation catalyst*)
DOT	Desenvolvimento Orientado ao Transporte (do inglês *Transit-Oriented Development* - TOD)
DPF	Filtros de Partículas Diesel (do inglês *Diesel particulate filter*)
EEA	Agência Europeia do Ambiente (do inglês *European Environment Agency*)
EMEP	Programa Europeu de Monitoramento e Avaliação (do inglês *European Monitoring and Evaluation Program*)
EURO V	Fase V do Padrão Europeu de Emissões
EURO VI	Fase VI do Padrão Europeu de Emissões
FGTS	Fundo de Garantia do Tempo de Serviço

GEE	Gases de Efeito Estufa
GPS	Sistema de Posicionamento Global (do inglês *Global Positioning System*)
GTFS	Especificação Geral de Dados para Transporte Público (do inglês *General Transit Feed Specification*)
GWh	Gigawatt-hora
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo
IPCC	Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (do inglês *Intergovernmental Panel on Climate Change*)
IPK	Índice de Passageiros por Quilômetro
IPVA	Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores
km	Quilômetros
kWh	Quilowatt-hora
L	Litro
LAI	Lei de Acesso à Informação
Matriz OD	Matriz Origem-Destino
MCO	Mapa de Controle Operacional
ML	Megalitro
MJ	Megajoule
MP	Material Particulado
$NMHC$	Hidrocarbonetos não metano
NO_2	Dióxido de nitrogênio
NO_x	Óxidos de nitrogênio
NSGA-II	Algoritmo genético de classificação por não dominância II (do inglês *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*)
ODS	Objetivos para o Desenvolvimento Sustentável
OSM	*Open Street Maps*

OMS	Organização Mundial da Saúde
ONU	Organização das Nações Unidas
P7	Fase 7 para veículos pesados do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE)
P8	Fase 8 para veículos pesados do Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE)
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PBH	Prefeitura de Belo Horizonte
Pemob	Pesquisa Nacional de Mobilidade Urbana
Planmob	Plano de Mobilidade Urbana
PNMU	Política Nacional de Mobilidade Urbana
PROCONVE	Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores
PRTPU	Problema do Projeto de Rede de Transporte Público Urbano (sigla em português equivalente ao UTNDP)
PTNDSP	Problema do Projeto e Programação da Rede de Transporte Público (do inglês *Public Transit Network Design and Scheduling Problem*)
$RCHO$	Aldeídos totais
RNDP	Problema de Projeto de Rede Viária (do inglês *Road Network Design Problem*)
SCR	Redução Catalítica Seletiva (do inglês *Selective catalytic reduction*)
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SO_2	Dióxido de enxofre
SoC	Estado de carga da bateria (do inglês *State of Charge*)
tep	Tonelada equivalente de petróleo
TNDP	Problema de Projeto de Rede de Transporte Público (do inglês *Transit Network Design Problem*)
UTNDP	*Urban Transportation Network Design Problem* (sigla em inglês equivalente ao PRTPU)

Sumário

Lista de figuras **17**
Lista de tabelas **21**
Sumário **27**
1 Introdução **31**
1.1 Objetivos 33
1.2 Justificativa e relevância do tema 34
1.3 Delineamento da metodologia 35
1.4 Contribuições 38
1.5 Organização do trabalho 38
2 Referencial Teórico **39**
2.1 Mobilidade e sustentabilidade em cidades inteligentes: como é a cidade do século XXI? 39
2.2 Custos externos dos sistemas de transporte 45
2.3 Redes de transporte sustentáveis 49
2.4 Benefícios dos sistemas de transporte sustentável 50
2.5 Programas de redução de emissões veiculares 52
2.6 Desafios do projeto de redes de transporte público urbano 54
2.6.1 Complexidade do problema 54
2.6.2 Metodologias de planejamento de redes de transporte 55
2.6.3 Modelos de emissões de escapamento em sistemas de transporte . . 57
2.6.4 Disponibilidade de dados e ascensão de políticas de dados abertos . 59
2.6.4.1 Dados em um contexto de cidades inteligentes 59
2.6.4.2 Dados abertos 62
2.6.5 Planejamento responsivo *versus* planejamento indutivo 64
2.7 Técnicas de otimização aplicadas ao projeto de redes de transporte público urbano 65
2.7.1 Parâmetros e dados de entrada 67
2.7.2 Variáveis de decisão 69
2.7.3 Funções objetivo 70
2.7.4 Restrições 71
2.7.5 Métodos de solução 72
2.7.6 Estudos similares ao proposto nesta tese 74
2.8 Apontamentos críticos, lacunas de pesquisa e contribuições ao conhecimento científico 79
3 Caracterização do modelo, modelagem matemática e método de solução . 83

3.1 Modelo matemático . . . 87
3.1.1 Parâmetros . . . 88
3.1.2 Conjuntos e índices . . . 90
3.1.3 Variáveis de decisão . . . 90
3.1.4 Funções objetivo . . . 90
3.1.4.1 Custos . . . 90
3.1.4.2 Emissões atmosféricas . . . 92
3.1.5 Restrições . . . 93
3.1.5.1 Restrição de determinação da velocidade nos segmentos viários . . . 94
3.1.5.2 Restrição de determinação da autonomia das baterias elétricas 94
3.1.5.3 Restrição de determinação da frota a ser adquirida . . . 95
3.1.5.4 Restrição de determinação do número de viagens diárias de cada rota . . . 95
3.1.5.5 Restrições relacionadas ao consumo de combustível e fatores de emissão . . . 96
3.1.5.6 Definição de variáveis binárias e inteiras . . . 98
3.2 Método de solução . . . 98
3.3 Implementação computacional . . . 101
3.4 Análise de desempenho e testes de parâmetros do NSGA-II . . . 105
3.5 Construção de cenários . . . 105
3.6 Contribuições ao conhecimento científico . . . 106
4 Panorama dos sistemas de transporte público nas capitais brasileiras . . . 109
4.1 Disponibilidade de dados abertos relacionados a transporte nas capitais brasileiras . . . 110
4.2 Maturidade de iniciativas de sustentabilidade dos sistemas de transporte público por ônibus . . . 116
4.3 Síntese do capítulo . . . 118
5 Estudo de caso e parametrização do modelo . . . 121
5.1 Belo Horizonte como estudo de caso . . . 121
5.2 Políticas públicas e sistema de transporte público por ônibus de Belo Horizonte 122
5.3 Parametrização e dados de entrada do modelo . . . 125
5.3.1 Conjuntos de dados utilizados . . . 125
5.3.2 Horizonte de projeto . . . 128
5.3.3 Rede viária . . . 129
5.3.4 Rotas . . . 130
5.3.5 Ajuste das rotas de ônibus à rede viária . . . 132
5.3.6 Custos e emissões relacionadas à implantação de vias exclusivas . . . 135
5.3.7 Categorias de veículos k e frota atual por rota (m_{i,k,r,t_0}) . . . 136

5.3.8 Parâmetros relacionados aos veículos . . . 138
5.3.9 Autonomia de baterias . . . 140
5.3.10 Preços de combustível . . . 142
5.3.11 Dias equivalentes de operação anual (N_r^{op}) . . . 143
5.3.12 Intervalos de tempo t . . . 143
5.3.13 Número de viagens realizadas para cada rota em um dia típico . . . 144
5.3.14 Velocidades de operação por segmento viário . . . 144
5.3.15 Incremento potencial de velocidade de operação . . . 148
6 Resultados . . . 151
6.1 Análises de desempenho e testes dos parâmetros do NSGA-II . . . 151
6.2 Cenários de análise . . . 158
6.2.1 Cenário base . . . 158
6.2.2 Cenário de continuidade . . . 160
6.2.3 Cenário de sustentabilidade 1 – infraestrutura . . . 161
6.2.3.1 Emissões de CO_2 no cenário de infraestrutura . . . 162
6.2.3.2 Emissões de MP no cenário de infraestrutura . . . 162
6.2.3.3 Emissões de NO_x no cenário de infraestrutura . . . 163
6.2.3.4 Síntese do cenário . . . 163
6.2.4 Cenário de sustentabilidade 2 – eletrificação . . . 167
6.2.4.1 Emissões de CO_2 no cenário de eletrificação . . . 167
6.2.4.2 Emissões de MP no cenário de eletrificação . . . 168
6.2.4.3 Emissões de NO_x no cenário de eletrificação . . . 168
6.2.4.4 Síntese do cenário . . . 169
6.2.5 Cenário de sustentabilidade 3 – infraestrutura e eletrificação . . . 173
6.2.5.1 Emissões de CO_2 no cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada . . . 173
6.2.5.2 Emissões de MP no cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada . . . 176
6.2.5.3 Emissões de NO_x no cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada . . . 178
6.2.5.4 Síntese do cenário . . . 180
6.2.6 Síntese e comparação entre os cenários . . . 185
6.3 Mapas de proporção de seleção de vias prioritárias . . . 187
6.4 Mapas de proporção de seleção de rotas para eletrificação . . . 190
6.5 Síntese do capítulo . . . 193
7 Conclusões . . . 195
7.1 Limitações do estudo e trabalhos futuros . . . 198

Referências **203**
Appendices **225**
A Apêndice A - Dados da revisão sistemática 225
Appendices **234**
B Apêndice B - Proporção média de seleção de rotas no modelo de otimização 234

Capítulo 1

Introdução

O uso do transporte motorizado individual, além de causar várias externalidades negativas como poluição sonora e atmosférica, congestionamentos e acidentes, também gera desigualdades sociais porque aqueles sem acesso a um veículo particular são muitas vezes prejudicados e possuem menos acesso a oportunidades (Davison; Knowles, 2006; Douglas et al., 2011; Santos; Behrendt; Teytelboym, 2010). Tais externalidades mostram a necessidade de repensar o planejamento urbano e os sistemas de transportes. A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável da Organização das Nações Unidas (item 11.2 do objetivo 11) declara que até 2030 deve-se garantir que os sistemas de transporte sejam seguros, acessíveis, sustentáveis e tenham preço adequado à população. Dessa forma, busca-se melhorar a segurança rodoviária por meio da expansão dos transportes públicos, com atenção às necessidades das pessoas em situação de vulnerabilidade, mulheres, crianças, pessoas com deficiência e idosos (United Nations, 2015).

Com o intuito de diminuir tais externalidades e melhorar a mobilidade urbana nas cidades brasileiras, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (PNMU), regulamentada pela Lei n° 12.587/2012 (BRASIL, 2012), instituiu a prioridade de modos de transporte ativos e motorizados coletivos sobre os modos motorizados individuais. De maneira complementar, em 2015, o direito ao transporte foi acrescentado como um direito social no Art. 6º da Constituição Federal de 1988 (BRASIL, 1988). Entretanto, a maioria das cidades brasileiras teve seu desenvolvimento apoiado e orientado pelo uso do transporte motorizado individual, fazendo-se necessário reorganizar seus espaços urbanos de modo a minimizar os impactos negativos já existentes.

Newman e Kenworthy (Newman; Kenworthy, 1996) associam modelos de formação de cidades com padrões de viagens gerados por eles, mostrando os efeitos de uma cidade desconectada na geração de viagens motorizadas individuais, sendo o espraiamento urbano uma das principais consequências desse modelo de urbanização. Ou seja, o aumento dos índices de motorização permitiu a expansão urbana, incentivando ainda mais o uso

do automóvel devido às limitações de acessibilidade pelo transporte público, sendo este um processo de retroalimentação que gera problemas ambientais, econômicos, sociais e de acesso a serviços e oportunidades (Banister, 2005; Davison; Knowles, 2006; Mehriar; Masoumi; Nosal-Hoy, 2020; Nechyba; Walsh, 2004).

O rápido crescimento da demanda de viagens urbanas nas grandes cidades aumentou a necessidade de meios de transporte que são socialmente benéficos, economicamente justificáveis e ambientalmente amigáveis (Amirgholy; Shahabi; Gao, 2017). Assim, combinar o uso do solo com a política de transporte público pode ajudar a direcionar o crescimento para uma forma urbana mais sustentável (Santos; Behrendt; Teytelboym, 2010). Ademais, concentrar o crescimento ao longo de corredores permite a contenção do espraiamento urbano e contribui para reduzir os impactos da urbanização nas mudanças climáticas e, ao mesmo tempo, aumentar a mobilidade de classes mais desfavorecidas (Cervero; Dai, 2014). Com relação às mudanças climáticas, pode-se dizer que as cidades têm um impacto significativo do ponto de vista das emissões de gases de efeito estufa (GEE), já que a maior parte do tráfego, indústria, comércio e mais de 50% da população mundial está situada em áreas urbanas (United Nations, 2022).

O planejamento urbano, juntamente com o setor de transportes, têm sido setores investigados em termos de benefícios indiretos à saúde pública, os quais estão associados às medidas de redução de emissões de GEE (Alessio et al., 2021; Sarigiannis et al., 2017; Woodcock et al., 2009). Para reduzir ou eliminar as emissões de dióxido de carbono (CO_2) no setor de transportes será necessária uma ampla implementação de políticas de transporte sustentável, que devem partir do pressuposto da integração de diferentes objetivos (econômicos, de saúde e meio ambiente), considerando as necessidades dos diferentes grupos sociais. Além disso, requer-se a integração com políticas de uso do solo, que podem direcionar o desenvolvimento urbano para uma forma que permita que o transporte público, bem como modos ativos, sejam o foco da mobilidade urbana (Aminzadegan et al., 2022; Banister, 2008; Santos; Behrendt; Teytelboym, 2010). Se implantadas tais políticas de redução de emissões de GEE, os principais benefícios são a melhoria da qualidade do ar, a proteção da saúde pública e a mitigação de perdas monetárias (Alessio et al., 2021; Banister, 2008; Sarigiannis et al., 2017).

Ainda, para mitigar os efeitos das mudanças climáticas, são necessários planos de transporte de baixo carbono, incluindo um conjunto de estratégias para: (i) evitar viagens motorizadas desnecessárias de transporte; (ii) mudar as viagens existentes para modos mais eficientes e de baixo carbono, incentivando o uso de transporte público e modos não motorizados; e (iii) melhorar as tecnologias de transporte para reduzir as emissões de GEE, promovendo economia de combustíveis, mobilidade elétrica e utilização de fontes de energia sustentável (Banister, 2005; Banister, 2008; Kenworthy, 2006; Nakamura; Hayashi, 2013; SLOCAT, 2018; Sdoukopoulos et al., 2019; Kraus; Proff, 2021). Entre técnicas e tecnologias

de transporte, os processos de otimização podem ser considerados proeminentes para a construção de cidades mais inteligentes e sustentáveis, uma vez que geram estruturas e formas de cidade que melhoram a eficiência, a equidade e a qualidade de vida (Batty et al., 2012; Ceder, 2021; SLOCAT, 2018).

Considerando o contexto supramencionado, o presente projeto propõe uma metodologia que busca otimizar redes de transporte público, através da priorização viária e hibridização de frotas com a inserção de veículos elétricos, considerando indicadores ambientais, operacionais e sociais.

1.1 Objetivos

O objetivo geral desta pesquisa é a análise do impacto da inserção de estratégias de sustentabilidade em sistemas de transporte público por ônibus para redução de emissões de CO_2, material particulado (MP) e óxidos de nitrogênio (NO_x), de modo a aprimorar a inteligência e a sustentabilidade das cidades brasileiras. Para tal, são propostos os seguintes objetivos específicos:

1) Proposição de um modelo matemático de otimização multiobjetivo, o qual deve incorporar tanto as vias e rotas prioritárias como também aspectos ambientais, econômicos e sociais;
2) Elaboração do modelo matemático proposto utilizando dados abertos de capitais brasileiras;
3) Elaboração de um panorama geral de sistemas de transporte público por ônibus nas capitais brasileiras, bem como da disponibilidade de dados públicos relativos a esses sistemas, visando a discussão da maturidade tanto da inclusão de aspectos sustentáveis nesses sistemas como da produção e disponibilização de dados abertos;
4) Estimativa de benefícios ambientais, econômicos e sociais da implantação de estratégias de mobilidade sustentável;
5) Determinação de vias e rotas para implementação de políticas sustentáveis, sendo estas a prioridade de circulação viária e a eletrificação da rota.

Os objetivos delineados buscam responder as perguntas de pesquisa de quais benefícios que podem ser obtidos a partir da priorização da infraestrutura de circulação de ônibus e da substituição de veículos a diesel por veículos elétricos nas frotas de ônibus urbanos, qual é a ordem de magnitude desses benefícios e se alguma das estratégias de transporte público sustentável deve ser priorizada por apresentar uma resposta mais rápida e consolidada ao contexto de transição energética e emergência climática.

1.2 Justificativa e relevância do tema

A motivação inicial da presente tese partiu do apelo para a construção de cidades mais acessíveis, inteligentes, sustentáveis e energeticamente eficientes, principalmente devido ao atual cenário de emergência climática. A premissa adotada é de que é possível reduzir e mitigar os efeitos adversos do setor de transportes através do planejamento – e futura implementação – de redes de transporte sustentável. Sabendo que a infraestrutura e os sistemas de transportes possuem condição intrínseca e indissociável do ambiente construído e dos modelos de desenvolvimento urbano, um modelo de mobilidade urbana sustentável significa reduzir a necessidade de viajar, reduzir as distâncias por meio de políticas relacionadas ao uso do solo, implementar políticas para a mudança de modo (de carros e motocicletas para modos de transporte ativo e público) e aprimorar a tecnologia para reduzir o impacto do transporte no meio ambiente (Banister, 2005; Banister, 2008; Kenworthy, 2006; Nakamura; Hayashi, 2013; SLOCAT, 2018; Sdoukopoulos et al., 2019; Kraus; Proff, 2021). Além disso, políticas que fomentam o desenvolvimento urbano compacto devem priorizar localidades próximas a estações e corredores de transporte público, de modo que possam ser fornecidos altos níveis de acessibilidade para todos (Banister, 2005; Nechyba; Walsh, 2004).

Portanto, neste contexto, é possível analisar e avaliar os sistemas de transporte urbano a partir de três perspectivas, que devem ser consideradas simultaneamente: (1) dos passageiros; (2) dos operadores; e (3) da comunidade/municipalidade/governo. A perspectiva dos passageiros compreende atender seus interesses, a qual se relaciona a características como conforto, distância e tempo de viagem, por exemplo. Em geral os interesses dos operadores compreendem os custos, investimentos ou lucros dos sistemas, enquanto que a perspectiva da comunidade é mais abrangente e não necessariamente está vinculada com a satisfação imediata dos interesses de passageiros e operadores, mas considera custos ambientais e as externalidades dos sistemas de transporte. De certa forma, essas perspectivas se relacionam com os três aspectos de sustentabilidade (ambiental, econômica e social) e o modelo intercala e interliga essas duas abordagens.

Conforme será apresentado no Capítulo 2, via de regra os estudos de otimização em transportes focam em aspectos operacionais e de produtividade, sendo a proposta inovadora desta pesquisa extrapolar o cenário de análise para o nível da cidade, ou seja, pretende-se utilizar dados operacionais de transporte público para quantificar os benefícios gerados a todos os cidadãos de uma localidade, sem deixar de considerar interesses de passageiros e operadores. A execução desta tese se justificou, portanto, pela necessidade da criação de um modelo matemático capaz de medir e analisar os benefícios de estratégias de mobilidade sustentável, uma vez que todos os residentes de uma cidade são impactados por tais medidas, e não somente os usuários de transporte público.

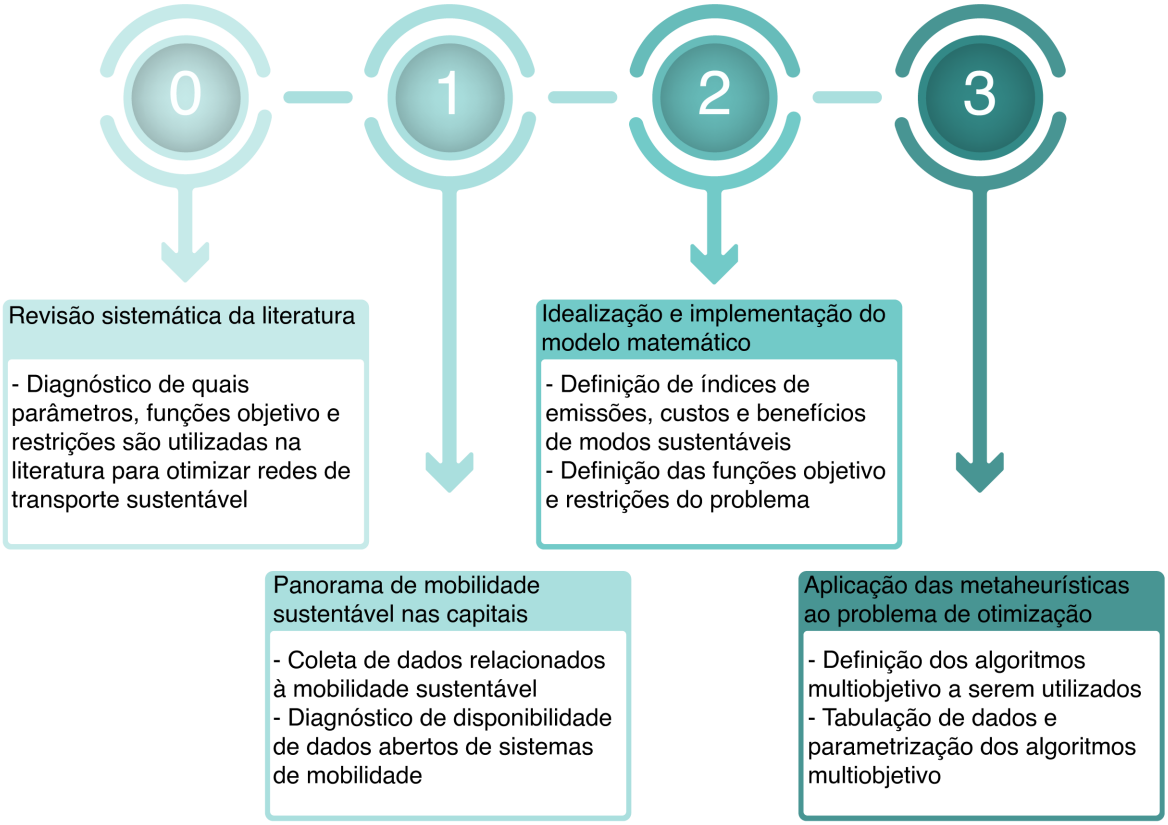
1.3 Delineamento da metodologia

A etapa preliminar desta tese consistiu em uma revisão sistemática do estado da arte e envolveu os conceitos de cidades inteligentes, sistemas de transporte e mobilidade sustentáveis, mudanças climáticas e modelos de otimização na escala da cidade. Esta etapa teve por objetivo delimitar as interseções entre os eixos bibliográficos estruturantes da tese de doutorado, bem como direcionar a elaboração das etapas subsequentes. O embasamento teórico e a contextualização histórica desta tese são apresentados no Capítulo 2, onde também são discutidas a estruturação teórica de modelos de otimização e lacunas de pesquisa.

Posteriormente à revisão sistemática, a pesquisa foi estruturada em outros três estágios principais: (1) elaboração de um panorama de disponibilidade de dados de mobilidade sustentável nas capitais brasileiras e seleção de cidades para implementação e validação do modelo. Estes dados foram utilizados como parâmetros no problema de otimização, enquanto que a disponibilidade de dados permitiu identificar possíveis candidatas para estudo de caso; (2) idealização do modelo matemático de otimização; e (3) parametrização, implementação e resolução do modelo de otimização por meio de metaheurísticas multiobjetivo. Para compilar e tabular os dados das cidades, disponíveis principalmente em formatos de tabelas e georreferenciados, foram utilizados Sistemas de Informação Geográfica (SIG), especificamente o *software* QGIS e *scripts* em linguagem de programação Python, que também foi utilizada para implementação do modelo matemático e resolução do mesmo por meio de metaheurísticas. A Figura 1 apresenta uma síntese do processo metodológico adotado e, na sequência, são descritos os três estágios supracitados.

A partir da revisão sistemática da literatura, foram elencados os dados utilizados em problemas similares ao proposto nesta tese e posteriormente foi elaborado um panorama de mobilidade sustentável nas capitais brasileiras. Assim como outras técnicas de planejamento de transportes, são utilizados dados de demanda, da rede viária e de transporte, de frota e dados de operação, da rede de energia (quando veículos elétricos são considerados no sistema), de uso do solo, além de parâmetros ambientais e econômicos. Obviamente, há uma variação no nível de detalhamento dos dados de entrada. Por exemplo, alguns modelos requerem dados detalhados da frota de cada rota, enquanto outros – através da utilização premissas mais amplas – podem ser aplicados com níveis de informações menos detalhados, e.g. composição geral da frota da cidade. Evidentemente, dados mais detalhados tendem a produzir resultados mais precisos, mas essa etapa de trabalho buscou elencar um pacote mínimo de dados que garantam um maior potencial de aplicação do modelo em vários estudos de caso, sem perder a precisão necessária para o contexto de emergência climática. Desse modo, este panorama teve o intuito de evidenciar o grau de maturidade da produção e distribuição de dados sobre os sistemas de mobilidade urbana nas capitais brasileiras,

Figura 1 – Visão geral da metodologia proposta.



Fonte: Autora (2025).

em especial os dados disponibilizados abertamente. Isso permitiu a elaboração de um modelo matemático tão complexo quanto possível para a realidade brasileira, bem como a discussão sobre quais dados precisam ser angariados pelo poder público para a aplicação do modelo aqui proposto – ou modelos similares de planejamento de transportes.

Para a conclusão deste estágio, foi realizado um levantamento dos sistemas de mobilidade sustentável nos endereços eletrônicos das prefeituras municipais das capitais brasileiras, para elaboração de um panorama de quais cidades possuem tais sistemas e em relação à disponibilidade pública dos dados desses sistemas. Uma investigação mais aprofundada ocorreu em relação aos sistemas de ônibus, tanto em termos de infraestrutura quanto operação, sendo diagnosticada também a implementação de eletrificação das frotas de ônibus. A partir deste panorama foi possível obter uma lista com cidades que possuem os dados de transporte necessários para o modelo proposto nesta tese, como esses dados são disponibilizados (em termos de formato e nível de detalhamento), bem como a maturidade dos sistemas de mobilidade sustentável no Brasil. Esta etapa também forneceu o embasamento material para o objetivo secundário de realizar uma discussão sobre dados abertos, sua disponibilidade e qualidade. Os resultados dessa sub-etapa são melhor discutidos no Capítulo 4.

Para definição das cidades candidatas a estudo de caso, foi utilizado como critério

indispensável a disponibilidade dos dados supracitados, enquanto que critérios como a qualidade, facilidade de coleta e o nível de detalhamento dos dados permitiram elencar uma ordem de priorização entre as cidades que possuem os dados disponíveis. Desse modo, entre todas as capitais brasileiras analisadas, Belo Horizonte foi a que melhor atendeu a esses critérios e foi selecionada como estudo de caso. Mesmo assim, a formulação do modelo matemático buscou refletir a realidade brasileira de dados abertos, de modo que o modelo também possa ser aplicado em outras capitais. Isto é, a escolha por uma cidade como estudo de caso não limita a reprodução do modelo em outras cidades e a delimitação de um único estudo de caso passa também pela delimitação do escopo de uma tese de doutorado.

O segundo estágio consistiu na idealização do modelo matemático, sendo definidas as premissas, parâmetros, funções objetivo e restrições. O desafio deste estágio consistiu em elaborar um modelo passível de ser aplicado em cenários de grau intermediário de escassez de dados que seja capaz de atender a necessidade de um planejamento rigoroso dos sistemas de transporte público no contexto de emergência climática atual. Também baseada nos estudos encontrados na revisão sistemática, neste estágio foram analisados os modelos da literatura para compreender quais tinham maior aderência à proposta desta tese, tanto em termos de objetivos quanto em termos de detalhamento dos dados de entrada.

O terceiro estágio da pesquisa consistiu na resolução do modelo matemático por meio do uso de metaheurística para a cidade selecionada no estágio 1. As atividades desta etapa consistiram em delimitar qual metaheurística tinha maior potencial de solução para o problema proposto, parametrizá-la e implementá-la. Para tal, foram elencados os métodos de solução mais utilizados na literatura, entre os quais se destaca o NSGA-II (Algoritmo Genético de Ordenação Não Dominada II, do inglês *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm*) (Deb et al., 2002). Como o foco desta tese está na formulação matemática e não em propor novos métodos de solução, o NSGA-II foi adotado devido à flexibilidade do algoritmo e sua consolidação na literatura. Entretanto, embora seja um dos algoritmos mais aplicados para solução de problemas multiobjetivo, ele requer um grau de processamento computacional elevado, algo que pode ser tornar um entrave quando o objeto de estudo são redes de grande porte. A investigação de outras metaheurísticas para a solução do problema permanece como uma lacuna de pesquisa. Nesta última etapa, foi possível atingir o objetivo principal da pesquisa de analisar o impacto de estratégias de mobilidade sustentável para redução de emissões de CO_2, MP e NO_x para aprimorar a inteligência e a sustentabilidade das cidades. É também nesse estágio que são atingidos os objetivos secundários de determinar vias e rotas prioritárias para implementação dessas estratégias, além de estimar os benefícios sociais e ambientais.

1.4 Contribuições

Esta tese propõe um modelo abrangente e inovador que integra, de forma direta e indireta, as perspectivas de passageiros, operadores e comunidade, equilibrando-as com os pilares da sustentabilidade (ambiental, econômica e social). A principal contribuição reside na capacidade de analisar ambas as variáveis de decisão no nível da rede, embora esta abrangência resulte em um aumento da complexidade matemática e computacional, o que representa um desafio para sua aplicação em estudos de caso. Para maximizar a reprodução do modelo no contexto brasileiro, o trabalho inclui uma discussão qualitativa sobre a maturidade das iniciativas de dados abertos no país. Adicionalmente, a precisão da dimensão ambiental é reforçada pela utilização de um modelo de emissões que considera parâmetros específicos como tecnologia, categoria dos veículos e velocidade de operação. A argumentação em relação às contribuições ao conhecimento científico é apresentada ao longo do texto da tese, especialmente, mas não exclusivamente, na seção 3.6.

1.5 Organização do trabalho

As seções deste documento estão organizadas a fim de apresentar a revisão da literatura – cobrindo tópicos de mobilidade sustentável e inteligente, sistemas prioritários de circulação de ônibus, externalidades de sistemas de transporte, incluindo emissões, potenciais benefícios de sistemas de transporte público sustentáveis, nomenclatura e descrição de problemas de otimização – (Capítulo 2), o modelo e o método de solução propostos (Capítulo 3), um panorama sobre mobilidade sustentável nas capitais brasileiras, bem como a disponibilidade de dados relacionados ao tema e a seleção do estudo de caso para aplicação do modelo proposto nesta tese (Capítulo 4), parametrização do modelo para o estudo de caso (Capítulo 5), descrição dos resultados obtidos (Capítulo 6), e, por fim, a discussão e conclusões desta tese (Capítulo 7). Após as conclusões, é apresentada também uma lista das publicações da autora durante o período do doutorado.

Capítulo 2

Referencial Teórico

Neste capítulo, foi delineada a argumentação teórica e contextualização histórica da tese, abordando os seguintes temas: (1) os aspectos da mobilidade e da sustentabilidade em cidades inteligentes, a evolução de ambas as áreas e suas confluências na atualidade; (2) os custos externos de sistemas de transporte; (3) redes de transporte sustentáveis; (4) os potenciais benefícios dessas redes, incluindo o potencial de redução de emissões; (5) os programas de redução de emissões veiculares vigentes no Brasil; (6) os desafios relacionados ao planejamento de transportes e em específico ao problema denominado projeto de redes de transporte urbano; e (7) a otimização do projeto de redes de transporte.

2.1 Mobilidade e sustentabilidade em cidades inteligentes: como é a cidade do século XXI?

Tornar as cidades existentes ecologicamente conscientes é uma prioridade no impulso global para a sustentabilidade frente a urgência imposta pela emergência climática. Entretanto, mudar o desenvolvimento urbano das suas atuais tendências e padrões insustentáveis é um processo desafiador (Kenworthy, 2006). O paradigma de sustentabilidade ganhou destaque no final da segunda metade do século XX, principalmente através de publicações de relatórios das Nações Unidas. Em 1987, foi publicado o Relatório da Comissão Brundtland "Nosso futuro comum", que apresentava o conceito de "desenvolvimento sustentável", que por sua vez, buscava alinhar o desenvolvimento mundial a estratégias sustentáveis (United Nations, 1987). Em 1992 ocorreu a Conferência das Nações Unidas sobre o Meio Ambiente e Desenvolvimento, a partir da qual foi publicada a Agenda 21, um plano de ações a nível local, regional, nacional e de cooperação internacional para acelerar o desenvolvimento sustentável (United Nations, 1992). Atualmente, o respectivo documento em voga é a Agenda 2030, protagonizada pelos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

(ODS) (United Nations, 2015). Nota-se que nas últimas décadas houve um esforço para reversão do paradigma de desenvolvimento anterior, vigente desde o pós segunda guerra mundial nos chamados "estados de bem-estar social" na Europa e na América do Norte, no qual o aspecto de crescimento econômico tinha um caráter central em detrimento de aspectos sociais e ambientais.

Apesar de não existir um conceito definitivo de sustentabilidade, ela é normalmente considerada um paradigma do pensamento social que é defendido para orientar e configurar o desenvolvimento da sociedade nas suas esferas proeminentes, incluindo ciência e inovação, tecnologia, economia, planejamento urbano, política e institucionalização (Bibri; Krogstie, 2017). O Relatório da Comissão Brundtland apresentou uma definição genérica sobre desenvolvimento sustentável: “o desenvolvimento que satisfaz as necessidades do presente sem comprometer a capacidade das gerações futuras de satisfazer as suas próprias necessidades” (United Nations, 1987). Ainda, em termos gerais, sustentabilidade é um estado no qual a sociedade não prejudica os sistemas naturais e sociais para as gerações presentes e futuras (Bibri; Krogstie, 2017). No Brasil, a Constituição Federal definiu que "Art. 225. Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao Poder Público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações" (BRASIL, 1988).

Em geral, o conceito de sustentabilidade é subdividido em três dimensões: ambiental, econômica e social (Kraus; Proff, 2021; Miller et al., 2016; Sdoukopoulos et al., 2019; United Nations, 1987), mas existem interseções como coesão social (social e econômica), eficiência econômica (ambiental e econômica) e responsabilidade ambiental (social e ambiental) (Kraus; Proff, 2021). Portanto, promover um meio ambiente ecologicamente equilibrado, socialmente justo e economicamente viável é essencial à qualidade de vida da presente e futuras gerações (Bibri; Krogstie, 2017; Kenworthy, 2006). Em geral, advoga-se que nenhuma dimensão deve se sobrepor às outras (Kraus; Proff, 2021), entretanto algumas teorias como a dos limites planetários argumentam que o aspecto ambiental também contém as condições prévias para a dimensão social, de modo que devem ser priorizados elementos desta dimensão (Rockström et al., 2009).

O setor de transportes passou e ainda passa por uma mudança de paradigma que busca incorporar os conceitos de sustentabilidade. Na literatura da área, é comum observar a intercambialidade entre termos como transporte sustentável e mobilidade sustentável, embora o conceito em si de mobilidade estivesse (e talvez ainda esteja) muito atrelado à mobilidade e fluxo de carros (Banister, 2005; Banister, 2008; Giorgi, 2003). De todo modo, a ascensão do termo "mobilidade sustentável" marca uma mudança da abordagem tradicional de planejamento de transportes, que conceitualizava transporte como uma demanda derivada (de outras atividades) e como uma infraestrutura de apoio ao crescimento econômico, para uma abordagem que reconhece as armadilhas do crescimento

econômico irrestrito, incorporando objetivos sociais e ambientais como proteção ambiental e participação democrática. Em décadas anteriores, o planejamento de transportes buscava maximizar a capacidade da rede, os volumes de tráfego e as velocidades operacionais, enquanto que o modelo proposto de transporte/mobilidade sustentável foca em pessoas, se relacionando com conceitos como acessibilidade e aumento da qualidade de vida através da regeneração de espaços urbanos (Banister, 2005; Banister, 2008; Giorgi, 2003; Sdoukopoulos et al., 2019).

A ascensão da sustentabilidade dentro do planejamento urbano fez surgir diversas correntes teóricas dentro do urbanismo. Tem-se como exemplo disso o TOD (Desenvolvimento Orientado ao Transporte, do inglês *Transit Oriented Development*) e a cidade de 15 minutos (do inglês *15-minutes City*). O conceito de TOD refere-se ao planejamento urbano que integra habitação, empregos, serviços e equipamentos públicos em áreas próximas a estações de transporte público, alinhadas a eixos estruturantes de transporte. Essa abordagem visa redirecionar as estratégias de urbanização, promovendo bairros densos, multifuncionais e com espaços públicos bem projetados, incentivando a convivência e a mobilidade sustentável (Cervero, 1994; Cervero, 1999). A cidade de 15 minutos é um modelo de planejamento urbano que busca garantir que tudo o que uma pessoa precisa em sua vida cotidiana possa ser acessado em 15 minutos a pé ou de bicicleta, reduzindo o uso de carros e promovendo os modos ativos e o transporte público (Moreno, 2016). Mais recentemente um projeto científico chamado "cidade da bicicleta elétrica" (do inglês *E-Bike City*) complementou essas teorias ao apresentar propostas para a redistribuição do espaço viário urbano, reduzindo drasticamente o espaço disponível para circulação e estacionamento de veículos privados e ampliando a infraestrutura para bicicletas e transporte público (Elliot, 2025).

Em geral, independente da teoria urbanista, há uma coesão entre promover meios de transporte ativos e o transporte público, em oposição às teorias vigentes durante o século XX – principalmente o urbanismo modernista, centrado em setorização do uso do solo e deslocamentos realizados através de grandes eixos rodoviários – e atualmente há um certo grau de consenso de que as cidades não podem ser sustentáveis sem se contrapor à lógica desenvolvimentista baseada em carros. Entretanto, ambas as teorias tem sido estudadas também por seus efeitos negativos, principalmente a gentrificação (Padeiro; Louro; Costa, 2019; Rojas-Rueda; Norberciak; Morales-Zamora, 2024), demonstrando que os problemas urbanos e de transportes transcendem a dimensão espacial e são problemas de cunho econômico e social, não podendo ser resolvidos única e exclusivamente através de teorias urbanísticas ou de planejamento de sistemas de transporte. Esses apontamentos já vinham sendo feitos por diversos autores desde a segunda metade do século XX (Harvey, 2008; Lefebvre, 2008; Santos, 1993). A superação do modelo rodoviário pressupõe também a superação de conflitos econômicos e socais inerentes a lógica de desenvolvimento baseada

em carros.

Desse modo, mobilidade sustentável pode ser compreendida como um conceito que busca reduzir a necessidade de viajar, encorajar a mudança modal, reduzir as distâncias de viagem e encorajar uma maior eficiência do sistema de transportes (Banister, 2008). O conhecimento na área passou a incorporar aspectos ambientais, bem como se tornou muito mais interdisciplinar (Giorgi, 2003), incorporando gestão de demanda, multimodalidade e alocação prioritária de certos usuários do sistema, criando espaços urbanos para pessoas ao invés de carros e integrando o planejamento de transportes com o planejamento urbano (Banister, 2005; Banister, 2008; Giorgi, 2003; Kraus; Proff, 2021). Dado que mobilidade é um fator importante no contexto do desenvolvimento sustentável devido à pressão que exerce sobre o ambiente e aos seus impactos econômicos e sociais (Kenworthy, 2006; Sdoukopoulos et al., 2019), é nítida a necessidade de favorecer os modos de deslocamentos ativos (caminhada e bicicletas) e os sistemas de transporte público, minimizando o uso de automóveis e motocicletas (Banister, 2008; Kenworthy, 2006; Sdoukopoulos et al., 2019). A utilização de tecnologia também aparece como um fator importante dentro da área (Banister, 2008).

Quando se analisa de modo mais aprofundado a questão do que está envolvido na área de transporte sustentável, a literatura sugere o agrupamento através das dimensões de sustentabilidade (ambiental, econômica e social), de objetivos, critérios e indicadores (Kraus; Proff, 2021; Sdoukopoulos et al., 2019). Não exaustivamente, estes indicadores incluem contribuições para a economia e desenvolvimento, custos do sistema transporte (incluindo custos das externalidades), eficiência e confiabilidade do sistema de transporte, eficiência energética, inserção social de tecnologias sustentáveis e inteligentes, consumo de combustíveis fósseis, percentual de energias renováveis e alternativas em relação ao total consumido no setor, emissões de poluentes e de GEE, qualidade do ar, taxas de doenças respiratórias provocadas por poluição do ar, taxas de acidentes, taxas de congestionamento, poluição sonora, fragmentação do espaço urbano, existência de espaços públicos verdes e de lazer, acessibilidade urbana e financeira, equidade social, nível de integração com planejamento urbano, divisão modal, capacidade de mudança de demanda dos modos individuais para coletivos e ativos e multimodalidade (Kraus; Proff, 2021; Miller et al., 2016; Sdoukopoulos et al., 2019).

Com a ascensão do conceito urbanístico de cidades inteligentes, Giffinger e Gudrun (2010) apresentaram mobilidade e meio ambiente como duas de seis características de uma cidade inteligente, sendo a interseção entre esses dois aspectos o foco de pesquisa da presente tese. Assim como a definição de sustentabilidade, em geral o conceito de mobilidade inteligente é geralmente vago ou ambíguo. Lyons (2018) apontou que é como se houvesse um entendimento que o significado do conceito deve estar implícito, sendo assumido como uma "manifestação axiomaticamente positiva dos desenvolvimentos de base

tecnológica nos sistemas de transporte, serviços e na sua utilização". De forma resumida, poderia-se dizer que mobilidade inteligente: (1) utiliza a tecnologia para gerar e partilhar dados, informações e conhecimentos para melhorar as tomadas de decisões; (2) utiliza tecnologia para melhorar veículos, infraestruturas e serviços; e (3) provê melhorias para operadores, usuários do sistema de transporte e investidores dos sistemas (Lyons, 2018). Benevolo, Dameri e D'Auria (2016) citam como objetivos de estratégias de mobilidade inteligente a redução da poluição sonora e do ar, dos congestionamentos, dos custos de transferências e baldeações e aumento da segurança das pessoas. Entretanto, as definições vagas ou que inserem apenas elementos tecnológicos em um sistema altamente complexo como o de transportes e mobilidade, tendem a favorecer determinados atores urbanos, nesse caso principalmente as grandes empresas de tecnologia, que buscam aumentar suas inserções de mercado e seus lucros a partir da ideia de que a tecnologia por si só pode resolver os problemas urbanos, não necessariamente levando em consideração os interesses de outros atores urbanos, em última instância, da própria população. Via de regra, estas definições ou abordagens não questionam o modelo vigente de mobilidade e planejamento de transportes, buscando apenas soluções de mercado que aumentem margens de lucro. Nesse sentido, Noy e Givoni (2018) apontaram o paradigma de mobilidade inteligente como uma possível distração à resolução de aspectos insustentáveis do setor de transportes, bem como uma forma de adiar a transição para modelos mais sustentáveis.

Lyons (2018) afirmou também que muitas vezes o termo sustentável é utilizado como sinônimo de inteligente, porém, apesar da definição de sustentabilidade fazer parte da definição de inteligência, esta não é suficiente para abarcar a totalidade do que pode ser compreendido por inteligente e que, em termos de políticas, parece absurdo utilizar dois paradigmas separados mas concorrentes para a mobilidade urbana, argumentando que inteligente e sustentável precisam ser reunidos. Desse modo, o autor propôs o conceito de que mobilidade urbana inteligente é "a conectividade em cidades que é financeiramente acessível, efetiva, atrativa e sustentável". Desse modo, este conceito foi adotado nesta tese, com a adição de alguns comentários adicionais: (1) o projeto urbano deve ser considerado uma forma legítima de buscar a mobilidade urbana inteligente, visto que pode ser o fator responsável por criar ambientes atraentes para as pessoas trabalharem e se divertirem em estreita proximidade, reduzindo a necessidade ou o desejo de mobilidade motorizada; (2) digital não é sinônimo de inteligente, ou seja, apenas a utilização de tecnologia, mesmo que sofisticada, não garante inteligência (Fonzone; Saleh; Rye, 2018; Lyons, 2018); e (3) a mobilidade urbana se torna inteligente quando atores se aproveitam da tecnologia para elaboração de políticas, planos e interações inteligentes, tomando medidas para melhorar as experiências de viagem e a operação do sistema, reduzindo o consumo de recursos e o impacto sobre o meio ambiente (Fonzone; Saleh; Rye, 2018).

Alinhado a este contexto de crescente inserção tecnológica no espaço urbano

(material e virtual), a pesquisa operacional, o campo em que as técnicas de otimização estão inseridas, foi fortemente beneficiada pelos avanços tecnológicos. Nas últimas décadas, os aprimoramentos nos métodos e algoritmos permitiram lidar com problemas e redes mais complexos. Em geral, a otimização do transporte dá suporte ao processo de tomada de decisão por meio da aplicação de métodos analíticos avançados e pode ser aplicada em uma gama de ações para a mobilidade sustentável (Agatz; Hewitt; Thomas, 2021; SLOCAT, 2021). De maneira semelhante a Lyons (2018), Agatz, Hewitt e Thomas (2021) argumentaram que os desafios globais são altamente complexos e devem ser abordados por diferentes disciplinas, caso contrário, um campo ou área de pesquisa pode se tornar insular, defendendo que a otimização do transporte deve apoiar o processo de tomada de decisão em relação aos ODS das Nações Unidas (United Nations, 2015).

Em suma, esta tese buscou aplicar técnicas de otimização, que compõem parte das técnicas aplicadas na estratégia de desenvolvimento urbano denominada cidades inteligentes (Tomaszewska; Florea, 2018), no campo de mobilidade urbana de passageiros, estando em concordância com as definições supramencionadas. Além disso, buscou-se integrar tais técnicas a objetivos de sustentabilidade social e ambiental, considerando que ambos os termos – inteligência e sustentabilidade – devem ser integrados no campo de planejamento de transportes. Desse modo, foram aplicadas técnicas que emergiram nas últimas décadas devido a avanços tecnológicos com objetivos sustentáveis, direcionando a tecnologia para aspectos políticos e sociais.

Assim, é necessário fazer alguns apontamentos adicionais, não necessariamente vinculados à definição dos conceitos, mas essenciais para compreender o esforço teórico e prático desta tese. A inserção de tecnologias no setor de transporte não necessariamente melhorou aspectos criticados em paradigmas anteriores. Um exemplo disso é a participação popular na tomada de decisões sobre o planejamento de políticas na área. Embora atualmente seja mais fácil coletar dados de usuários, não necessariamente essa coleta de dados resulta em uma melhoria do sistema. Os dados servem apenas para especulação em relação ao comportamento dos indivíduos, ou até mesmo para a criação de novos produtos de mobilidade. Muitas vezes, estes dados constituem algum tipo de propriedade empresarial, ou seja, o poder público – local ou nacional – sequer consegue acesso aos dados relacionados ao local governado, impossibilitando também qualquer tipo de controle por parte dos cidadãos e sociedade civil. Ainda, a promoção da chamada eficiência no setor é interpretada principalmente do ponto de vista dos operadores, mantendo-se o viés econômico como predominante em relação aos sociais e ambientais.

Por fim, há de se fazer a ressalva de que tecnologia não é um elemento neutro, nem possui características supra-humanas; não é através da simples evolução tecnológica que os problemas urbanos relacionados ao setor de transportes serão solucionados. As tecnologias – por mais avançadas que possam parecer – são desenvolvidas por seres humanos

e podem conter todo o aparato social do tempo histórico no qual foram desenvolvidas, ou seja, podem ser usadas para aprofundar estruturas de opressão social e econômicas existentes, podem inclusive aprofundar os próprios problemas que se propõem a resolver (vide caso dos aplicativos de viagens cuja propaganda envolvia principalmente acabar com os congestionamentos urbanos, mas aprofundaram a perda de demanda do transporte público, além de espraiar os fluxos de veículos para vias locais) (Agatz; Hewitt; Thomas, 2021; Figueirôa-Ferreira et al., 2023).

2.2 Custos externos dos sistemas de transporte

O setor de transportes está entre os principais responsáveis pelo aquecimento global e pelo esgotamento de recursos não renováveis. Entre as inúmeras externalidades negativas de sistemas de transporte focados em automóveis, pode-se citar poluição sonora e atmosférica, emissões de GEE, congestionamentos e acidentes (Davison; Knowles, 2006; Douglas et al., 2011; Santos; Behrendt; Teytelboym, 2010). Todas essas externalidades possuem impactos diretos e indiretos sobre a saúde da população e sobre o metabolismo socio-ambiental.

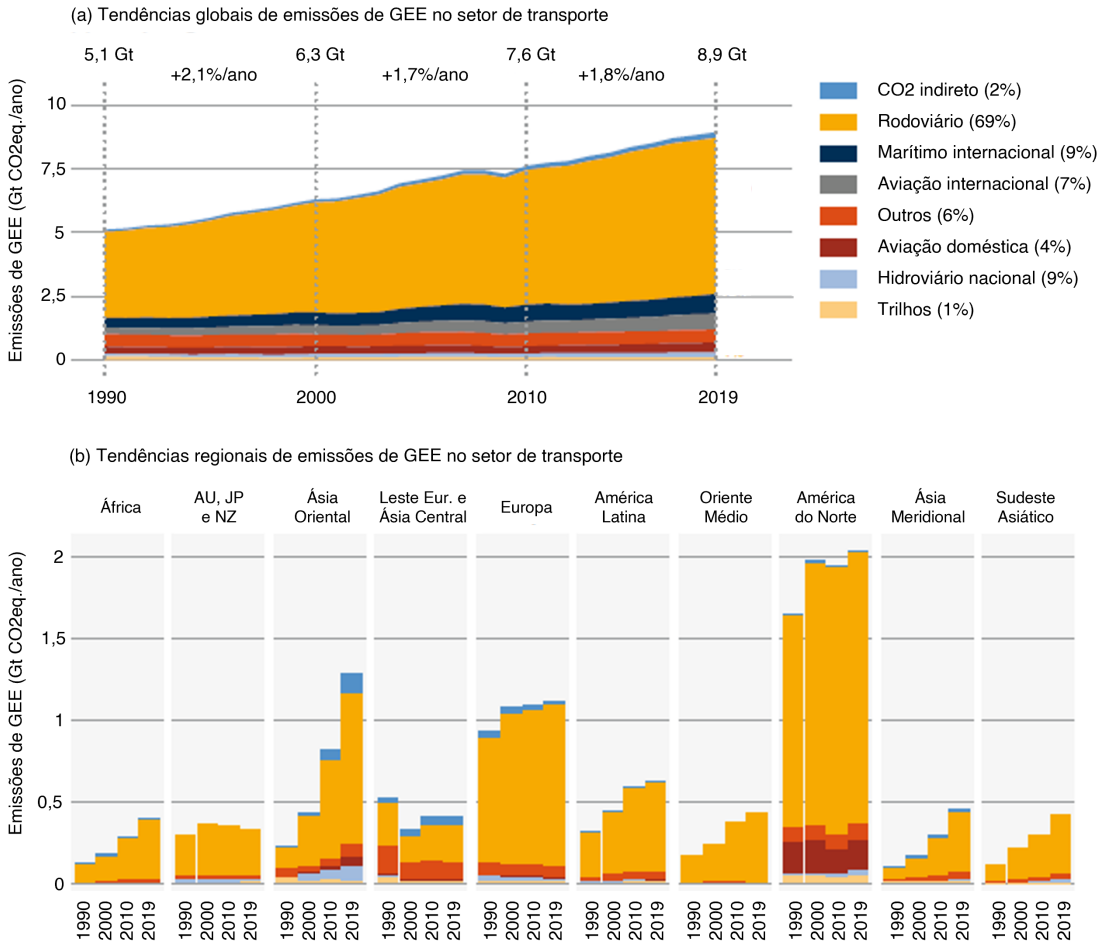
Em relação a emissões de GEE e outros poluentes, os principais gases de exaustão são monóxido de carbono (CO), NO_x, dióxido de nitrogênio (NO_2), hidrocarbonetos não metano ($NMHC$), aldeídos totais ($RCHO$), dióxido de enxofre (SO_2), MP, CO_2, metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O) (CETESB, 2019; IPCC, 2023). Globalmente, o setor é responsável por cerca de 15% das emissões totais de GEE e 23% das emissões de CO_2 relacionadas a energia (IPCC, 2023).

É possível observar na Figura 2(a) que o transporte rodoviário é responsável por cerca de 69% das emissões totais do setor. Automóveis de passageiros, veículos de duas e três rodas e micro-ônibus contribuem com cerca de 75% das emissões de CO_2 do transporte de passageiros, enquanto o transporte público (incluindo ônibus e sistemas sobre trilhos) gera cerca de 7% das emissões, apesar de cobrir um quinto do transporte de passageiros a nível global (SLOCAT, 2018). Em relação a MP, o setor de transportes rodoviário em geral, é responsável por cerca de 30% das emissões urbanas globais (SLOCAT, 2021). Comparado aos veículos particulares, o transporte público produz 95% menos CO e 45% menos CO_2 e NO_2 do que os veículos particulares (Shapiro; Hassett; Arnold, 2016).

Entretanto, as emissões não são uniformes, sendo que os países do chamado Norte Global, principalmente os Estados Unidos da América (EUA), são os maiores emissores a nível global, tanto em termos absolutos quanto relativos. Em termos absolutos, é possível observar na Figura 2(b) a América do Norte (EUA e Canadá) juntamente com a Europa Ocidental são responsáveis por aproximadamente a mesma quantidade de emissões que

África, América Latina, Oriente Médio, Leste Europeu e partes da Ásia (excluída a Ásia Oriental) somadas. Aponta-se também que as emissões referentes à Ásia Oriental, onde a China está inserida, apresentaram um aumento expressivo entre 1990 e 2019 e em 2019 ultrapassaram as emissões da Europa Ocidental (IPCC, 2023). Embora o discurso hegemônico seja o de que motores alternativos mais leves tem um grande potencial para mitigar as emissões de GEE dos automóveis, a tendência observada no setor é de um aumento do tamanho dos veículos e da potência dos motores, em especial dos chamados veículos utilitários esportivos (SUVs, do inglês *Sport Utility Vehicles*), cujas vendas em escala global apresentam uma tendência de crescimento constante desde a última década e representavam 40% dos veículos vendidos em 2019. Além disso, veículos mais pesados também tem um efeito sobre a produção e emissão de MP (IPCC, 2023).

Figura 2 – Tendências globais e regionais das emissões de gases de efeito estufa no setor de transportes.

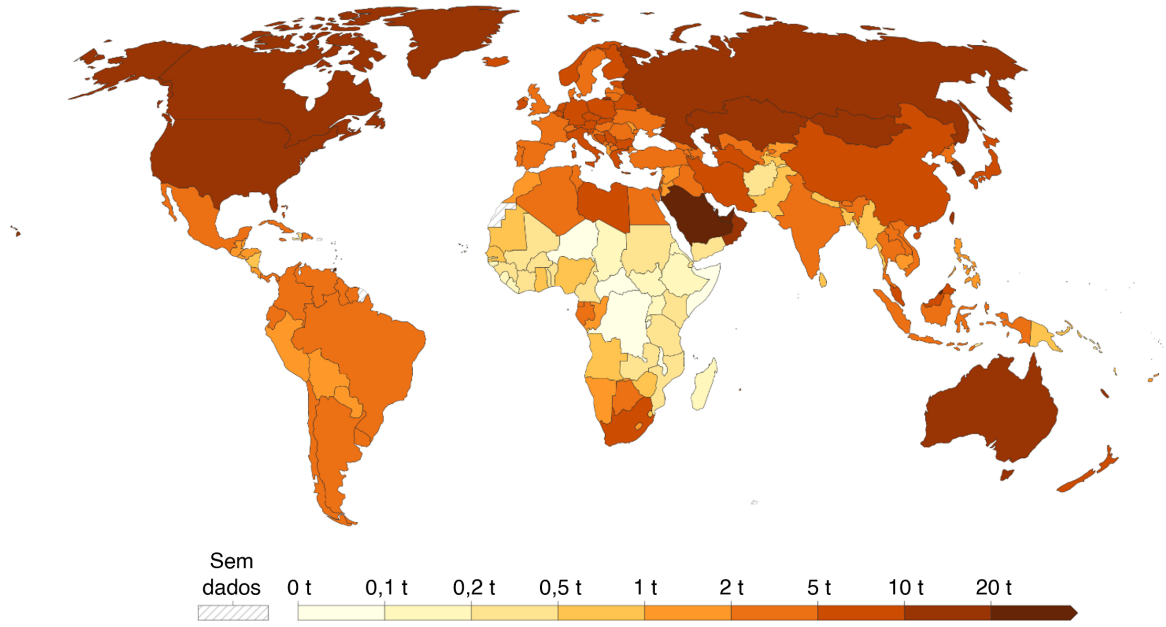


Fonte: IPCC (2023). Nota: A aviação e o transporte marítimo internacionais estão incluídos no painel (a), mas excluídos do painel (b). As emissões indiretas da produção de combustível, fabricação de veículos e construção de infraestruturas não estão incluídas no total do setor.

A Figura 3 apresenta os dados relativos a emissões *per capita*. A base utilizada contém emissões de transporte, geração de energia e de aquecimento, mas desconsidera

dados de emissões relativas a processos de mudança de uso do solo. Embora seja difícil localizar dados apenas de transportes, é possível observar a disparidade entre países. Disso, deriva-se que determinados grupos sociais tem um impacto maior na pressão exercida sobre o planeta e que a responsabilização pelas emissões não deve ocorrer de maneira uniforme. A realidade apresentada serve para analisar criticamente a promessa de que a eletrificação de automóveis seria uma estratégia relevante para o combate ao aquecimento global e às mudanças climáticas. Se a geração de energia a nível mundial ainda é completamente dependente de combustíveis fósseis, aumentar a pressão sobre os sistemas energéticos via aumento de demanda em virtude do aumento do número de carros elétricos, pode não resultar em redução das emissões e apenas em um deslocamento dessas para fora de áreas urbanas.

Figura 3 – Emissões de CO_2 per capita em 2023 considerando emissões de queima de combustíveis fósseis e processos industriais, excluindo emissões de mudança de uso do solo.

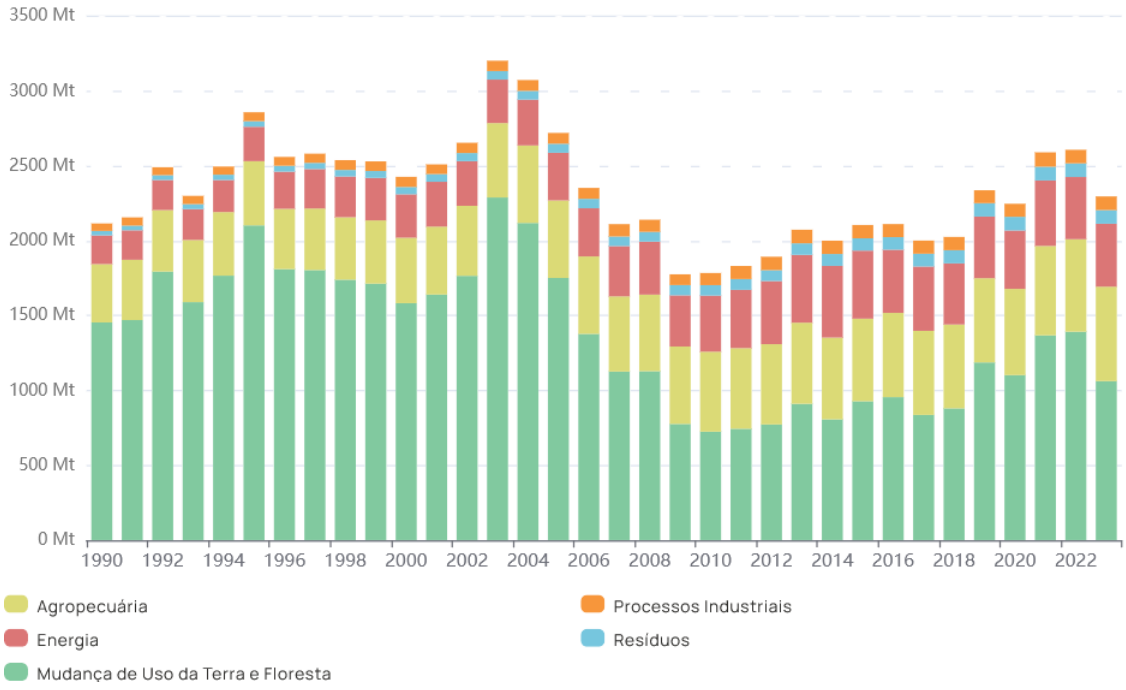


Fonte: Our Wold in Data (2023).

Na Figura 4 observa-se que o caso do Brasil é um tanto particular no cenário de emissões porque as grandes fontes de emissões nacionais são as mudanças no uso da terra e florestas e o agronegócio, que estão intrinsecamente ligados, uma vez que a expansão das fronteiras agrícolas para agricultura monoculturista e pecuária extensiva ocorre às custas do desmatamento de biomas brasileiros, principalmente – mas não exclusivamente – a Amazônia, o Cerrado e a Mata Atlântica (Observatório do Clima, 2024a; Observatório do Clima, 2024b). O setor de transportes é responsável por cerca de 44% das emissões relacionadas à energia, o que representa cerca de aproximadamente 9,6% das emissões brutas totais do Brasil; nesse cálculo incluem-se transporte de carga e de passageiros e o setor rodoviário é predominante nas emissões (Observatório do Clima, 2024a). Portanto,

ao focar em estratégias de mobilidade sustentável relacionadas à melhoria dos sistemas de transporte público, entende-se a limitação que essas estratégias podem ter se analisadas dentro de um cenário mais amplo. Por outro lado, não significa que não sejam estratégias válidas apenas porque não modificam complemente o padrão de emissões. É preciso começar a transição no setor de transportes por algum lugar e nesta tese isso é feito sob a perspectiva de melhoria do transporte público urbano de passageiros.

Figura 4 – Emissões de gases de efeito estufa no Brasil de 1990 a 2023 por setor de emissão.



Fonte: Observatório do Clima (2024b).

Sobre os impactos da poluição do ar na saúde, os efeitos no sistema respiratório são os primeiros a serem notados porque ele é o primeiro a ser atacado, mas também acontecem problemas cardiovasculares como insuficiência cardíaca, infarto do miocárdio, acidente vascular cerebral, arritmias, problemas no sistema nervoso central como perda cognitiva e perda de massa encefálica devido à exposição a poluição do ar e na gestação como baixo peso do feto ao nascer, restrição do crescimento intrauterino, prematuridade, anomalias congênitas e mortalidade perinatal. Além disso, a exposição à poluição durante a primeira infância pode acarretar em desenvolvimento futuro de doenças crônicas como diabetes e hipertensão (Bravo et al., 2016; Gouveia et al., 2017; Gouveia et al., 2018; Gouveia et al., 2021; Liu et al., 2019; Saldiva et al., 2002; Silva; Suemoto; Gouveia, 2019). Ressalta-se que um dos poluentes com maior número de estudos é o MP.

Outro custo externo dos sistemas de transporte são os acidentes de trânsito. A Organização Mundial da Saúde (OMS) estima que 1,19 milhão de pessoas morreram em acidentes de trânsito em todo o mundo no ano de 2021. De acordo com dados de 2019, os acidentes de trânsito são a principal causa de morte de crianças e jovens de 5 a 29

anos e os sujeitos mais vulneráveis são pedestres, ciclistas e motociclistas; considerando todas as faixas etárias, acidentes são a 12ª maior causa de morte mundial (World Health Organization, 2023). No Brasil, foram registrados 34.881 óbitos decorrentes de acidentes de trânsito em 2023 (Datasus, 2023).

Por fim, cabe um apontamento sobre os efeitos urbanos do provimento de infraestrutura, principalmente a voltada à circulação de veículos de transporte individual, mas que em menor grau também são observados com sistemas de transporte público. Além de efeitos sociais como segregação social, a expansão de sistemas rodoviários provoca a impermeabilização do solo urbano e a redução de áreas verdes, calçadas e espaços públicos em geral. Uma consequência direta das mudanças climáticas já observadas atualmente é a amplificação dos efeitos negativos de eventos climáticos extremos, como por exemplo, inundações e ondas de calor. Em geral, as cidades como estão construídas atualmente apresentam um grande risco de disrupção em eventos climáticos graves. Propor uma modificação no planejamento e construção de infraestrutura urbana significa pensar em como transicionar a infraestrutura existente para os modos sustentáveis, mas também repensar os modelos de expansão para o transporte público. É necessário que a criação de infraestrutura exclusiva para ônibus seja acompanhada de integração com redes cicloviárias, calçadas e espaços verdes, seguindo rígidas normas de segurança viária, de modo que as externalidades do transporte público também sejam mitigadas.

2.3 Redes de transporte sustentáveis

Para a construção de uma rede de transportes sustentável, os modos alternativos aos automóveis e motocicletas devem ser acessíveis, desejáveis e percebidos como seguros, devendo-se dispensar especial atenção aos sistemas de infraestrutura prioritária e à conectividade da rede (Borchers; Ribeiro, 2022; Ceder, 2021; Cui; Mishra; Welch, 2014; Rybarczyk; Wu, 2010; Zuo; Wei, 2019).

Embora o planejamento de infraestrutura para modos ativos não seja um foco de estudo dessa tese, é inegável que o transporte público de maneira isolada não é capaz de resolver todos os problemas de mobilidade urbana. É fundamental uma conexão entre os modos ativos e público, de forma a ampliar a capilaridade dos sistemas sustentáveis. Assim, tem-se que a infraestrutura dedicada ao modo cicloviário é composta por ciclovias (separadas fisicamente do tráfego motorizado) e ciclofaixas (separadas do tráfego motorizado através de demarcação espacial e elementos de sinalização). Para este modo de transporte, é justamente a segregação em relação ao tráfego motorizado que promove um aumento da segurança viária e uma redução de acidentes, provocando, por sua vez, um aumento no uso da bicicleta como modo de transporte (Cui; Mishra; Welch, 2014; Ruiz-Padillo et al.,

2021; Rybarczyk; Wu, 2010; Zuo; Wei, 2019).

Em relação a sistemas para ônibus, dado que o atraso dos ônibus está relacionado com a disputa de espaço viário com outros veículos, o tempo gasto em interseções semaforizadas e o tempo de embarque e desembarque nas paradas ou estações de ônibus, é possível reduzir atrasos e promover melhorias no sistema através de priorização espacial ou temporal (Dadashzadeh; Ergun, 2018). Prioridade temporal comporta um conjunto de tecnologias que visam reduzir o tempo de parada em interseções semaforizadas, controlando o tempo de parada nas estações de embarque e desembarque, estendendo o tempo de verde e reduzindo o de vermelho a fim de que os ônibus tenham prioridade nos cruzamentos (Dadashzadeh; Ergun, 2018; Gao et al., 2020; Ma; Jin; Lei, 2014). Prioridade espacial, um dos focos deste estudo, segrega parte da via para o sistema de transporte público por ônibus. Dentre as soluções de prioridade espacial, podem ser citados os sistemas BRTs (Sistema de ônibus rápido, do inglês *Bus Rapid Transit*) completos, os corredores e as faixas exclusivas de ônibus (Dadashzadeh; Ergun, 2018; Haitao et al., 2019; Khoo; Teoh; Meng, 2014).

É importante salientar que a prioridade viária do transporte público e dos modos ativos deve ocorrer a partir da redistribuição do espaço hoje ocupado por automóveis e motocicletas e, que, em último grau resulta em toda a reorganização do espaço urbano. Além disso, é inegável que o processo de transformação urbana através da priorização de modos sustentáveis não deve ocorrer sem a presença de conflitos.

2.4 Benefícios dos sistemas de transporte sustentável

Em uma revisão sistemática da literatura para investigar as variáveis que afetam as emissões de GEE em diferentes modos de transporte, Aminzadegan et al. (2022) apontaram que as principais estratégias para a redução de emissões do transporte rodoviária são o planejamento urbano voltado para os modos sustentáveis, a adoção tecnologia veicular com fontes alternativas de combustível com menor teor de carbono, por exemplo veículos elétricos a bateria (BEV, do inglês *Battery Electric Vehicle*), a renovação das frotas, a utilização de sistemas inteligentes para melhoria de rotas, o uso de políticas fiscais para aumentar a taxação (ou eliminar subsídios e incentivos) de combustíveis com maiores índices de emissões e a conversão de custos externos em custos internos, de modo que acidentes, poluentes e ruídos passem a ser considerados como custos do sistema, fazendo com que investimentos em redes de transporte para veículos individuais passariam a ser percebidas como mais custosas. Portanto, através da integração de uma série de medidas, é possível mitigar as externalidades observadas nos sistemas de transporte e obter uma redução de emissões e de acidentes.

Para que haja uma efetiva redução de emissões de GEE e de poluentes urbanos, é necessária uma diminuição no uso de veículos motorizados individuais e um aumento no uso de modos ativos, como bicicleta e caminhada, e de transporte público (Aminzadegan et al., 2022; Canzler; Wittowsky, 2016; Chapman, 2007; Santos; Behrendt; Teytelboym, 2010; Woodcock et al., 2009). Para tal, são necessárias políticas com investimentos significativos para tornar atraentes e viáveis os modos sustentáveis (Chapman, 2007). É importante apontar que medidas ou estratégias isoladas possuem efeitos potenciais menores que medidas aplicadas em conjunto. Ainda, políticas que envolvem a aplicação de tecnologias, como eletrificação de frotas de ônibus, podem reduzir as emissões, mas possuem efeitos positivos sobre a saúde humana menores que políticas de promoção de transportes ativos (Woodcock et al., 2009). Além disso, é importante manter um olhar crítico em relação às soluções que prometem resolver problemas complexos como os do atual contexto de emergência climática apenas a partir de melhorias tecnológicas. Mesmo que esses avanços tenham impactos positivos, eles também carregam diversos impactos negativos. Um exemplo disso é o uso do biodiesel como uma alternativa renovável e sustentável ao diesel de petróleo. O principal argumento a favor do biodiesel é de que o CO_2 emitido na combustão é recuperado na plantação que dá origem ao combustível, de modo que haveria uma espécie de "reciclagem" do CO_2 emitido. Entretanto, ao se usar esse argumento, são consideradas apenas as emissões de plantio e uso do combustível, mas frequentemente ignora-se emissões oriundas das mudanças de uso do solo diretas e indiretas – seja por desmatamento direto ou por deslocamento de atividades de pecuária e agricultura para novas áreas de expansão da fronteira agrícola, além dos impactos ambientais negativos das monoculturas de *plantations*, que acarretam em perda de biodiversidade, degradação do solo, impactos sociais, hídricos. Outro exemplo é relacionado aos veículos e ônibus elétricos, que necessitam de grandes esforços de mineração de minerais críticos, em especial o lítio, e cuja demanda crescente tem aprofundado disputas de territórios com povos originários em toda a América do Sul e conflitos entre países a nível global. Nenhuma solução é universalmente positiva e impactos regionais e até mesmo globais não devem ser ignorados, mesmo que uma tecnologia apresente impactos extremamente positivos a nível local.

Em síntese, a combinação de medidas de naturezas diversas se apresenta como a melhor alternativa para amplificar os benefícios ambientais, econômicos e sociais que podem ser extraídos de sistemas de transporte sustentáveis (Aminzadegan et al., 2022; Chapman, 2007; Woodcock et al., 2009). No transporte público, a eletrificação da frota, combinada com outras estratégias de incentivo ao modo, pode ser um atrativo para a mudança de modo de transporte, não só pela sua natureza tecnológica como pela melhoria operacional do sistema de transporte público (Aminzadegan et al., 2022; Canzler; Wittowsky, 2016; Santos; Behrendt; Teytelboym, 2010; Sarigiannis et al., 2017). Melhorias nas rotas e incentivos tarifários também podem ser estratégias potencializadoras de mudança de modo (Aminzadegan et al., 2022). Além disso, os benefícios de qualquer sistema de transporte

público vão além da própria produtividade (como a melhoria da regularidade dos serviços) e incluem dimensões adicionais que podem impactar na saúde, redução de acidentes, mobilidade, renda e orçamentos familiares (Haddad et al., 2015). No transporte ativo, os impactos adicionais envolvem benefícios diretos à saúde, com diminuição da prevalência de inatividade física e de diversas doenças. Mesmo que o aumento de pedestres e ciclistas aumente as exposições destes à poluição do ar e a acidentes, exceto em ambientes de poluição extrema, os efeitos positivos do aumento de atividades físicas compensam fortemente os efeitos negativos de ferimentos induzidos pelo tráfego e da exposição à poluição do ar (Alessio et al., 2021; Woodcock et al., 2009). Portanto, os modos de transporte ativos e públicos desempenham um papel central na construção de um modelo de mobilidade inteligente que é ambiental, econômica e socialmente sustentável.

2.5 Programas de redução de emissões veiculares

No Brasil, o Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores (PROCONVE) estabelece normas e limites para as emissões de poluentes por veículos, incluindo os pesados movidos a diesel (ônibus e caminhão). O PROCONVE é gerenciado pelo Ibama (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) e foi instituído para atender diversas resoluções do CONAMA (Conselho Nacional do Meio Ambiente) que visam reduzir os impactos ambientais e à saúde causados pela emissão de poluentes. O controle de fumaça de veículos pesados teve início em 1987 e o controle de emissões gasosas por escapamento em 1993, com introdução gradativa dos limites da Fase P-3, em 1994, da Fase P-4, em 1998, da Fase P-5, em 2004, da Fase P7, em 2012 e da Fase P8 em 2022 (a fase Fase P-6 foi adiada para a Fase P7 em virtude da ausência de distribuição a nível nacional de diesel com baixo teor de enxofre) (CONAMA, 2018; Façanha et al., 2016; Ibama, 2011). As fases regulamentadas pelo PROCONVE tem uma equivalência com as fases da regulamentação europeia, conhecidas como Fases EURO. Entre as fases mais recentes, a P7 equivale à fase EURO V e a fase P8 equivale à EURO VI (EMEP/EEA, 2023; IEMA, 2017; Vieira; Pereira; Andrade, 2023).

Dadas as imposições de limites de emissão, os fabricantes de veículos pesados implantaram como métodos de controle de emissões as seguintes tecnologias (Gioria et al., 2024; Grigoratos et al., 2019):

- Catalisadores de Oxidação Diesel (DOC, do inglês *Diesel Oxidation Catalyst*): compostos por uma estrutura cerâmica ou metálica revestida com metais preciosos, como platina ou paládio, que atuam como catalisadores e reduzem os hidrocarbonetos (HC) e o CO convertendo-os em CO_2 e água (H_2O). O DOC também ajuda a oxidar parte do MP e a converter monóxido de nitrogênio (NO) em NO_2, melhorando a

eficiência de outros sistemas de pós-tratamento, como os filtros de partículas diesel e a redução catalítica seletiva;

- Filtros de Partículas Diesel (DPF, do inglês *Diesel Particulate Filter*): compostos por uma estrutura porosa, geralmente feita de cerâmica (carbeto de silício), que retém as partículas sólidas enquanto permite a passagem dos gases, capturando as partículas de MP emitidas pelo motor e reduzindo significativamente a emissão de fuligem. As partículas são convertidas em CO_2 e uma pequena quantidade de cinzas residuais;
- Redução Catalítica Seletiva (SCR, do inglês *Selective Catalytic Reduction*): utiliza um reagente à base de ureia, conhecido como *AdBlue* na Europa e ARLA-32 no Brasil, que é injetado no fluxo de gases de escape antes que eles passem por um catalisador. No catalisador SCR, ocorrem reações químicas que convertem os NO_x em água e nitrogênio (N_2), que é inofensivo e compõe a maior parte do ar.

Durante a vigência da fase P7, os veículos eram majoritariamente equipados com SCR, enquanto que a fase P8 exige o uso das tecnologias DPF e SCR simultaneamente. Entretanto, aponta-se que a fase P7 não conseguiu atingir todos os resultados desejados. Lacunas na legislação permitiram que montadoras eliminassem sensores de qualidade e taxas de consumo de ARLA-32, e uma fração de motoristas não usaram adequadamente o reagente, de modo que as emissões de NO_x ficaram 36% acima do esperado. Os dados sobre as estimativas de consumo de ARLA-32 – muito menor do que o previsto – confirmam que há fraudes na operação dos SCR (Façanha et al., 2016). Além disso, a EMEP/EEA (2023) aponta que há pelo menos duas situações que o sistema SCR pode não funcionar corretamente. Na primeira, o SCR forma N_2O como um subproduto da conversão de N_2. Este, por sua vez, pode ser armazenado em condições de temperatura baixa a média e pode ser liberado posteriormente quando a temperatura aumenta. Na segunda situação, há problemas na quantidade injetada de reagente e a amônia excedente não pode ser totalmente oxidada em N_2 no catalisador de oxidação e geralmente é emitida como N_2O.

Além disso, de acordo com os parâmetros da EMEP/EEA (2023), os veículos EURO VI tem fatores de consumo de combustível ligeiramente maiores do que os veículos EURO V, ou seja, a redução de poluentes locais obtida por veículos mais modernos ocorre às custas de um consumo levemente maior de diesel, o que aumenta as emissões de CO_2, especialmente em ciclos de direção urbana onde as velocidades médias de operação tendem a ser menores (Grigoratos et al., 2019). Desse modo, aponta-se que mesmo sendo possível a redução de emissão de determinados poluentes emitidos por veículos a diesel através de inovações tecnológicas, não é possível reduzir a emissão de CO_2, dado que isso é um produto inevitável da combustão de combustíveis fósseis e em alguns casos as emissões podem inclusive aumentar. Tornam-se necessárias então outras abordagens, como a eletrificação das frotas, para reduzir as emissões desse gás.

2.6 Desafios do projeto de redes de transporte público urbano

2.6.1 Complexidade do problema

De acordo com Ceder e Wilson (1986), o processo de planejamento de sistemas de transporte público pode ser dividido em cinco níveis: (A) projeto da rede; (B) determinação de frequências; (C) desenvolvimento de tabela horária de viagens; (D) programação do cronograma dos ônibus e alocação da frota; e (E) alocação da mão de obra. De maneira ideal, todos os níveis deveriam ser tratados simultaneamente durante o planejamento, mas devido à complexidade computacional envolvida isto se torna impraticável.

Considerando o nível A, tem-se o Problema de Projeto de Rede de Transporte Público (TNDP, do inglês *Transit Network Design Problem*) que envolve definir um conjunto de rotas de ônibus em uma determinada área, sendo cada rota determinada por uma sequência de paradas de ônibus, com a definição das vias utilizadas na rota; alterações em rotas também fazem parte do problema (Farahani et al., 2013; Guihaire; Hao, 2008).

Vale mencionar que, embora a nomenclatura TNDP seja mais comumente encontrada na literatura, ela é geralmente associada ao projeto de rotas, seja a criação de novas rotas ou alterações nas existentes, mas não com alterações na rede viária. Farahani et al. (2013) apresentaram uma formulação semelhante ao TNDP, porém ampliando-a ao Problema do Projeto de Rede de Transporte Urbano (PRTPU / UTNDP, do inglês *Urban Transportation Network Design Problem*), que abrange dois subproblemas, o Problema de Projeto da Rede Viária (PRV / RNDP, do inglês *Road Network Design Problem*) e o Problema de Projeto e Programação da Rede de Transporte Público (PTNDSP, do inglês *Public Transit Network Design and Scheduling Problem*), este último equivalente ao conjunto de problemas definidos por Ceder e Wilson (1986) e cuja terminologia foi consolidada por Guihaire e Hao (2008). De acordo com Farahani et al. (2013), são encontradas três definições principais do PRTPU / UTNDP na literatura: (1) o PRTPU / UTNDP busca construir novas vias ou ampliar a capacidade das existentes; (2) o PRTPU / UTNDP busca determinar a localização ideal das instalações a serem adicionadas a uma rede de transporte, sendo que as instalações podem ser representadas por nós ou segmentos da rede; e (3) o PRTPU / UTNDP trata de toda a hierarquia dos processos de tomada de decisão no planejamento de transportes e inclui planejamento estratégico, decisões táticas e operacionais. Os autores conduzem a revisão da literatura analisando principalmente estudos relacionados à topologia da rede, mas em diferentes níveis de planejamento.

Os autores definem as decisões estratégicas do PRTPU / UTNDP como decisões de longo prazo relacionadas às redes de transporte, incluindo as redes viária e de transporte

público; compõem este nível de planejamento a construção de novas vias e a expansão das existentes, bem como o projeto de rotas de ônibus. As decisões táticas estão relacionadas com a utilização eficaz da infraestrutura e dos recursos de redes de transporte urbano existentes, tendo como decisões possíveis a determinação dos sentidos e alocação de faixas de circulação viária, além da alocação de faixas exclusivas de ônibus. As decisões operacionais, por sua vez, são decisões de curto prazo, que estão principalmente relacionadas ao controle do fluxo de tráfego e gestão da demanda (Farahani et al., 2013). Desse modo, uma vez que o problema proposto nesta pesquisa envolve o projeto de rede de transporte público, sendo representado pelas vias e rotas onde serão implementadas políticas de mobilidade sustentável, políticas estas que estão relacionadas à topologia da rede e envolvem níveis distintos de planejamento estratégico e tático, a nomenclatura PRTPU / UTNDP define adequadamente o problema, confirmando, portanto, a sua adoção.

Por fim, cabe mencionar que Guihaire e Hao (2008) apontam que até mesmo os subproblemas propostos por Ceder e Wilson (1986), se analisados de maneira isolada, são classificados como NP-difícil do ponto de vista de complexidade computacional. Outras implicações relacionadas à complexidade surgem a partir de características como não linearidade, não convexidade, natureza multiobjetivo e variáveis discretas, presentes na formulação desses problemas (Baaj; Mahmassani, 1991; Cai et al., 2022; Farahani et al., 2013; Ye et al., 2021). A consequência desta constatação é a dificuldade de solução de problemas de projeto de rede através de métodos de solução exata, dada a complexidade computacional envolvida.

2.6.2 Metodologias de planejamento de redes de transporte

Várias metodologias podem ser utilizadas para o processo de tomada de decisão relacionadas ao planejamento do PRTPU / UTNDP com as variáveis propostas nesta tese, das quais destacam-se os métodos de decisão multicritério, as técnicas de simulação e as de otimização.

Os métodos de decisão multicritério não são exatamente ferramentas de modelagem, mas metodologias que servem de apoio para a tomada de decisões quando existem múltiplos objetivos, muitas vezes conflitantes. Podem ser empregados, por exemplo, para a definição de localização de corredores de ônibus ou escolha da tecnologia que irá compor uma determinada frota (Borchers; Ribeiro, 2022; Emami; Song; Khani, 2022; Hamurcu; Eren, 2020; Siqueira; Arantes, 2023). Entre as vantagens desse método estão a fácil aplicabilidade e a possibilidade de incorporar fatores subjetivos de forma quantitativa. Entretanto, uma das vantagens pode ser também uma desvantagem do método, já que os resultados podem ser sensíveis aos pesos atribuídos a cada critério justamente porque são subjetivos.

Os processos de simulação criam modelos computacionais dinâmicos que imitam o

comportamento de um sistema de transporte ao longo do tempo, permitindo testar cenários em um ambiente virtual sem custos exacerbados ou riscos do mundo real. Geralmente as simulações possuem escala macroscópica, mesoscópica ou microscópica. Na escala macro os sistemas são analisados de forma agregada, enquanto que na micro o comportamento de veículos e passageiros é analisada individualmente, sendo mais detalhada e computacionalmente intensiva. O nível meso é um intermediário entre os demais. Essa metodologia possui vantagens como a possibilidade de testar inúmeros cenários de forma relativamente barata, capturando aleatoriedades do sistema e suas respectivas dinâmicas temporais. Pode ser empregada, por exemplo, para testar eficácia de faixas exclusivas de ônibus ou o impacto ambiental da eletrificação de determinadas rotas de transporte público (Arasan; Vedagiri, 2010; Lajunen; Lipman, 2016; Lajunen, 2018; Yang et al., 2013). Entretanto, desenvolver e calibrar os modelos de maneira realística é um processo geralmente caro e demorado, sendo que os resultados são dependentes dos dados de entrada e dos pressupostos adotados para construir o modelo. Além disso, apesar de existirem ferramentas de código e acesso aberto como o SUMO (Simulação de Mobilidade Urbana, do inglês *Simulation of Urban MObility*), normalmente os processos de simulação são realizados em *software* proprietário e de código fechado, como por exemplo o VISUM® e o Aimsun®. Especialmente para simulação envolvendo veículos, é comum o uso do *software* Autonomie (Lajunen; Lipman, 2016).

As técnicas de otimização foram desenvolvidas a partir da área de pesquisa operacional, mais ligadas à engenharia de produção, mas já são aplicadas a planejamento de transporte há algumas décadas. No modelo clássico de planejamento de transportes em quatro etapas, ainda amplamente utilizado no Brasil, métodos de otimização podem ser utilizados, por exemplo, na etapa de alocação de tráfego e de transporte público, como os modelos desenvolvidos por Sheffi (1985). O desenvolvimento tecnológico e o avanço de pesquisas na área permitiu a complexificação dos problemas, com a inclusão cada vez mais frequente de distintas perspectivas e objetivos nos modelos, superando – em determinado grau – a perspectiva mais economicista adotada nos modelos de planejamento de transporte tradicionais, cujo foco recaía frequentemente sobre custos, seja em termos de custos financeiros ou tempos de viagem convertidos em índices financeirizados.

Otimização é uma metodologia matemática usada para encontrar a melhor solução possível dentro de um conjunto de alternativas, dado um objetivo específico e um conjunto de restrições. Nos problemas de transporte, os objetivos podem estar relacionados – como nos modelos clássicos – a minimizar custos e tempos de viagem, mas podem ser empregados também para maximizar acessibilidade, equidade social ou então minimizar emissões e impacto ambiental. Os modelos em grande escala tendem a ser bastante complexos e a qualidade dos resultados obtidos é fortemente dependente de como o problema foi formulado e dos dados de entrada utilizados. Ainda assim, são modelos que oferecem uma

grande flexibilidade tanto em termos de modelagem quanto de aplicação, sendo esses os principais motivos de escolha desse método para solução do problema proposto nesta tese, embora conforme supramencionado, outras técnicas poderiam ser utilizadas para abordar o problema sob diferentes óticas. Destaca-se que, embora também sejam implementados majoritariamente em *software* proprietário, são modelos que podem ser implementados em diversas linguagens de programação, permitindo a difusão da metodologia em acesso aberto.

Cabe mencionar que para análise de eletrificação de frotas, uma das metodologias mais difundidas é a de Custo Total de Propriedade (CTP, do inglês *TCO, Total Cost Ownership*), inclusive sendo empregada em documentos oficiais do governo federal para incentivo à eletrificação de frotas. A CTP é uma avaliação dos custos de todo o ciclo de vida de um projeto e inclui o preço de compra de um ativo, adicionando os custos de operação, manutenção e qualquer outro custo financeiro durante o período de projeto ou de concessão. Os dois volumes dos cadernos técnicos de eletrificação focam em modelos de negócios e financeirização dos projetos, relegando aspectos técnicos a um grau de menor importância e utilizando os benefícios ambientais como ferramenta retórica, mas o que é proposto nos cadernos é essencialmente como garantir modelos de negócio viáveis para a iniciativa privada (BRASIL, 2022b; BRASIL, 2022a). A CTP é utilizada como mecanismo de justificar a eletrificação de frotas, mas de um ponto de vista que reforça a lógica do capital, se valendo de uma necessidade real da população para promover a acumulação de recursos pela iniciativa privada.

Por fim, cabe apontar que existe um debate tangencial à escolha metodológica – mas não menos importante – relacionado à capacidade de produção tecnológica nacional visando um cenário de soberania tecnológica. Via de regra, as ferramentas citadas nessa subseção são produzidas internacionalmente, restando ao Brasil, seus cientistas e planejadores urbanos, apenas a aplicação dessas tecnologias, mas sem participação no desenvolvimento delas. Em BRASIL (2022a), são apresentadas ferramentas de avaliação de impacto de implantação de BRTs e de eletrificação de frota, sendo que a maioria delas também foram desenvolvidas por organismos internacionais e as que foram desenvolvidas nacionalmente focam principalmente em aspectos econômicos, não permitindo a análise de redes de transporte, por exemplo. Dessa forma, aponta-se que há no Brasil um cenário de dependência tecnológica em relação aos *softwares* de planejamento de transportes.

2.6.3 Modelos de emissões de escapamento em sistemas de transporte

Os modelos de emissões de escapamento em sistemas de transporte podem ser divididos em duas categorias principais, a saber: modelos de cima para baixo (do inglês *top-down*) e modelos de baixo para cima (do inglês *bottom-up*). Nos modelos de cima

para baixo, o consumo aparente de combustível observado nas regiões de interesse é utilizado como indicador de atividade e os fatores de emissão estão relacionados ao tipo de combustível. Nos modelos de baixo para cima, são considerados outros fatores como a distância anual percorrida para cada tipo de veículo, quantidade de veículos, o fator de emissão mais específicos, a autonomia e o volume de combustível consumido e, em níveis mais detalhados, as condições de tráfego ou velocidades (CETESB, 2022; EMEP/EEA, 2023).

De acordo com EMEP/EEA (2023) e IPCC (2006), os modelos são divididos em três níveis. O nível 1 (*Tier 1*) seria equivalente à abordagem de cima para baixo. Em IPCC (2006), o nível 2 (*Tier 2*) possui fatores de emissão específicos por país e o nível 3 (*Tier 3*) utiliza dados sobre a quantidade de combustível queimado na categoria de fonte para cada tecnologia relevante (tipo de combustível usado, tecnologia de combustão, condições operacionais, tecnologia de controle, manutenção e idade do equipamento), fatores de emissão específicos para cada tecnologia (tipo de combustível usado, tecnologia de combustão, condições operacionais, tecnologia de controle, fator de oxidação, manutenção e idade do equipamento). Já no modelo de EMEP/EEA (2023), o nível 2 utiliza distâncias percorridas para cada tecnologia de veículo e o número de veículos de cada categoria e cada tecnologia para calcular as emissões; os fatores de emissão são apresentados em unidade de massa por unidade de distância para cada categoria e tecnologia veicular. No nível 3, também são incluídas as velocidades médias, no caso os fatores de emissão são dependentes da velocidade média; outros fatores como fator de carregamento e declividade da via também podem ser utilizados. O nível 3 do modelo da EMEP/EEA (2023) também considera emissões de partida a frio (do inglês *termed 'cold-start' emissions*), embora elas não sejam consideradas nesta tese.

No Brasil, o inventário nacional de emissões e o modelo utilizado pela CETESB utilizam modelos de emissões de escapamento que se assemelham ao nível 2 do modelo da EMEP/EEA (2023). No inventário nacional, a metodologia geral utiliza fatores de emissão dependentes de distância percorrida específicos para o ano-modelo de veículo considerado ($g_{poluente}/km$) e depende do tipo de combustível utilizado, a frota circulante de veículos de cada ano-modelo considerado e a intensidade de uso, representada pela distância anual percorrida. Para determinados poluentes, como MP, foi utilizada a versão então vigente do Guia Europeu para Inventário de Emissões (EMEP/EEA, 2009) (Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2013). No modelo da CETESB (2022) também foi aplicada a metodologia geral do inventário. Ambos os modelos utilizam fatores de emissão dependentes da distância, mas não há detalhamento das velocidades médias nos modelos.

Por fim, um ponto de destaque é que apesar da metodologia geral empregada ser baseada em um modelo de baixo para cima, o modelo de emissão utilizado também depende do poluente analisado. Na metodologia da CETESB (2022), foi utilizada a abordagem de

baixo para cima para CO, NO_x, $NMHC$, $RCHO$ e MP, mas para dióxido de enxofre (SO_2) pode ser utilizada a abordagem de cima para baixo, considerando o teor de enxofre máximo admitido pela especificação do combustível. Para as emissões de CO_2, a CETESB também utiliza abordagem de cima para baixo, alegando a indisponibilidade de fatores de emissão veicular adequados ao cenário brasileiro. É comum a intercambialidade de modelos entre os diferentes organismos, por exemplo, no inventário nacional são utilizadas metodologias desenvolvidas pela CETESB e o contrário também é verdadeiro. Em caso de ausência de dados consolidados para o cenário brasileiro, os dois organismos recorrem a modelos do Guia Europeu para Inventário de Emissões para determinados poluentes. Em último grau, a capacidade de obter modelos precisos depende da disponibilidade de dados e da qualidade dos dados disponíveis.

2.6.4 Disponibilidade de dados e ascensão de políticas de dados abertos

2.6.4.1 Dados em um contexto de cidades inteligentes

O planejamento de mobilidade inteligente e de sistemas urbanos sustentáveis – e, portanto, de sistemas de mobilidade equitativos, inclusivos, acessíveis, sem barreiras, seguros, resilientes e saudáveis – exige dados. Entretanto, a aquisição de dados continua sendo um problema recorrente na área de transportes, pois apesar de dados serem fundamentais para a criação de iniciativas inteligentes e para projetos no contexto da emergência climática, em geral esses dados possuem custos elevados de coleta e processamento.

Também é verdade que o aprimoramento tecnológico permite que atualmente sejam coletados dados de maneira muito mais automatizada e acelerada. Dispositivos e sistemas com reconhecimento de localização capazes de coletar informações de localização e rastrear usuários foram implementados em muitas infraestruturas de cidades inteligentes nos últimos anos (Al-Hussaeni et al., 2018). Dispositivos de Sistema de Posicionamento Global (GPS, do inglês *Global Positioning System*) em veículos, telefones celulares, unidades de monitoramento fixas, veículos com sensores conectados a sistemas de informação e câmeras de trânsito urbano podem rastrear a mobilidade humana em grande escala, permitindo melhorias no planejamento urbano e na gestão do trânsito (Liu et al., 2021; Sainio; Westerholm; Oksanen, 2015; Wei et al., 2021). No transporte público, o uso de bilhetagem eletrônica permite saber qual usuário entrou no sistema e a que horas, gerando grandes conjuntos de dados sobre demanda e movimento de passageiros. Coletas adicionais de dados para obter informações detalhadas sobre o fluxo de passageiros se tornam cada vez menos necessárias, bastando tabular e analisar os registros eletrônicos para uma melhor gestão do sistema (Fiore et al., 2019; Al-Hussaeni et al., 2018; Kawasaki, 2015).

Entretanto, a coleta e o processamento desse volume sem precedentes de dados não

ocorre sem ameaças e riscos aos indivíduos que tem seus dados coletados, principalmente relacionados à exposição de dados de identificação do usuário, ao rastreamento e vazamento de dados. Nesse contexto, a preservação da privacidade consiste em proteger a identidade do usuário contra invasores externos e violações internas, evitando o uso não autorizado (Yamin et al., 2019). O avanço da tecnologia e da regulamentação deve proporcionar uma proteção eficaz da privacidade, caso contrário, poderá estabelecer as bases para uma sociedade de vigilância (Eckhoff; Sommer, 2014). No Brasil, a Lei nº 13.709 de 14 de agosto 2018, ou Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais, estabelece as normas para a proteção e tratamento de dados pessoais em território nacional, bem como a proteção de direitos fundamentais, particularmente a privacidade, a honra e a intimidade (BRASIL, 2018). Mesmo com uma legislação vigente, ela é bastante incipiente, o que pode gerar vulnerabilidades e riscos, principalmente em relação às chamadas iniciativas de cidades inteligentes baseadas em plataformas, como as empresas de viagens compartilhadas (Figueirôa-Ferreira et al., 2023).

Em termos de riscos diretos à privacidade, ataques para identificar usuários ou comprometer suas informações pessoais são preocupações críticas relacionadas à privacidade (Fang et al., 2020; Khan; Pervez; Abbasi, 2017). A identificação denota a ameaça de associar um identificador-chave, ou um pseudônimo de qualquer tipo, a um indivíduo (Ziegeldorf; Morchon; Wehrle, 2014). Pseudônimos ou pseudo identificadores são uma estratégia para tornar anônima a identidade dos usuários, sendo substituídos frequentemente para maior proteção. Sua aplicação pode ocorrer com qualquer identificador-chave de uma pessoa ou mesmo com veículos que podem enviar mensagens pelo canal sem fio de uma rede veicular (Al-Hussaeni et al., 2018; Eckhoff; Sommer, 2014; Fang et al., 2020; Goroff; Polonetsky; Tene, 2018). No entanto, a singularidade da trajetória de mobilidade espaço-temporal humana pode levar à identificação do usuário mesmo com processos de encriptação de identificadores (Fang et al., 2020; Lim; Taeihagh, 2018). Em redes veiculares, por exemplo, mesmo que os motoristas não possam ser identificados imediatamente, eles podem ser reidentificados porque agentes mal-intencionados podem rastrear seus movimentos captando transmissões sem fio assinadas pelos motoristas em diferentes locais. Além disso, cada pseudônimo ainda pode ser identificado para uma identidade base pela autoridade que o criou (Liu et al., 2021; Eckhoff; Sommer, 2014), isto é, mesmo com a pseudonimização, um eventual vazamento de dados da autoridade responsável poderia colocar os usuários em risco. Eckhoff e Sommer (2014) argumentam que não é possível alcançar privacidade total, mas reforçam que é hora de dar mais ênfase à privacidade, adotando medidas para a proteção técnica das informações dos usuários.

No que diz respeito à localização e rastreamento, a privacidade refere-se a garantir e preservar a proteção sobre a localização física do usuário. Essa é uma ameaça fortemente ligada à identificação porque, embora os identificadores-chave sejam anonimizados, as

sequências de localizações podem revelar os locais frequentemente visitados e as rotas preferidas do usuário, permitindo a identificação, reconstrução de vínculos sociais, opiniões políticas e religiosas, e, às vezes, trazendo consequências fatais (Liu et al., 2021; Yamin et al., 2019). Como os dispositivos com reconhecimento de localização são empregados por diferentes serviços, os dados dos usuários ficam vulneráveis em muitos conjuntos de dados.

Outra ameaça relacionada a grandes conjuntos de dados é a possibilidade de vazamento de informações. Icasiano e Taeihagh (2021) afirmam que um vazamento envolvendo dados da Uber em 2016 pode incluir dados de viagens e localização, além de outros dados que possibilitariam a identificação dos titulares das contas e suas atividades. Além disso, devido à sua natureza intensiva em dados, não é possível para os indivíduos verificarem se seus dados estão sendo usados de acordo com os termos de uso que eles concordaram; portanto, mesmo que não haja vazamento, eles ainda podem ser usados de forma não autorizada.

No que diz respeito aos desafios de segurança relacionados com os dados nas cidades inteligentes, outra ameaça potencial é o *ransomware*, um *malware* que encripta arquivos para impedir o acesso aos dados até que o proprietário pague um resgate (normalmente em criptomoeda para evitar rastreamento). No contexto das cidades inteligentes, uma possível classe de vítimas são as empresas que dependem dos dados para as suas operações. Em um cenário em que um ataque de *ransomware* tem como alvo um sistema de transporte público, ele poderia desativar a infraestrutura de pagamento através da qual as compras são feitas, levando a perdas financeiras, ou poderia ter como alvo as redes e a infraestrutura do sistema de controle dos trens ou ônibus da cidade (Habibzadeh et al., 2019). Além disso, os invasores podem aproveitar a estrutura das cidades inteligentes para criar e implantar *malware* autopropagável, que pode ser disseminado por várias redes conectadas (Sookhak et al., 2019).

Por fim, os dados dos cidadãos são normalmente acessados por diferentes empresas, órgãos governamentais e parceiros comerciais para diferentes fins (Sookhak et al., 2019). O fato de distintos agentes privados atuarem em várias esferas urbanas – seja por meio da operação de redes de telefonia e internet, pela prestação de serviços de viagens compartilhadas ou pela privatização dos sistemas de transporte público – faz com que a melhoria da gestão urbana prometida por entusiastas de cidades inteligentes seja apenas potencial, isto é, ao passo que o nível tecnológico atual permite identificar as linhas de desejo de viagens com facilidade e precisão, a mercantilização e a propriedade privada desses dados faz com que na realidade esse potencial não se concretize. O poder público muitas vezes sequer tem acesso a tais dados e a narrativa de "smartificação" das cidades corrobora, pelo contrário, para aprofundamento das disparidades sociais existentes. No contexto brasileiro, configurado por uma particular dependência tecnológica de outros países e pela ausência de empresas públicas em setores estratégicos como telecomunicações

e transportes, há uma ameaça de nível superior, que ultrapassa o nível individual e chega ao nível de ameaça à soberania nacional, isto é, com empresas de telefonia controladas por capital estrangeiro, sem um desenvolvimento de sistemas de tecnologia de informação próprios para coleta, processamento e armazenamento de dados, sem regras rígidas sobre o controle de privacidade de seus cidadãos, o país fica à merce dos ventos políticos que sopram no exterior e à merce dos investidores estrangeiros.

2.6.4.2 Dados abertos

Em uma tentativa da superação da falta de dados e de transparência governamental, houve um movimento nos últimos anos para que os governos compartilhassem seus dados, com as chamadas iniciativas de governança aberta. Dados abertos consistem em dados de interesse público publicados por governos, que se caracterizam por sua disponibilidade fácil e gratuita, ou seja, os dados abertos estão disponíveis sem nenhuma restrição e podem ser facilmente encontrados e acessados (Dinko; Jackiva; Budiloviča, 2021; Janssen; Matheus; Zuiderwijk, 2015; Mahrez et al., 2022; Parycek; Höchtl; Ginner, 2014; Veljković; Bogdanović-Dinić; Stoimenov, 2014). Os oito princípios dos dados abertos são (Open Government Working Group, 2007; Veljković; Bogdanović-Dinić; Stoimenov, 2014):

1. Completos: todos os dados públicos devem ser disponibilizados. Dados públicos são dados que não estão sujeitos a restrições de privacidade, segurança ou privilégios de acesso;
2. Primários: os dados devem ser coletados na fonte com o maior nível de detalhamento possível e não de forma agregada ou modificada;
3. Atuais: a disponibilidade deve ser feita tão rapidamente quanto necessário para preservar o valor dos dados;
4. Acessíveis: os dados devem estar disponíveis para a mais ampla gama de usuários e para as mais diversas finalidades;
5. Processáveis por máquina: os dados devem ser razoavelmente estruturados de modo a permitir o processamento automatizado;
6. Acesso não-discriminatório: os dados devem estar disponíveis para qualquer pessoa, sem necessidade de registro;
7. Formatos não-proprietários: os dados devem estar disponíveis em um formato sobre o qual nenhuma entidade tem o controle exclusivo;
8. Licenças livres: os dados não dever estar sujeitos a quaisquer direitos de autor, patentes, marcas comerciais ou regulamento secreto. Pode ser permitida uma razoável privacidade e restrições de privilégio e segurança.

Obviamente a análise sobre integridade das fontes de dados existentes, isto é, se os

dados estão completos, depende de uma classificação das fontes de dados necessárias para vários campos de pesquisa e para diferentes metodologias; essa análise será realizada nesta tese a partir da perspectiva de modelos de otimização, mas de modo geral os conjuntos de dados utilizados são similares a outras metodologias de planejamento de transportes.

No Brasil, o marco legal que regula esse movimento é a Lei Nº 12.527, de 18 de novembro de 2011, conhecida como Lei de Acesso à Informação (LAI), que busca dar transparência a processos decisórios através da abertura de dados governamentais (Brasil, 2011). Uma das principais funcionalidades da LAI é dar transparência sobre o orçamento público, empenhos financeiros e processos licitatórios, mas ao longo dos anos iniciativas para abertura de outros dados de gestão pública também foram sendo implementadas. A LAI estabelece que podem haver duas formas de cumprir as obrigações de acesso à informação, a transparência ativa que ocorre por meio da publicação proativa, isto é, a disponibilização da informação de maneira espontânea na internet de informações de interesse coletivo ou geral, produzidas ou custodiadas por órgãos e entidades e a transparência passiva, que ocorre por meio de atendimento de pedidos de informações feitos diretamente a órgãos e entidades públicas. Notadamente, a própria lei regulamenta quais informações não podem ser publicizadas, por exemplo, relacionadas a sigilo judicial ou a projetos de defesa e segurança nacional, e assegura que a publicação das informações deve respeitar liberdades e garantias individuais.

Assim como a coleta e processamento de grandes volumes de dados em iniciativas de cidades inteligentes, os dados abertos e a digitalização podem ajudar a resolver os problemas de acessibilidade e mobilidade, gerenciando em tempo real o tráfego, o transporte público e as emissões de transporte, recuperando-se de desastres e respondendo rapidamente a acidentes ou eventos climáticos extremos (Balogun et al., 2020; Consoli et al., 2017; Dinko; Jackiva; Budiloviča, 2021; Morishita-Steffen et al., 2021; Wen et al., 2020). Emergências como a pandemia da COVID-19 comprovaram a importância do gerenciamento de dados em tempo real, impulsionando o desenvolvimento de iniciativas de dados abertos (Hu et al., 2020).

Os dados abertos aumentam a transparência das ações do governo e também melhoram a adesão dos cidadãos à participação e ao desenvolvimento de políticas, aumentando assim as interações positivas entre os cidadãos e a administração da cidade (Consoli et al., 2017; Veljković; Bogdanović-Dinić; Stoimenov, 2014). Em alguns casos, os municípios relutam em compartilhar abertamente os dados da cidade devido a preocupações com a privacidade e os custos envolvidos na coleta e no processamento de dados (Wen et al., 2020). Em outros casos, os municípios precisam contar com os níveis estaduais ou nacionais de coleta de dados para obter informações sobre dados urbanos ou de mudanças climáticas, ou eles próprios sofrem com a capacidade limitada de obter esses dados. Especialmente nos chamados países em desenvolvimento, os dados urbanos e climáticos geralmente são

de propriedade de empresas privadas, enquanto pesquisadores e cidadãos não têm acesso a esses dados (Balogun et al., 2020).

Em termos técnicos, os dados podem conter vários problemas, especialmente os dados brutos, que geralmente têm baixa qualidade de informação devido a erros (Janssen; Matheus; Zuiderwijk, 2015). Questões de formatos e erros de banco de dados também representam um problema para processar e integrar os dados ao planejamento. Nesse sentido, as plataformas de publicação de dados podem desempenhar um papel fundamental nesse processo de governança aberta. Entretanto, apenas publicar dados abertos não é suficiente, as plataformas também devem incluir metadados e descrições dos processos de aquisição de dados, seguindo os requisitos para serem reutilizados (Parycek; Höchtl; Ginner, 2014; Veljković; Bogdanović-Dinić; Stoimenov, 2014).

Por fim, vale a pena mencionar que, apesar do potencial das iniciativas de dados abertos, a segurança para proteger dados massivos e as preocupações com a privacidade devem ser cuidadosamente abordadas (Borchers; Figueirôa-Ferreira; Fernandes, 2021; Docherty; Marsden; Anable, 2018; Sookhak et al., 2019), pois esses dados podem estar sujeitos à identificação do usuário e ser usados para fins de vigilância se a privacidade for negligenciada. Essas preocupações com a privacidade também devem considerar os níveis de exposição individuais e comunitários (Borchers; Figueirôa-Ferreira; Fernandes, 2021).

2.6.5 Planejamento responsivo *versus* planejamento indutivo

O contexto de emergência climática exige uma mudança de paradigma também no modo como os sistemas de transporte são planejados. Até então os modelos prediziam o comportamento das pessoas e a partir disso produziam as infraestruturas de acordo com essas predições, porém, esse modelo de decisão acarretou em uma priorização quase que incontornável de sistemas de transporte motorizados individuais. Desse modo, nesta tese é defendido que a mudança de modo e efetiva priorização de sistemas de transporte ativo e público apresenta menor chance de ocorrer sem que haja mudanças estruturais, inclusive na distribuição do espaço físico das vias urbanas. Do ponto de vista do planejamento, é necessário avançar para modos de planejamento indutivo, isto é, um planejamento que induza um determinado tipo de comportamento nas pessoas ao invés de utilizar modelos clássicos do tipo preditivos e responsivos, ou seja, aqueles que verificam os comportamentos passados e atuais das pessoas e os projetam no futuro. No contexto de literatura atual, o conceito que mais se aproxima dessa visão é o de Decida-então-Forneça (do inglês *"Decide-then-Provide"*) ao invés de Preveja-então-Forneça (do inglês *"Predict-then-Provide"*), embora o conceito ainda esteja em consolidação (Paddeu et al., 2024).

Evidentemente, essa transição não é simples. Nesta tese, embora esses preceitos

tenham sido utilizados como uma espécie de visão geral, ainda são utilizados dados indiretos de demanda atual (via número de viagens de transporte público atual). Mesmo assim, defende-se que sejam adotadas metas e desenvolvidos futuros cenários desejáveis e a partir disso, sejam elaboradas as políticas públicas necessárias para atingí-los. Um exemplo prático dessa transição é não definir vias para transporte público com o fluxo de ônibus na via como fator preponderante da decisão, mas realizar uma análise mais ampla na rede toda, considerando fatores como potencial redução de emissões como um fator adicional. Muito provavelmente, o fluxo de ônibus estará correlacionado com a redução das emissões, mas eventualmente mesmo vias com fluxos menores podem trazer contribuições importantes para o contexto de emergência climática. É uma mudança de paradigma de "nessa via tem tráfego elevado, é necessário implantar corredores" para "essa via tem papel central na redução de externalidades, portanto deve ser implantada infraestrutura exclusiva para transporte público". Esta tese busca desenvolver uma metodologia para que o processo de decisão englobe esse escopo mais amplo, não apenas em análises isoladas de vias ou rotas, mas uma análise que contempla toda a rede viária.

2.7 Técnicas de otimização aplicadas ao projeto de redes de transporte público urbano

De maneira complementar à elaboração desta tese, a autora realizou uma revisão sistemática da literatura sobre estudos de transporte e mobilidade urbana que empregam técnicas de otimização para atingir metas relacionadas à preservação do meio ambiente, sustentabilidade, transição energética ou mitigação de mudanças climáticas, dando origem a uma publicação em periódico (Borchers; Wittowsky; Fernandes, 2024). Uma vez que o objetivo do artigo oriundo desta revisão extrapola os da tese, a metodologia não será replicada neste texto e as tendências gerais da área de pesquisa serão apresentadas de maneira mais sucinta. Entretanto, para a fundamentação desta tese, foi analisado de maneira mais aprofundada um subgrupo de artigos da amostra contida no artigo supramencionado, cujos detalhes foram apresentados nesta subseção e na fundamentação da modelagem matemática presente no Capítulo 3. No Apêndice A estão compiladas as informações de cada estudo desse subgrupo da revisão sistemática.

Cabe apontar, entretanto, que no artigo supramencionado, foram incluídos apenas estudos que tinham alguma relação com aspectos de sustentabilidade, redução de emissões ou implementações tecnológicas no sistema energético de transportes, de modo que não foram incluídos estudos que abordam a otimização de sistemas de transporte público de maneira mais convencional e consolidada. Para referências a tais estudos não incluídos aqui, recomenda-se as revisões de Farahani et al. (2013), Guihaire e Hao (2008) e Kepaptsoglou

e Karlaftis (2009).

Considerando o PRTPU / UTNDP supramencionado para essa pesquisa, nota-se a necessidade de modelar um problema de otimização que permita determinar locais mais propícios à implantação de estratégias de mobilidade sustentável. De maneira sucinta, um modelo de otimização busca a melhor opção dentro de uma categoria de possíveis soluções ou então a configuração que melhor se adéque aos objetivos do projeto, visando um melhor aproveitamento dos recursos disponíveis. Em geral, os modelos podem focar em diferentes perspectivas: (i) passageiros – considerando seu comportamento ou interesses (por exemplo, número de transferências, conforto, distância e tempo de viagem); (ii) operadores – minimizando custos ou investimentos e maximizando o lucro; e (iii) comunidade – custos ambientais e externos e integrando o planejamento urbano e de transporte. Em essência, equilibrar os interesses de passageiros, operadores, reguladores e dos cidadãos em geral (comunidade), torna esse problema complexo de ser resolvido (Guihaire; Hao, 2008), e embora já existam estudos que abordam mais de uma perspectiva na modelagem, a vasta maioria da literatura foca principalmente na perspectiva de operadores (Borchers; Wittowsky; Fernandes, 2024).

A literatura apresenta o seguinte processo de modelagem matemática de um UTNDP: (1) variável de decisão, ou seja, o objetivo final do problema – definição de quais são as incógnitas a serem determinadas pela solução do modelo; (2) dados de entrada ou parâmetros – relacionados à rede física existente, aos dados de demanda e aos índices operacionais; e (3) funções objetivo e restrições do problema – as funções objetivo são determinadas para minimizar ou maximizar variáveis, enquanto que as restrições representam limitações dessas variáveis. Embora a formulação matemática destes problemas seja passível de ajustes, via de regra existem problemas de objetivo único, problemas com dois ou mais objetivos e problemas que são formulados em níveis ou estágios. Além da classificação por número de objetivos, os problemas possuem relação com a classificação matemática das equações formuladas, isto é, existem problemas lineares, não-lineares, convexos, não-convexos, com variáveis discretas e contínuas, etc. Após o processo de formulação matemática, são aplicados métodos de solução adequados à formulação proposta (Farahani et al., 2013; Guihaire; Hao, 2008; Kepaptsoglou; Karlaftis, 2009).

Problemas de objetivo único tendem a focar em apenas um interesse ou perspectiva. O interesse de passageiros foi formulado por Ma, Li e Han (2016), o de operadores por Elkamel et al. (2021), Gairola e Nezamuddin (2022), Haitao et al. (2019), Liu e Song (2017), Manzolli, Trovão e Antunes (2022), Marseglia et al. (2019), Moon et al. (2020), Piazza et al. (2021), Wang et al. (2021), Wang, Liao e Lu (2022), Wang et al. (2022), Wei et al. (2018) e Zaneti et al. (2022), e o de reguladores / cidadãos em geral / comunidade por Ye et al. (2022) e Zhou et al. (2021). Existem, ainda, autores que formulam o problema com múltiplos objetivos únicos (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Qiang et al., 2018; Ribau; Silva;

Sousa, 2014) ou com um único objetivo ponderado, nesse caso a ponderação é utilizada como solução para o conflito entre os objetivos. Em Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021), a ponderação foi utilizada para minimizar a soma dos custos de passageiros, de operadores e custos externos (incluindo emissões de poluentes).

Problemas com múltiplos níveis ou estágios podem ou não focar em perspectivas diversas. Por exemplo, o problema formulado por Zhang et al. (2022) buscava atender os interesses dos operadores, enquanto as formulações de Ye et al. (2021) incluíam passageiros e operadores e as de Sharma e Mathew (2011) e Si et al. (2012) incluíam as três perspectivas supramencionadas. Alguns autores modelaram os problemas de modo que o nível inferior ou a primeira etapa compreendesse modelos de distribuição e alocação de viagens e de divisão modal (Sharma; Mathew, 2011; Si et al., 2012; Ye et al., 2021).

Técnicas de otimização multiobjetivo são utilizadas para adereçar duas ou mais perspectivas, utilizando dois ou mais objetivos conflitantes no problema (Guihaire; Hao, 2008). Interesses de passageiros e operadores foram incluídos por Almasi et al. (2021); de passageiros e comunidade por Duran, Pradenas e Parada (2019); de operadores e comunidade por Ifaei et al. (2020) e Ribau, Vieira e Silva (2018); e as três perspectivas foram formuladas por Khathawatcharakun e Limsawasd (2022), Li e Lu (2021) e Sharma e Mathew (2011).

A seguir, são apresentados os parâmetros, variáveis de decisão, funções objetivo e métodos de solução de estudos relacionados ao tema desta pesquisa, contendo estudos de planejamento de transportes, com destaque para estudos que buscaram resolver o problema do projeto de rede, como definição de localização de estações e corredores de transportes, bem como estudos que incorporaram variáveis ambientais no processo de otimização, e estudos que incorporaram inovações tecnológicas como veículos elétricos ou que combinaram o planejamento de redes de energia com o de sistemas de transporte.

2.7.1 Parâmetros e dados de entrada

Os principais tipos de parâmetros utilizados em problemas de otimização de sistemas de transportes estão relacionados a dados de demanda, da rede viária e de transporte, de frota e dados de operação, da rede de energia (quando veículos elétricos são considerados no sistema), de uso do solo, de veículos, e relacionados aos custos e meio ambiente. Cabe apontar que uma maior disponibilidade de dados permite uma melhor formulação do problema de otimização, ao mesmo tempo que garante um modelo alinhado à situação real da cidade. Esses conjuntos de dados utilizados como parâmetros não diferem de outras técnicas de planejamento de transportes, de modo que infere-se que podem ser considerados uma espécie de pacote básico de dados necessários ao planejamento de transportes. Esse denominado pacote básico é o foco da presente investigação em termos de disponibilidade

pública para capitais brasileiras, discutido no Capítulo 4.

Em relação aos parâmetros de demanda, a maioria dos autores utiliza dados de matrizes de origem-destino, ou então o fluxo nos segmentos viários; Liu et al. (2017) aplicaram métodos de predição de demanda antes do processo de otimização. Os dados da rede de transporte incluem a localização (existente e potencial) de estações e terminais (Jiménez; Román, 2016; Khathawatcharakun; Limsawasd, 2022; Moon et al., 2020; Sebastiani; Luders; Fonseca, 2016; Zhang; Ceder; Cao, 2020; Zhou et al., 2021), de corredores exclusivos (Gao et al., 2020; Khoo; Teoh; Meng, 2014; Yang et al., 2022) e de rotas de transporte público (Almasi et al., 2021; Gouge; Dowlatabadi; Ries, 2013; Jánošíková et al., 2012; Jiménez; Román, 2016; Liu; Song, 2017; Moon et al., 2020; Sebastiani; Luders; Fonseca, 2016; Sun; Apland, 2019; Zhang; Ceder; Cao, 2020). É frequente o uso de dados de operação como tamanho da frota, cronograma, frequência, intervalos de operação e horários de partida e chegada (Almasi et al., 2021; Beltran et al., 2009; Liu; Song, 2017; Sun; Apland, 2019; Wang et al., 2021; Yang et al., 2022; Zhang; Ceder; Cao, 2020). Há também estudos que utilizam dados relacionados à rede viária, composto do conjunto de segmentos viários e nós; a partir desses dados foram derivados outros parâmetros como distância entre pontos na rede, capacidade do segmento e tempos de viagem (Beltran et al., 2009; Iliopoulou et al., 2019; Jiménez; Román, 2016; Liu; Song, 2017; Nguyen; Jung, 2021; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Si et al., 2012).

Parâmetros relacionados à rede de energia incluem demanda de eletricidade e consumo de energia (Brozynski; Leibowicz, 2018; Elkamel et al., 2021; Piazza et al., 2021; Wang et al., 2022; Xylia et al., 2019), localização das estações de recarga (Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Xylia et al., 2017) e capacidade, potência e eficiência de recarga nas estações (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Liu; Song, 2017; Piazza et al., 2021; Wang; Liao; Lu, 2022; Wang et al., 2022; Wei et al., 2018; Xylia et al., 2019; Zaneti et al., 2022). Os dados relacionados aos veículos vão desde informações operacionais como velocidade, aceleração e capacidade (Almasi et al., 2021; Ceder; Butcher; Wang, 2015; Gao et al., 2020; Liu; Song, 2017; Ribau; Silva; Sousa, 2014; Zhang; Ceder; Cao, 2020) até dados relacionados a massa, consumo médio de eletricidade por distância percorrida, estados mínimos e máximos de carga da bateria, tamanho, autonomia e capacidade da bateria e dinâmica de carga e descarga, quando o modelo incorpora veículos elétricos (Abdelwahed et al., 2020; Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Gairola; Nezamuddin, 2022; Iliopoulou et al., 2019; Liu; Song, 2017; Manzolli; Trovão; Antunes, 2022; Moon et al., 2020; Wang; Liao; Lu, 2022; Wang et al., 2022; Wei et al., 2018; Xylia et al., 2019; Ye et al., 2022; Zaneti et al., 2022; Zhou et al., 2021).

Os dados de custos podem ser representados por parcelas de custos totais dos sistemas, como custos de construção, aquisição de veículos, operação e manutenção (Wei et al., 2018; Xylia et al., 2019) ou podem agregar todos os custos de ciclo de vida (Bi;

Keoleian; Ersal, 2018; Ercan et al., 2015; Ribau; Silva; Sousa, 2014; Ribau; Vieira; Silva, 2018; Wang et al., 2022), sendo que a composição de custos geralmente varia de acordo com o objetivo do problema. Por fim, os parâmetros ambientais estão relacionados com a qualidade ambiental de segmentos da rede (Beltran et al., 2009) e as taxas de emissões de poluentes, como o CO_2 emitido pelo veículo (Brozynski; Leibowicz, 2018; Ercan et al., 2015; Khathawatcharakun; Limsawasd, 2022; Zhang; Ceder; Cao, 2020), emissão média de CO_2 por quilômetro para distâncias curtas (Aydin; Seker; Deveci, 2022) e emissões por velocidade (Feng; Zhang; Fujiwara, 2008).

2.7.2 Variáveis de decisão

Do ponto de vista matemático, os problemas de otimização para projeto de redes de transporte podem conter variáveis de decisão do tipo discreta, contínua ou podem ser mistos (Farahani et al., 2013).

Para estudos relacionados a transporte público por ônibus, as variáveis de decisão são a localização de estações (Ceder; Butcher; Wang, 2015; Wang et al., 2021), a determinação de rotas (Duran; Pradenas; Parada, 2019; Gairola; Nezamuddin, 2022; Iliopoulou et al., 2019; Jánošíková et al., 2012; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Wang et al., 2021), composição e dimensionamento da frota (Ercan et al., 2015; Gairola; Nezamuddin, 2022; Zhang; Ceder; Cao, 2020), definição de frequências (Duran; Pradenas; Parada, 2019; Jánošíková et al., 2012; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Zhang; Ceder; Cao, 2020), a programação de ônibus e alocação de frota (Gouge; Dowlatabadi; Ries, 2013; Jiménez; Román, 2016; Ma; Li; Han, 2016; Sun; Apland, 2019; Wang; Liao; Lu, 2022; Wang et al., 2022; Zhang; Ceder; Cao, 2020), o projeto de componentes do veículo (Gairola; Nezamuddin, 2022; Liu; Song, 2017; Ribau; Silva; Sousa, 2014; Ribau; Vieira; Silva, 2018), a localização de instalações de recarga (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Gairola; Nezamuddin, 2022; Iliopoulou et al., 2019; Moon et al., 2020; Sebastiani; Luders; Fonseca, 2016; Wang; Liao; Lu, 2022; Wang et al., 2022; Wei et al., 2018; Xylia et al., 2019; Zhang et al., 2022; Zhou et al., 2021), a capacidade de recarga (Gairola; Nezamuddin, 2022), os cronogramas de recarga (Abdelwahed et al., 2020; Manzolli; Trovão; Antunes, 2022; Zaneti et al., 2022) e os cronogramas de geração de energia (Elkamel et al., 2021).

Os estudos com redes multimodais – que incluem transporte público – utilizam como variáveis de decisão a atribuição de tráfego multimodal (Beltran et al., 2009; Meng et al., 2016), a localização de estações (Griswold et al., 2014; Wang et al., 2021; Yang et al., 2022; Ye et al., 2021), a capacidade de estações (Ye et al., 2021), a localização de corredores (Haitao et al., 2019; Khoo; Teoh; Meng, 2014; Marseglia et al., 2019), a determinação de rotas (Almasi et al., 2021; Beltran et al., 2009; Griswold et al., 2014; Yang et al., 2022), a definição de frequências (Almasi et al., 2021; Beltran et al., 2009; Griswold

et al., 2014; Yang et al., 2022), a localização de estações de recarga (Ye et al., 2022) e o dimensionamento de rede de energia (potência e capacidade) (Piazza et al., 2021).

2.7.3 Funções objetivo

Em relação às características matemáticas, as formulações das funções objetivo podem ser lineares, não lineares, mistas, convexas, não convexas, com variáveis discretas ou contínuas. Entretanto, nesta seção dar-se-á foco à aplicabilidade das funções e não à sua classificação matemática. As funções objetivo não necessariamente estão vinculadas ao modo de transporte considerado, isto é, uma mesma função objetivo de minimização de custos, por exemplo, pode ser utilizada em problemas de bicicletas, de ônibus ou multimodais e compreendem um padrão mais geral de técnicas de otimização, não estando necessariamente restritas ao tema desta tese. Em geral, existem alguns grupos de funções relacionadas à demanda, à rede (distâncias, tempos de viagem), aos veículos, aos custos e a aspectos ambientais. Estes grupos de funções, por sua vez, se relacionam às perspectivas consideradas em cada estudo.

Levando em conta a perspectiva de passageiros, as funções relacionadas à demanda incluem maximizar a demanda atendida (Iliopoulou et al., 2019; Marseglia et al., 2019; Wang et al., 2021), minimizar os custos de acesso de passageiros (Ceder; Butcher; Wang, 2015), maximizar o fluxo de passageiros (Haitao et al., 2019; Zhang et al., 2022) e maximizar o número total de viagens geradas (Ye et al., 2021), enquanto que as relacionadas à rede incluem maximizar a acessibilidade (Ma; Li; Han, 2016), minimizar distâncias (Wang et al., 2021), minimizar os tempos de viagem (Duran; Pradenas; Parada, 2019; Iliopoulou et al., 2019; Jánošíková et al., 2012; Khathawatcharakun; Limsawasd, 2022; Khoo; Teoh; Meng, 2014; Sebastiani; Luders; Fonseca, 2016; Sharma; Mathew, 2011; Zhang; Ceder; Cao, 2020) e minimizar os atrasos em interseções (Gao et al., 2020).

A perspectiva de operadores geralmente está atrelada aos custos e ao faturamento dos sistemas. As funções consistem em maximizar a receita, faturamento ou lucro (Elkamel et al., 2021; Piazza et al., 2021) e minimizar os custos (Almasi et al., 2021; Beltran et al., 2009; Brozynski; Leibowicz, 2018; Ceder; Butcher; Wang, 2015; Ercan et al., 2015; Griswold et al., 2014; Li; Lu, 2021; Ribau; Silva; Sousa, 2014; Sun; Apland, 2019; Xylia et al., 2017; Xylia et al., 2019; Zhang; Ceder; Cao, 2020; Zhang et al., 2022), sendo que alguns autores especificam o tipo de custo, que podem ser de projeto (Zhang et al., 2019), aquisição (Liu; Song, 2017; Xylia et al., 2017; Wei et al., 2018), implantação/construção de infraestrutura (Liu; Song, 2017; Xylia et al., 2017; Wei et al., 2018), operação (Manzolli; Trovão; Antunes, 2022; Jánošíková et al., 2012; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Sun; Apland, 2019; Xylia et al., 2017; Zaneti et al., 2022; Zhang et al., 2019), de recarga (Abdelwahed et al., 2020), ou externos (Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Si et al., 2012). O horizonte dos custos e

receitas também varia, podendo ser por hora (Yang et al., 2022), diário (Manzolli; Trovão; Antunes, 2022), anual (Ifaei et al., 2020; Piazza et al., 2021; Xylia et al., 2017; Wang; Liao; Lu, 2022) ou correspondente ao ciclo de vida (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Ercan et al., 2015; Wang et al., 2022).

De forma mais ampla, pode-se considerar a perspectiva e os interesses da comunidade em geral, nesse caso as funções estão relacionadas a aspectos socais, ambientais e energéticos. Os estudos buscam maximizar a equidade ambiental (Zhou et al., 2021) e os benefícios sociais (uma função dos custos de viagem, custos de infraestrutura, impactos na saúde, colisões no trânsito e impactos ambientais) (Doorley et al., 2020), minimizar as emissões (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Duran; Pradenas; Parada, 2019; Ercan et al., 2015; Gouge; Dowlatabadi; Ries, 2013; Jánošíková et al., 2012; Jiménez; Román, 2016; Ribau; Silva; Sousa, 2014; Ribau; Vieira; Silva, 2018; Sharma; Mathew, 2011; Xylia et al., 2017; Xylia et al., 2019; Ye et al., 2022), minimizar o impacto ambiental (Khathawatcharakun; Limsawasd, 2022; Li; Lu, 2021), maximizar a autonomia de operação de veículos elétricos (Gairola; Nezamuddin, 2022), minimizar as perdas na rede e o desvio de tensão (Zhang et al., 2022), minimizar o número de estações de recarga (Moon et al., 2020; Sebastiani; Luders; Fonseca, 2016) e minimizar o consumo de combustível (Nguyen; Jung, 2021; Ribau; Silva; Sousa, 2014; Xylia et al., 2017; Xylia et al., 2019) e de energia (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Qiang et al., 2018; Xylia et al., 2017; Xylia et al., 2019).

2.7.4 Restrições

As restrições configuram de fato as limitações reais do problema de otimização, e estão intrinsecamente ligadas aos parâmetros, variáveis de decisão e funções objetivo, variando de acordo com a formulação do problema. A natureza matemática dessas equações é importante, assim como a das funções objetivo, porque podem adicionar complexidade ao problema. Em geral estão relacionadas ao percentual de demanda atendido ou nível de serviço desejado (Ceder; Butcher; Wang, 2015; Duran; Pradenas; Parada, 2019; Haitao et al., 2019; Jánošíková et al., 2012; Li; Lu, 2021; Marseglia et al., 2019; Piazza et al., 2021; Sharma; Mathew, 2011; Wang; Liao; Lu, 2022; Ye et al., 2021; Zhang; Ceder; Cao, 2020), à operação dos sistemas de ônibus (frota, frequência, rotas) (Almasi et al., 2021; Beltran et al., 2009; Duran; Pradenas; Parada, 2019; Ercan et al., 2015; Gouge; Dowlatabadi; Ries, 2013; Haitao et al., 2019; Iliopoulou et al., 2019; Jánošíková et al., 2012; Jiménez; Román, 2016; Manzolli; Trovão; Antunes, 2022; Moon et al., 2020; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Sebastiani; Luders; Fonseca, 2016; Sun; Apland, 2019; Wang; Liao; Lu, 2022; Wang et al., 2022; Zhang; Ceder; Cao, 2020), à capacidade da rede (Doorley et al., 2020), à área de serviço (Haitao et al., 2019), à autonomia da bateria de veículos elétricos (Ribau; Silva; Sousa, 2014; Ribau; Vieira; Silva, 2018; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Wei et al.,

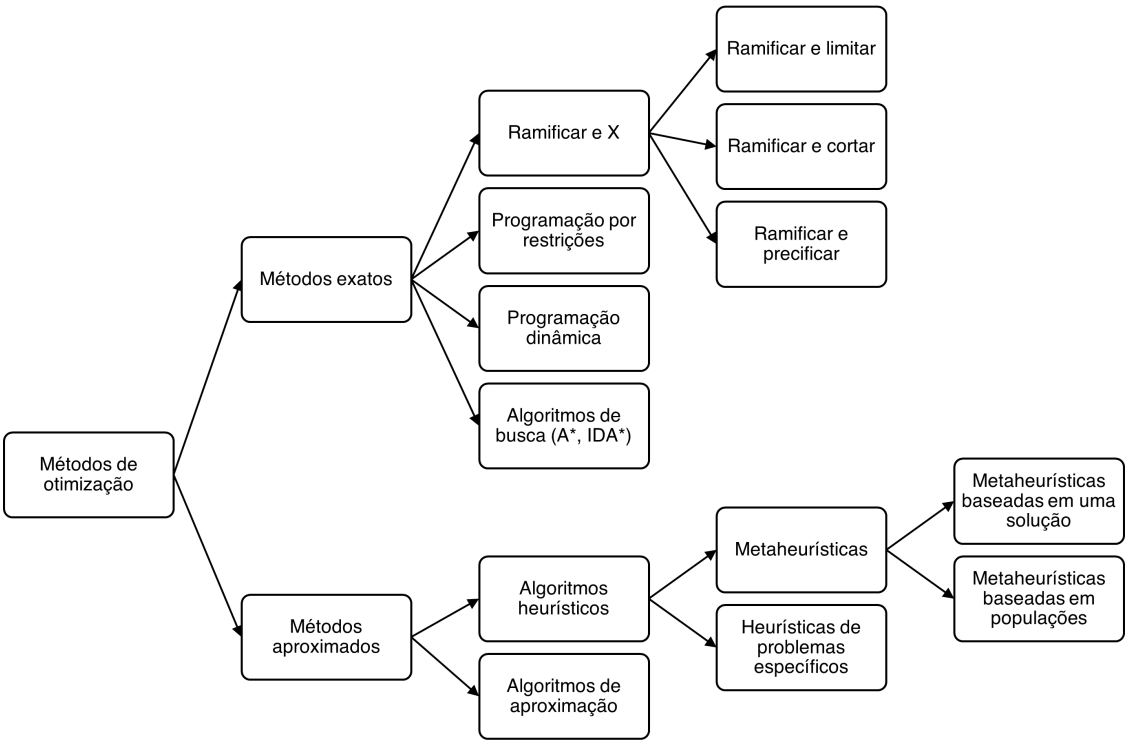
2018; Ye et al., 2022; Zhou et al., 2021), à capacidade da bateria (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Brozynski; Leibowicz, 2018; Gairola; Nezamuddin, 2022; Manzolli; Trovão; Antunes, 2022; Piazza et al., 2021; Wang; Liao; Lu, 2022; Zaneti et al., 2022), ao estado de carga (Abdelwahed et al., 2020; Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Iliopoulou et al., 2019; Sebastiani; Luders; Fonseca, 2016; Wang; Liao; Lu, 2022; Ye et al., 2022; Zaneti et al., 2022), à dinâmica de descarga e recarga (Brozynski; Leibowicz, 2018; Piazza et al., 2021; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Wei et al., 2018; Zaneti et al., 2022), ao número de estações de recarga (Moon et al., 2020; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Zhang et al., 2022), à potência e capacidade da estação de recarga (Abdelwahed et al., 2020; Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Elkamel et al., 2021; Gairola; Nezamuddin, 2022; Liu; Song, 2017; Piazza et al., 2021; Ye et al., 2022; Zaneti et al., 2022; Zhang et al., 2022; Zhou et al., 2021), ao orçamento disponível (Gairola; Nezamuddin, 2022; Ma; Li; Han, 2016; Marseglia et al., 2019; Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi, 2021; Sharma; Mathew, 2011; Wang et al., 2021; Ye et al., 2021; Ye et al., 2022; Zhang; Ceder; Cao, 2020; Zhou et al., 2021), às emissões (Griswold et al., 2014; Qiang et al., 2018) e à capacidade ambiental (Li; Lu, 2021).

2.7.5 Métodos de solução

Talbi (2009) classificou os métodos clássicos de otimização em exatos e aproximados, conforme pode ser observado na Figura 5. Entre os métodos exatos, tem-se os algoritmos de ramificar e limitar, cortar e precificar (do inglês *branch and bound, branch and cut, and branch and price*, respectivamente), a programação dinâmica e por restrições e algoritmos de busca do tipo A* e de aprofundamento iterativo (do inglês *iterative deepening algorithms*). Os métodos aproximados foram subdivididos pelo autor em métodos heurísticos e de aproximação. Os heurísticos foram novamente subdivididos em heurísticas de problemas específicos e metaheurísticas. Por fim, as metaheurísticas podem ser baseadas em uma única solução ou baseadas em populações.

Os métodos de solução estão intrinsecamente ligados à complexidade da formulação do problema e à escala de aplicação. Para a solução de problemas de otimização linear com variáveis contínuas, existem algoritmos exatos eficientes e, em geral, não existe a necessidade para utilizar metaheurísticas nesse tipo de problema. Para problemas não lineares quadráticos e convexos contínuos, alguns algoritmos exatos podem ser usados para resolver problemas de instâncias pequenas ou moderadas; para problemas de larga escala, metaheurísticas são boas candidatas de solução. Por outro lado, problemas de programação inteira, isto é, problemas com variáveis discretas, são difíceis de resolver porque a região factível não é um conjunto convexo; métodos como o de ramificar e limitar podem ser usados para pequenas instâncias, mas se tornam inaplicáveis em instâncias moderadas e grandes por ineficiência computacional (Farahani et al., 2013; Talbi, 2009).

Figura 5 – Métodos de otimização clássicos.



Fonte: Adaptado de Talbi (2009).

As metaheurísticas constituem uma alternativa importante para resolver problemas de projeto de rede, classificados como NP-difícil, devido à alta complexidade decorrente da estrutura desses problemas, seja por não linearidade, não convexidade, presença de variáveis discretas ou tamanho da rede analisada (Cai et al., 2022; Farahani et al., 2013; Guihaire; Hao, 2008; Talbi, 2009; Ye et al., 2021). Entretanto, apesar de elas não exigirem nenhuma propriedade matemática do problema para resolvê-lo, não há garantia de que elas sejam capazes de encontrar soluções ótimas globais (Farahani et al., 2013; Guihaire; Hao, 2008; Talbi, 2009).

Problemas de objetivo único geralmente são formulados como problemas lineares, sendo possível solucioná-los com métodos exatos, através de *softwares* comerciais como o CPLEX® (Abdelwahed et al., 2020; Brozynski; Leibowicz, 2018; Ceder; Butcher; Wang, 2015; Gairola; Nezamuddin, 2022; Gouge; Dowlatabadi; Ries, 2013; Jiménez; Román, 2016; Liu; Song, 2017; Manzolli; Trovão; Antunes, 2022; Xylia et al., 2019) e o Gurobi® (Piazza et al., 2021; Wang et al., 2021; Wang; Liao; Lu, 2022; Wei et al., 2018; Ye et al., 2022; Zhou et al., 2021), mas também são utilizados algoritmos de aproximações contínuas (Soriguera; Jiménez-Meroño, 2020), métodos heurísticos genéricos (Beltran et al., 2009; Ceder; Butcher; Wang, 2015; Ma; Li; Han, 2016; Marseglia et al., 2019; Wang et al., 2021) e específicos como algoritmos genéticos (do inglês *genetic algorithms*) (Beltran et al., 2009; Doorley et al., 2020), de busca de cucos (do inglês *cuckoo search*) (Sadeghi; Aghayan; Ghaznavi,

2021), otimização por enxame de partículas (do inglês *particle swarm optimisation*), de cardume de peixes artificiais (do inglês *artificial fish swarm*) (Qiang et al., 2018), baseados na inteligência de colônias de formigas (do inglês *ant colony intelligence*) (Nguyen; Jung, 2021), híbrido composto por busca tabu (do inglês *tabu search*) e algoritmo genético imune (Wang et al., 2022) e simulações de tráfego (Gao et al., 2020). Para solucionar problemas em níveis, foram utilizadas técnicas de otimização linear (Si et al., 2012; Ye et al., 2021), em alguns casos através de *softwares* comerciais como o CPLEX® (Muren et al., 2020).

A maioria dos problemas multiobjetivo, assim como os problemas em níveis, são do tipo NP-difícil, podendo apresentar funções não lineares, não convexas, com variáveis discretas ou serem aplicados em redes de grande porte, e portanto, estes problemas geralmente são solucionados através de métodos baseados em heurísticas e metaheurísticas (Farahani et al., 2013; Guihaire; Hao, 2008; Talbi, 2009). A revisão de Farahani et al. (2013) apontou que os principais tipos de metaheurísticas utilizadas em problemas de transporte são algoritmos genéticos, busca tabu, colônia de formigas e otimização por enxame de partículas. Na revisão de literatura realizada para esta tese, os principais métodos de solução de problemas multiobjetivo foram aqueles baseados em otimização por enxame de partículas (Iliopoulou et al., 2019) e algoritmo genético (Almasi et al., 2021; Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Duran; Pradenas; Parada, 2019; Ribau; Silva; Sousa, 2014; Zhang; Ceder; Cao, 2020), com destaque para o NSGA-II (Algoritmo genético de classificação por não dominância II, do inglês *Non-dominated Sorting Genetic Algorithm II*) (Almasi et al., 2021; Ifaei et al., 2020; Khathawatcharakun; Limsawasd, 2022; Khoo; Teoh; Meng, 2014; Kolak; Feyzioğlu; Noyan, 2018; Ribau; Silva; Sousa, 2014; Ribau; Vieira; Silva, 2018; Sebastiani; Luders; Fonseca, 2016; Sharma; Mathew, 2011; Zhang et al., 2022).

2.7.6 Estudos similares ao proposto nesta tese

De forma não exaustiva, nessa subseção pretende-se discutir os estudos encontrados na literatura que mais se aproximam ao modelo idealizado para essa tese; são debatidos principalmente as características da modelagem e dos métodos de solução, bem como o uso de *softwares* comerciais e a coleta de dados para a parametrização do problema. Também é feita uma breve análise dos estudos brasileiros que aplicam técnicas de otimização para objetivos relacionados ao planejamento de transportes.

Khoo, Teoh e Meng (2014) aplicaram um método de otimização para determinar vias para implantação de faixas exclusivas de ônibus. A operação dessas faixas também é variável de decisão do problema, isto é, a modelagem busca decidir quais as melhores localizações e os melhores intervalos de tempo de operação das faixas com o intuito de diminuir o tempo médio de viagem de transporte público e demais veículos da rede. O estudo considerou operação das 6 da manhã até o meio dia, em intervalos mínimos de

15 minutos. Os autores consideram a perspectiva de passageiros de transporte público e não modelam nenhuma variável ambiental, aplicando o modelo na região central de Kuala Lumpur, capital da Malásia. Em relação aos dados de entrada do modelo, eles foram obtidos com os operadores do sistema de ônibus e com a autoridade municipal responsável, os dados de demanda foram determinados a partir de séries históricas e os tempos de embarque e desembarque foram coletados pelos próprios autores. A solução do problema de otimização foi feita com NSGA-II através do *software* comercial de microssimulação Paramics. Os destaques dos resultados são que uma reserva maior de faixas de ônibus exclusivas poderia melhorar o desempenho dos ônibus, a eficácia de faixas exclusivas é afetada pelo nível de demanda de tráfego sem ônibus, e a mudança de modo poderia aumentar a eficácia das faixas exclusivas e reduzir os atrasos encontrados tanto por ônibus como pelos demais veículos da rede.

Ercan et al. (2015) utilizaram um método de otimização para determinar uma combinação ideal de frota de ônibus, com o objetivo de minimizar os custos do ciclo de vida, as emissões de CO_2 e poluentes atmosféricos (sob a ótima de danos à saúde). Apesar de formularem um problema com objetivos múltiplos, os autores utilizaram uma formulação de função objetivo ponderada, de modo que o problema pôde ser resolvido por Simplex. Os autores consideraram 6 tecnologias e combustíveis veiculares distintos, diesel, híbrido (diesel-elétrico), elétrico a bateria, biodiesel (B20), gás natural comprimido e gás natural liquefeito. Embora não considerem velocidade diretamente no estudo, os autores utilizaram três ciclos de direção. O ciclo de Manhattan em Nova York, EUA é caracterizado por paradas frequentes e operação em velocidades mais baixas devido ao congestionamento, semáforos frequentes e muitas paradas; o ciclo de Distrito Central de Negócios (do inglês *Central Business District*) é um ciclo hipotético que regula a velocidade em 32,19 km/h (20 mph) com paradas em frequência igual, gerando também taxas constantes de aceleração e desaceleração para todas as paradas; e o ciclo de Los Angeles representa uma operação entre áreas urbanas e suburbanas. Os resultados obtidos pelos autores apontaram que em ciclos de direção com tráfego intenso e congestionado, como o de Manhattan, o ônibus elétrico a bateria foi o tipo de veículo dominante na composição da frota e isso ocorreu devido às suas significativamente baixas emissões de CO_2 e custos comparáveis de danos à saúde relacionados à poluição do ar, apesar de seu alto custo inicial. Por outro lado, os ciclos de condução Distrito Central de Negócios e o de Los Angeles permitiram composições de frota mais heterogêneas, com mais ônibus híbridos. Ônibus a diesel raramente foram selecionados pelo modelo como parte da frota ótima, enquanto que ônibus a gás natural comprimido foram sugeridos para alguns cenários, mas de maneira limitada, principalmente devido aos custos da infraestrutura de abastecimento. Os autores apontaram ainda que, embora os ônibus gás natural comprimido tenham os custos de danos à saúde mais baixos comparado a outras opções de combustível como o diesel, eles emitiram quantidades significativas de CO e NO_x durante a fase de operação

(emissões de escape) e GEE (como CH_4) ao longo de seu ciclo de vida.

Xylia et al. (2017) desenvolveram um modelo para otimizar a distribuição de infraestrutura de carregamento para ônibus elétricos, testando-o na rede de ônibus de Estocolmo, Suécia. O problema foi formulado como um MILP (Programação Linear Inteira Mista, do inglês *Mixed Integer Linear Programing*) e solucionado através do CPLEX®. Os autores definiram que as rotas não eletrificadas seriam operadas com veículos a biodiesel ou biogás. A rede considerada era composta por 143 rotas e 403 paradas; os parâmetros da rede foram obtidos junto à operadores de transporte, agências de energia e na literatura da área. O principal apontamento deste estudo foi que a otimização tanto do ponto de vista de custos quanto do consumo de energia, demonstrou que os custos do sistema de BEB variaram apenas marginalmente aos custos de sistemas a diesel ou a biogás. Os menores custos de "combustível" para ônibus elétricos equilibraram os altos custos de construção de infraestrutura, mas para além disso, a partir da eletrificação da frota houve uma redução significativa nas emissões e no consumo de energia, na ordem de 51% e 34%, respectivamente.

Bi, Keoleian e Ersal (2018) aplicaram um método de otimização para determinar a localização de estações sem fio de recarga de ônibus elétricos, buscando minimizar custos, emissões de GEE e consumo de energia. O estudo foi realizado considerando uma análise do ciclo de vida, com foco em determinar os tamanhos das baterias dos ônibus elétricos. Os autores utilizaram duas abordagens de solução. Na primeira, foram formulados três problemas de objetivo único, enquanto que na segunda, foram formulados dois problemas bi-objetivo, combinando as seguintes equações da primeira formulação: (1) custos do ciclo de vida e emissões de GEE e (2) custos do ciclo de vida e energia. Os problemas foram solucionados por algoritmo genético e o modelo foi testado na Universidade de Michigan, Ann Arbor, EUA. Os resultados de maior interesse para essa tese são o de que quando minimizados os GEE, mais de 90% da proporção relativa de ônus advém do consumo de eletricidade (cerca de 17% é relacionada ao carregamento noturno e cerca de 80% ao carregamento diurno), enquanto que os ônus relativos à implantação da infraestrutura corresponderam a cerca de 3%. Esse padrão mostrou-se bastante similar quando o objetivo foi minimizar o consumo de energia. Quando observada a função objetivo de custos, a construção da infraestrutura de recarga foi de pouco mais de 10%, enquanto que os custos de energia para recargas diurna e noturna correspondem a cerca de 60% e a menos de 10%, respectivamente; as baterias compuseram pouco mais de 15% dos custos. Este estudo contribuiu para a decisão de não acrescentar o planejamento de infraestrutura de recarga no modelo, de modo a não aumentar a complexidade e devido ao baixo percentual de participação nos custos totais (embora os custos de infraestrutura de recarga não sejam desprezíveis). Salienta-se que no estudo dos autores, a recarga de oportunidade durante a operação diária se apresentou como mais cara, porém menos poluente, enquanto que a

recarga na garagem à noite apresentou um perfil contrário: mostrou-se mais barata, porém mais poluente devido à base da energia ser carvão ou outras fontes poluentes.

Iliopoulou et al. (2019) utilizaram um método de otimização para determinar rotas de ônibus elétricos e a localização de infraestrutura de recarga, buscando minimizar custos para o usuário (tempo médio de viagem e satisfação da demanda dos passageiros) e o número de carregadores rápidos. O problema proposto pelos autores foi do tipo problema de projeto da rede de rotas de transporte público (do inglês, *Transit Route Network Design Problem*) e envolveu determinar não quais rotas existentes seriam eletrificadas, como proposto por Gairola e Nezamuddin (2022) e Xylia et al. (2017), e sim resolver o problema clássico de geração de rotas, porém aplicado a ônibus elétricos. Empregou-se modelagem multiobjetivo e os autores utilizaram uma Otimização de Enxame de Partículas Multiobjetivo (MOPSO, do inglês *Multi-objective Particle Swarm Optimization (MOPSO)*). Como estudo de caso, os autores consideraram a rede de *benchmark* de Mumford (Mumford, 2013). Cabe mencionar que esse estudo embasou diversas decisões sobre parâmetros do modelo desta tese.

Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021) desenvolveram um algoritmo de busca baseada em cucos (do inglês, *cuckoo search based approach*) para solucionar um problema de projeto de rede de transporte e definição de frequências (TNDFSP, do inglês *Transit Network Design and Frequency Setting Problem*), buscando minimizar a soma ponderada dos custos de passageiros, de operadores e custos externos (incluindo emissões de poluentes). No modelo foram utilizados ônibus elétricos e a diesel e o estudo de caso foi a rede de *benchmark* de Mandl (Mandl, 1979). Para estimar as emissões de ônibus a diesel, os autores utilizaram o modelo da EEA na versão de 2009.

Gairola e Nezamuddin (2022) utilizaram um método de otimização para projetar um sistema de ônibus elétricos à bateria, incluindo as rotas e os terminais a serem eletrificados, o número e tamanho dos carregadores rápidos, a frota necessária e tamanho de bateria, analisando diferentes estratégias de recarga de oportunidade, com o objetivo de maximizar a extensão diária de rotas eletrificadas. Os autores aplicaram o modelo de objetivo único na cidade de Nova Delhi, Índia, em uma rede com 254 rotas e 126 terminais. O método de solução adotado foi o CPLEX®. Assim como Bi, Keoleian e Ersal (2018), os resultados obtidos pelos autores mostraram que os custos de construção de estações de recarga corresponderam a um percentual baixo (nesse caso, 4%) dos custos totais. O estudo serviu de base para a formulação de algumas equações do modelo desta tese, bem como para averiguação de parâmetros.

Em relação ao cenário brasileiro, as buscas na revisão sistemática retornaram dois estudos que se relacionam com o proposto nesta tese. Sebastiani, Luders e Fonseca (2016) utilizaram simulação discreta e otimização para avaliar o consumo de energia dos ônibus e a localização ideal das estações de recarga, buscando minimizar tanto o número de estações

de recarga quanto o tempo médio adicional que os ônibus param para recarregar. O processo de simulação englobou um modelo dinâmico que considerava as forças opostas ao movimento do ônibus (forças de fricção e arrasto), bem como diferentes perfis de elevação das rotas e comportamento dos motoristas, permitindo uma estimativa bastante precisa do consumo de energia. Os tempos adicionais de parada nas estações para recarga, resultado da simulação, foram inseridos no método de otimização como uma das funções objetivo. Nesse estudo, foram utilizadas seis rotas expressas do sistema BRT de Curitiba - PR como estudo de caso; segundo os autores as rotas foram consideradas porque representam o maior número de passageiros transportados. O método de solução adotado foi simulação (para estimar os níveis de energia de cada ônibus) e uma versão de algoritmo genético elitista controlado do NSGA-II, disponível no pacote de otimização do MATLAB e utilizado pelos autores.

Zaneti et al. (2022) utilizaram um método de otimização para determinar o cronograma de recarga de ônibus elétricos buscando minimizar os custos operacionais da estação de recarga. O foco desse estudo estava na otimização dos custos de energia comprados e vendidos à rede de energia elétrica, considerando produção de energia fotovoltaica para abastecer o sistema de ônibus. Os autores desenvolveram uma abordagem dinâmica baseada em um método de horizonte rolante para resolver o problema e o estudo de caso foi no campus da Unicamp, em Campinas - SP, que possui um ônibus elétrico em operação. A implementação ocorreu na linguagem AMPL (do inglês *A Mathematical Programming Language*) e o CPLEX® foi utilizado como método de solução.

Em uma busca mais abrangente englobando outros estudos que utilizaram técnicas de otimização para planejamento de redes de transporte, que tenham sido produzidos por autores vinculados ao Brasil ou tenham cidades brasileiras como estudo de caso, encontram-se os estudos de Arbex e da Cunha (2015) e Arbex (2020). Em Arbex e da Cunha (2015), os autores buscaram minimizar os custos de passageiros e operadores do sistema, resolvendo um TNDFSP. O método de solução proposto foi um Algoritmo Genético de Objetivo Alternado e o modelo foi aplicado na rede de Mandl. Em sua tese de doutorado, Arbex (2020) lidou novamente com o TNDFSP, buscando minimizar custos de passageiros e de operadores e desenvolvendo algoritmos genéticos como métodos de solução. Entretanto, o foco do trabalho foram linhas estruturais do tipo tronco-alimentador e um estudo de caso foi realizado com rotas de ônibus noturnas em São Paulo. Arbex (2020) aplicou seu modelo em uma rede com 343 nós, sendo dentre eles 32 terminais e 1202 segmentos, mais que o dobro da escala de Mumford3 (Mumford, 2013), uma das maiores redes de *benchmark* utilizadas na literatura para o problema de projeto de rede de transporte público.

Embora dentro da mesma área, os objetivos desta tese diferem dos propostos por Arbex (2020). Mesmo assim, os apontamentos para estudos futuros realizados pelo autor

se relacionam com as contribuições da tese aqui realizada. Ao realizar um estudo de caso com dados detalhados de operação e demanda (dados de GPS e bilhetagem eletrônica), o autor apontou a dificuldade de encontrar instâncias semelhantes para reproduzir seu modelo, principalmente devido às restrições de disponibilidade de dados sobre demanda e oferta de transporte público das cidades. Em uma tentativa de sanar tal dificuldade, o modelo proposto nesta tese busca trabalhar com dados mais amplamente disponíveis, embora dessa simplificação decorram problemas de maior imprecisão do modelo. Além disso, nesta tese também são incluídas as características de infraestrutura disponível, como a pré-existência de sistemas segregados de operação e a influência desses sistemas sobre a velocidade operacional. Estes apontamentos estão alinhados com os observados a partir da literatura e compuseram o direcionamento de desenvolvimento desta tese.

2.8 Apontamentos críticos, lacunas de pesquisa e contribuições ao conhecimento científico

A revisão sistemática proporcionou o conhecimento e a análise crítica sobre as técnicas mais modernas relacionadas ao assunto e à proposta dessa tese. Nesse sentido, a partir da análise do estado da arte sobre modelos de otimização para mobilidade sustentável, ficou evidenciada a necessidade de modelos matemáticos de otimização que sejam abrangentes à cidade do ponto de vista social, econômico e ambiental.

Embora as etapas de levantamento de dados e parametrização dos problemas de otimização possam ser consideradas de algum modo triviais, a revisão da literatura apontou para duas situações diversas nos estudos de otimização. Um primeiro grupo de estudos foca em aprimorar o desenvolvimento matemático e computacional dos modelos, cujas aplicações e testes em redes de transporte ocorrem em redes teóricas, simplificadas ou em redes de *benchmark*, como a de Sioux Falls (LeBlanc; Morlok; Pierskalla, 1975), de Mandl (Mandl, 1979) e de Mumford (Mumford, 2013), sendo a rede Mumford3 uma das maiores redes de *benchmark* utilizadas na literatura para o problema de projeto de rede de transporte público, com 127 nós e 425 segmentos; compõem alguns exemplos desse grupo os estudos de Arbex e da Cunha (2015), Cai et al. (2022), Iliopoulou et al. (2019), Jiang (2022), Li et al. (2016), Si et al. (2012), Ye et al. (2021), Zhang et al. (2022). O segundo grupo de estudos traz aplicações práticas em redes reais e de maior porte, entretanto, em geral, possuem formulações matemáticas mais simplificadas, normalmente compostas por problemas de objetivo único e funções lineares; compõem alguns exemplos desse grupo os estudos de Abdelwahed et al. (2020), Beltran et al. (2009), Doorley et al. (2020), Ercan et al. (2015), Gairola e Nezamuddin (2022), Gao et al. (2020), Gouge, Dowlatabadi e Ries (2013), Griswold et al. (2014), Haitao et al. (2019), Jánošíková et al. (2012), Jiménez e

Román (2016), Liu e Song (2017), Manzolli, Trovão e Antunes (2022), Marseglia et al. (2019), Moon et al. (2020), Qiang et al. (2018), Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021), Sun e Apland (2019), Wang et al. (2021), Wang, Liao e Lu (2022), Wei et al. (2018), Xylia et al. (2017), Xylia et al. (2019), Yao et al. (2020), Ye et al. (2022), Zaneti et al. (2022), Zhou et al. (2021).

Como um exemplo dessas simplificações, é possível citar que os modelos que utilizam consumo de energia na formulação empregam valores dependentes da distância e não incluem parâmetros de velocidade ou condições de tráfego, embora alguns autores tenham utilizado fatores de consumo mais conservadores como forma de abordar essa limitação (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Gairola; Nezamuddin, 2022; Iliopoulou et al., 2019; Xylia et al., 2017; Zaneti et al., 2022). Uma outra limitação desse grupo de estudos é que os métodos de solução utilizados geralmente são implementados em *softwares* proprietários (Abdelwahed et al., 2020; Gairola; Nezamuddin, 2022; Gouge; Dowlatabadi; Ries, 2013; Jiménez; Román, 2016; Liu; Song, 2017; Manzolli; Trovão; Antunes, 2022; Wang; Liao; Lu, 2022; Wei et al., 2018; Xylia et al., 2017; Xylia et al., 2019; Zhou et al., 2021).

De modo geral, entende-se que há uma alternância entre uma complexidade maior aplicada ao modelo ou à rede. Essa descoberta aponta para algumas lacunas de pesquisa relacionadas à disponibilidade de dados, reprodução dos modelos de otimização e aplicação prática dos modelos propostos, isto é, quanto esses modelos aderem à necessidade real dos sistemas de mobilidade urbana. Persiste, portanto, como uma lacuna de pesquisa, a aplicação de problemas mais complexos – e que retratem de maneira mais aproximada a realidade – à redes de grande porte. Evidentemente, esse tipo de solução encontra-se bastante avançada em estudos operacionais de transporte público, mas ainda permanece pouco aplicado a estudos que incluem aspectos ambientais e sociais. Entre as principais restrições encontradas para avançar o estudo desse tipo de lacuna estão a disponibilidade de dados e a capacidade de processamento computacional para solução dos problemas. Acerca da disponibilidade de dados, é pouco comum que os estudos de otimização proponham debates sobre os dados necessários para a modelagem desse tipo de problema. A procedência dos dados está altamente relacionada com parametrização, a replicabilidade dos modelos e a qualidade dos resultados, mas parece ser tratada como uma questão menor na literatura de otimização. Esta tese busca trazer algumas contribuições nesse sentido, tanto na discussão sobre a produção e distribuição de dados abertos sobre sistemas de transporte público em capitais brasileiras, na proposição de um modelo tão complexo quanto os dados disponíveis permitam e na solução desse modelo para um estudo de caso real em uma rede de grande porte.

Além disso, as formulações relacionadas ao contexto de emergência climática e de implantação de frotas elétricas é uma área de estudo recente. Na revisão sistemática de Farahani et al. (2013), os autores apontam como direcionamento de pesquisas futuras

para o PRTPU / UTNDP a inclusão de funções objetivo e restrições que contenham fatores ambientais. Os veículos e ônibus com combustíveis alternativos, especialmente os elétricos, também ganharam uma maior atenção ao longo da última década. Mesmo os estudos elaborados nessa área tendem a negligenciar a reestruturação viária, focando principalmente em melhorias tecnológicas. Essa foi outra lacuna observada na literatura. Não foram localizados na literatura de otimização estudos que vinculam o processo de eletrificação de rotas à rede viária. Nesta tese, ambas as estratégias são analisadas, partindo do pressuposto de que os desafios impostos pelo contexto de emergência climática são grandes demais para que se confie em uma solução única. Busca-se aqui, utilizar uma abordagem mais integradora da cidade e dos sistemas de transporte, analisando diferentes aspectos de ambos. Essa iniciativa também tem o propósito de apresentar uma metodologia para o processo de tomada de decisão de sistemas de transporte sustentáveis que foquem em toda a rede urbana e não apenas em determinados corredores ou rotas de maneira isolada. Até o momento, as metodologias encontradas no contexto nacional para determinação de eletrificação de frotas de transporte público urbano por ônibus relegam o processo de análise técnica das redes para segundo plano, focando em aspectos de ordem econômica e utilizando-se dos aspectos de sustentabilidade ambiental e social como mera retórica para realização de investimentos e suas respectivas taxas de retorno.

Em relação à implementação em *softwares* proprietários, para além dos exemplos supramcitados, Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) evidenciaram que na área de otimização, as ferramentas para implementação dos algoritmos de solução são comerciais, proprietárias e de código fechado, figurando entre as principais MATLAB®, GAMS®, AMPL®, CPLEX®, Gurobi® e simuladores de tráfego como Aimsun®, Paramics e VISSIM®. Uma quantidade menor de estudos utiliza ferramentas de código aberto como Python, SUMO e MATsim. Em outras técnicas de planejamento de transportes, conforme mencionado na subseção 2.6.2, também são utilizadas ferramentas proprietárias, principalmente VISSIM®, VISUM® e TransCAD®. Esse cenário levanta, necessariamente, o debate sobre soberania tecnológica e desenvolvimento de ferramentas e código aberto para a solução de problemas complexos, como é o caso da mobilidade urbana no contexto de emergência climática. Embora muitas das empresas acima mencionadas forneçam licenças para a academia, o poder público precisa pagar por essas tecnologias majoritariamente – se não totalmente – importadas. Uma contribuição desta tese, embora embrionária, é desenvolver o modelo proposto em *software* de código aberto e fazer apontamentos teóricos relacionados ao desenvolvimento de tecnologia nacional para a replicação desses modelos.

Capítulo 3

Caracterização do modelo, modelagem matemática e método de solução

Neste capítulo é apresentada a caracterização do problema de otimização que, conforme descrito na seção 2.6, pode ser classificado como um problema de projeto de rede de transporte público urbano - PRTPU / UTNDP. O problema proposto busca trazer soluções e suporte à tomada de decisão para etapas de planejamento estratégico e tático (Farahani et al., 2013), não focando em aspectos operacionais do sistema. O projeto de rede consiste em determinar em quais vias deve ser construída infraestrutura prioritária para circulação exclusiva de ônibus e quais rotas de ônibus existentes devem ser eletrificadas. Consequentemente, o problema aborda também a composição da frota, embora não se debruce sobre a questão de otimizar a frequência e, consequentemente, a frota das rotas.

Em relação às perspectivas adotadas na formulação do problema, a dos passageiros é abordada indiretamente, assumindo-se que a implantação de vias de circulação exclusiva reduz os tempos de viagem dentro do veículo. A questão da qualidade e conforto também são tratadas de maneira indireta, uma vez que ônibus elétricos emitem menos ruídos e produzem menos vibração durante o trajeto. Esses benefícios também se estendem aos motoristas e cobradores. As perspectivas dos operadores e da comunidade/sociedade são diretamente consideradas nas funções objetivo do problema. Se analisado sob as dimensões de sustentabilidade, o problema aborda as três dimensões diretamente nas funções objetivo, sendo que a função objetivo 1 é formulada para minimizar custos (perspectiva econômica), enquanto que a função objetivo 2 representa as dimensões ambiental e social, ao buscar minimizar emissões de CO_2 e poluentes locais como o MP e NO_{x}.

Assim como formulações clássicas do PRTPU / UTNDP, o problema proposto nessa tese também apresenta um inerente conflito entre as perspectivas adotadas, representadas em ambas as funções objetivo. Ao passo que a minimização dos custos implica em maiores emissões, a minimização das emissões implica em um aumento dos custos. A formulação

multiobjetivo busca trazer luz justamente às soluções que permitem as melhores relações de troca entre ambas as perspectivas. Mesmo buscando a elaboração de um modelo abrangente, claramente ainda estão presentes diversas limitações. Portanto, são assumidas as premissas para a formulação e delimitação do escopo do problema, as quais se relacionam à: demanda, rede, frota e emissões.

Relacionadas à demanda:

- A oferta de transporte público atende a demanda e, portanto, não são consideradas expansões do sistema.

Relacionadas à rede:

- A velocidade dos ônibus em cada segmento é dependente do tipo de fluxo de tráfego (segregado ou misto). Não são consideradas interrupções eventuais na via, como, por exemplo, pela presença de acidentes ou outros eventos esporádicos não previsíveis;
- Não são consideradas possíveis alterações nas rotas pré-existentes. O projeto de rotas recai em outro problema dentro da classe de problemas de projetos de redes de transporte, do tipo operacional, vide Kepaptsoglou e Karlaftis (2009) e em especial para estudos no Brasil vide Arbex (2020);
- Não são diretamente considerados os períodos de operação das vias exclusivas existentes no início do período de análise, isto é, considera-se que as faixas e pistas exclusivas operam durante 24 horas por dia;
- As vias exclusivas não precisam estar conectadas. Embora a conectividade da rede de vias exclusivas seja fundamental do ponto de vista de implementação prática, a implementação computacional dessa restrição não é trivial. Na literatura, estudos sobre a implantação de vias exclusivas – para bicicletas ou transporte público – divergem acerca da implementação ou não dessa restrição. Doorley et al. (2020) e Liu, Szeto e Long (2019) não exigem que os caminhos ou trajetórias de ciclovias sejam conectados. Mesmo quando essa restrição é considerada, a implementação é um procedimento custoso. Khoo, Teoh e Meng (2014) agruparam os segmentos candidatos em K grupos dentro do conjunto de candidatos, e o modo como o problema foi formulado força que todos os segmentos do grupo sejam selecionados para garantir conectividade da rede, isto é, a conectividade da rede foi feita *a priori*. A implementação ocorreu no *software* de simulação Paramics, com solução pelo NSGA-II, e apesar de o estudo de caso ser aplicado na Região do Vale de Klang, que compreende Kuala Lumpur, capital da Malásia, os autores aplicaram o modelo apenas no centro da cidade, considerando 1.075 segmentos como candidatos à implementação de faixas exclusivas e analisaram apenas 10 rotas de ônibus que circulam pelo centro. Mesmo assim, os autores apontaram que sua metodologia necessitou de um tempo considerável de processamento e, obviamente, quanto maior for a rede, mais tempo o modelo de simulação demandará. Mesbah, Thompson e

Moridpour (2012) desenvolveram um modelo para implantar ciclovias, apresentando como restrição de conectividade um grafo conectado, sem descrever matematicamente a restrição. Os autores propuseram um algoritmo genético para solucionar o problema, com uma técnica de cruzamento específica na qual os pais são soluções factíveis e o ponto de cruzamento é selecionado no conjunto de pontos da rede que são compartilhados por ambos os pais, gerando descendentes que também são conectados e, portanto, factíveis. Se não existissem nós compartilhados entre os pais, o operador de cruzamento não produzia novas soluções. Os autores afirmaram que o procedimento era necessário pois técnicas genéricas de cruzamento produziram menos de 5% de soluções viáveis em uma rede de tamanho médio. Entretanto, a aplicação do modelo dos autores foi realizada em uma rede genérica em formato de grade com 42 nós, 142 segmentos, 15 pontos de origem e dois destinos, isto é, em uma rede de porte médio, cujos dados de demanda e fluxo eram fictícios. A partir da análise da literatura acerca de conectividade da rede – relaxada em alguns estudos e aplicada em redes de baixa complexidade em outros – nesta tese optou-se por relaxar a restrição de conectividade, dado o tamanho da rede e os demais elementos de complexidade do modelo. Salienta-se que essa é uma lacuna de pesquisa que deve ser investigada em estudos futuros.

Relacionadas à frota:

- A frota definida pelo problema de otimização será mantida conforme a frota em operação atualmente, ou seja, não serão consideradas expansões do sistema;
- Se a rota for eletrificada, todos os veículos da rota serão substituídos por veículos elétricos e os veículos atribuídos a uma determinada rota não são utilizados em outras rotas, isto é, não é permitido que os veículos façam *interlining*. Estas premissas foram adotadas para reduzir a complexidade computacional do problema de otimização, caso contrário as variáveis de decisão não seriam mais as rotas e sim os veículos e o problema recairia em um problema de atribuição de veículos, o que aumentaria as instâncias de decisão e o custo computacional. Além disso, a agregação da decisão por rotas e não por veículos traz outras vantagens operacionais como o planejamento de estações de recarga, embora este problema também esteja fora do escopo desta tese. Premissas semelhantes foram adotadas por Gairola e Nezamuddin (2022). A limitação mais proeminente dessa premissa é que, via de regra, a frota tende a ser maior do que na realidade ou, se há presença de *interlining* na programação das rotas, uma potencial contabilização incorreta da tecnologia utilizada em determinadas viagens, causando imprecisões tanto nos custos quanto nas emissões;
- Assume-se que ao longo do horizonte de projeto, a frota existente de ônibus a diesel com tecnologia EURO V (P7) precisará ser substituída para atender à legislação vigente sobre idade máxima da frota. Essa substituição ocorrerá a partir da eletrifi-

cação da frota ou com a substituição por veículos a diesel com tecnologia EURO VI (P8). Se uma rota for eletrificada e possuir veículos com a tecnologia EURO VI (P8), eles serão remanejados para outras rotas;

- Quando uma rota é eletrificada, os veículos são recarregados à noite na garagem, mas também é permitido realizar recarga de oportunidade na rede durante os períodos fora de ponta, o que garante que os preços de energia elétrica sejam constantes. Embora em outros países essa premissa não possa ser adotada, ela é válida para o modelo energético brasileiro, no qual os períodos de ponta e intermediários coincidem com o período de operação dos ônibus do pico da tarde, momento no qual, via de regra, os veículos não tem disponibilidade de tempo para serem recarregados. Entretanto, o modelo não realiza a programação operacional das recargas, não considera o planejamento da eletrificação de terminais e não analisa se há viabilidade técnica de implantação dos resultados obtidos sob a ótica de demanda energética;
- Entende-se que é comum o processo de revenda de veículos a diesel para outros municípios e que isso representa, na realidade, um custo menor para a renovação das frotas. Entretanto, independente da tecnologia adotada para renovação, os veículos antigos terão o mesmo valor de revenda e, portanto, estes valores foram suprimidos do presente cálculo. Além disso, embora solucione o problema de emissões localmente, a transferência desses veículos para outras cidades mantém o padrão de emissões nessa outra localidade. É necessário um debate mais amplo sobre os impactos ambientais e sociais dessa prática, embora isso não esteja dentro do escopo dessa tese;

Relacionadas às emissões:

- São consideradas emissões de gases e partículas cujos efeitos imediatos são mais localizados, principalmente relacionados a doenças respiratórias, como $MP_{2,5}$ e MP_{10} e NO_x, além de CO_2 que aborda impactos do setor de transporte nas mudanças climáticas a nível global. Não são consideradas de maneira direta inferências sobre as relações entre as emissões do sistema de transporte público, concentração de poluentes na atmosfera e hospitalizações e mortes decorrentes disso;
- As emissões totais dependem da tecnologia e da categoria dos veículos, bem como do tipo de fluxo de tráfego no segmento, ou seja, a construção de uma faixa exclusiva de ônibus altera a velocidade no segmento, o que muda os padrões de emissão no segmento e, consequentemente, na rede.
- A influência da declividade das vias não é considerada no cálculo do consumo de combustível e, consequentemente, das emissões. Assim como Xylia et al. (2017), assume-se que a partir de uma perspectiva sistêmica, os aumentos do consumo de energia em subidas serão compensados pelas descidas do percurso.

3.1 Modelo matemático

O modelo segue uma formulação multiobjetivo, com a presença de equações lineares e de variáveis de decisão binárias. Foram consideradas como estratégias de transporte sustentável a implantação de corredores exclusivos de transporte público na via e a eletrificação da frota de ônibus em operação. As frotas de ônibus são variáveis inteiras, que dependem, por sua vez, de uma variável binária que assume o valor 1 se uma determinada rota r é eletrificada e valor 0 caso contrário. Para as vias exclusivas de ônibus, uma variável binária assume o valor 1 se uma infraestrutura exclusiva para circulação de ônibus é construída no segmento e valor 0 caso contrário.

Para cada segmento l na rede de transporte, as variáveis podem assumir dois valores (0 ou 1). Como há n segmentos na rede, há 2^n combinações de construção de vias exclusivas na rede. O mesmo ocorre para a decisão de eletrificar determinada rota de ônibus r. Pela característica combinatorial do espaço de decisão, o problema é categorizado como do tipo NP-difícil (Guihaire; Hao, 2008; Farahani et al., 2013; Mesbah; Sarvi; Currie, 2008; Marseglia et al., 2019; Bi; Keoleian; Ersal, 2018). É extensamente consolidado na literatura que os métodos analíticos e exatos são aplicados quando o problema alvo pode ser formulado como um problema matemático conhecido, geralmente problemas de programação linear e alguns de programação inteira ou inteira mista. Entretanto, essa prática requer simplificações e tende a oferecer pouca flexibilidade de formulação. Além disso, se a complexidade de um algoritmo de solução for do tipo $O(c^n)$, ele é um algoritmo de tempo exponencial, onde c é uma constante real estritamente superior a 1; nesse tipo de algoritmo, o tempo de processamento para atingir uma solução exata varia conforme a complexidade do problema. Por exemplo, para um problema do tipo $O(2^n)$ com complexidade de tamanho 50, o tempo de busca de uma solução exata seria de mais de 35 anos (Talbi, 2009), embora possam ser usadas técnicas de linearização de problemas ou restrição do espaço de busca que torne esses métodos de solução executáveis em problemas de objetivo único, como foi o caso de Gairola e Nezamuddin (2022) e Xylia et al. (2017).

Em virtude das limitações previamente apresentadas, nas últimas décadas inúmeros estudos tem aplicado heurísticas e metaheurísticas como métodos de solução. Uma das vantagens dessas técnicas é que elas não são formuladas para um tipo particular de modelo matemático, nem requerem uma propriedade matemática do problema para conseguir apresentar as soluções, o que permite a adaptação delas para inúmeros problemas. Além disso, a velocidade computacional desses métodos é muito mais rápida do que os métodos exatos para problemas de programação inteira em geral, mas isso ocorre às custas da precisão da solução, ou seja, são métodos usados para soluções próximas aos pontos de ótimos globais, entretanto, não há garantia de convergência para o ponto de mínimo (ou máximo, quando pertinente) global (Guihaire; Hao, 2008; Farahani et al., 2013; Talbi,

2009).

O desafio deste estágio consistiu em elaborar um modelo replicável em cenários de grau intermediário de escassez de dados que seja capaz de atender a necessidade de um planejamento rigoroso dos sistemas de transporte público no contexto de emergência climática atual. Ao mesmo tempo que foram considerados os aspectos econômicos, já amplamente investigados em modelos de otimização e na área de planejamento de transportes de modo geral, foram incluídos aspectos ambientais como forma de sintetizar os benefícios proporcionados por esses sistemas à toda a sociedade. Embora esta tese avance a complexidade do modelo, modelos parcialmente similares já se encontram presentes na literatura, conforme apontado no Capítulo 2, de modo que o modelo aqui proposto foi adaptado das formulações de Borchers (2021), Ercan et al. (2015), Gairola e Nezamuddin (2022), Khoo, Teoh e Meng (2014), Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021) e Xylia et al. (2017). Especificamente para a formulação a respeito das emissões, foram utilizadas contribuições de IEMA (2017) e Vieira, Pereira e Andrade (2023) para adaptação do modelo europeu proposto pela EMEP/EEA (2023) ao cenário brasileiro. Essa adaptação ocorreu em virtude de os modelos brasileiros considerarem apenas categoria de veículo, idade e distância percorrida, enquanto que o modelo europeu considera além desses fatores, a velocidade operacional dos veículos; o modelo também possui parâmetros considerando diferentes percentuais de carregamento dos veículos e os perfis de declividade das vias, mas estes elementos não foram utilizados nesta tese.

Em relação à reprodução do modelo, a formulação foi adaptada de modo que dados básicos do sistema sejam suficientes para a aplicação do modelo. São dados de entrada necessários a rede de transporte, composta por nós e segmentos, as velocidades médias de cada segmento viário durante um dia típico de operação, as rotas, seus respectivos cronogramas de operação e o número de veículos que atende cada rota. Dados detalhados sobre a frota de ônibus, como número de veículos por subcategoria (miniônibus, padrão, articulado) em operação na rota, são capazes de produzir resultados mais precisos, entretanto o modelo pode ser aplicado mesmo que não haja dados sobre composição da frota disponíveis. Nesse caso, podem ser realizadas alocações da frota total de acordo com a frequência de operação de cada rota (Vieira; Pereira; Andrade, 2023). Embora esse procedimento possa gerar distorções no consumo de combustível e emissões, é uma alternativa para contornar a escassez de dados.

3.1.1 Parâmetros

A Tabela 1 apresenta todos os parâmetros utilizados no modelo matemático, englobando parâmetros de custos, emissões e consumo de energia, horizonte de projeto, e parâmetros operacionais como velocidade nos segmentos viários, incremento potencial

de velocidade, composição da frota, número de viagens diárias e anuais e relacionados à operação de ônibus elétricos, como estados de carga e capacidade da bateria.

Tabela 1 – Parâmetros do modelo.

Parâmetro	Descrição	Unidade
Custos		
γ_l^{c}	Custo unitário de construção de infraestrutura exclusiva de ônibus por unidade de comprimento, de acordo com a tipologia adotada para o segmento l	R$/km
$\gamma_{i,k}^{\mathrm{aq}}$	Custo unitário de aquisição de veículos de acordo com a tecnologia i e categoria k	R$/un.
$\gamma_{i,k}^{\mathrm{m}}$	Custo de manutenção de veículos por distância percorrida	R$/km
γ_i^{op}	Custo unitário de combustível (energia elétrica e diesel)	R$/kWh; R$/l
Emissões e consumo de energia		
FE_x^{c}	Fator de emissão unitário de construção de infraestrutura exclusiva de ônibus por unidade de comprimento	g/km
β_1, β_2, β_3, β_4, β_5, β_6, β_7	Coeficientes necessários para calcular os fatores de emissão dependentes da velocidade pelo modelo EMEP/EEA (2023)	[sem unidade]
RF	Fator de redução de emissão de veículos a diesel, de acordo com o método de controle de emissão	%
Outros parâmetros		
H	Horizonte de projeto	Anos
N_r^{op}	Número de dias equivalentes a um dia típico de operação de cada rota r por ano	Dias
Ext_l	Extensão do segmento viário l	km
t	Intervalos de tempo de operação diária	[sem unidade]
$\nu_{0,l,t}$	Velocidade média de tráfego no segmento viário l no período t no início do período de análise	km/h
$\Delta\nu_{l,t}$	Incremento de velocidade média de tráfego no segmento viário l no período t	%
FR_i	Fator de renovação da frota de acordo com a tecnologia adotada	[sem unidade]
m_{i,k,r,t_0}	Frota de veículos em operação no início do período de análise (t_0) por rota de ônibus r, tecnologia adotada i e categoria de veículo k	un.
$N_{i,k,r,t,t0}$	Número de viagens realizadas no início do período de análise (t_0) por tipo de tecnologia i e por categoria de veículo k na rota r no intervalo de tempo t	un.
$N_{ciclos\ eq.}$	Número de ciclos equivalentes de carga e descarga das baterias nos veículos durante um dia típico de operação	un.
SoC_{max}	Estado máximo admitido de carga da bateria no início da operação diária	%
SoC_{min}	Estado de carga mínimo da bateria	%
$CAP_{b,k}$	Capacidade da bateria b de acordo com a categoria de veículo k	kWh

Fonte: Autora (2025).

3.1.2 Conjuntos e índices

Nesta subseção são apresentados os conjuntos e índices utilizados para indexar as variáveis e parâmetros do modelo.

I: conjunto de todas as tecnologias de ônibus analisadas, indexadas por i

- $i = 1$: ônibus elétrico a bateria
- $i = 2$: ônibus a diesel EURO V (P7)
- $i = 3$: ônibus a diesel EURO VI (P8)

K: conjunto de categorias de veículos, indexados por k

- $k = 1$: ônibus midi, correspondente à categoria *urban buses midi* (<15 t) da EMEP/EEA (2023), inclusos miniônibus e ônibus midi
- $k = 2$: ônibus convencional, correspondente à categoria *urban buses standard* (15–18 t) da EMEP/EEA (2023), inclusos ônibus do tipo convencional e *padron*
- $k = 3$: ônibus articulados, correspondente à categoria *urban buses articulated* (>18 t) da EMEP/EEA (2023), inclusos ônibus articulados e biarticulados

L: conjunto de segmentos da rede onde há tráfego de ônibus, indexados por l

- $x_l^{existente}$: subconjunto de L onde há tráfego exclusivo de ônibus no início do período de análise

M: conjunto de frota de ônibus, indexada por m

P: conjunto de poluentes considerados, indexados por p

R: conjunto de rotas de ônibus, indexadas por r

T: conjunto de intervalos de tempo, indexados por t

3.1.3 Variáveis de decisão

x_l: variável binária que assume o valor 1 se uma tipologia de infraestrutura exclusiva para ônibus é construída no segmento l e 0 caso contrário

y_r: variável binária que assume o valor 1 se a rota de ônibus r é eletrificada e 0 caso contrário

3.1.4 Funções objetivo

3.1.4.1 Custos

A Equação 3.1 representa a função objetivo 1, que busca minimizar os custos dos operadores do sistema, sendo composta pelos custos de implementação das estratégias de

sustentabilidade, bem como os custos de manutenção e operação do sistema de ônibus. Os custos de aquisição de veículos e construção das vias exclusivas são computados uma única vez, enquanto que os custos de manutenção e operação são calculados anualmente e multiplicados por um número de anos que corresponde ao horizonte de análise do projeto (H). O detalhamento das parcelas dos custos é descrito na sequência.

$$min\ z_1 = C^{\text{construção}} + C^{\text{aquisição}} + H \cdot (C^{\text{manutenção}} + C^{\text{operação}}) \tag{3.1}$$

em que:

$$C^{\text{construção}} = \sum_{l \in L} \gamma_l^{\text{c}} \cdot Ext_l \cdot x_l \tag{3.2}$$

$$C^{\text{aquisição}} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \gamma_{i,k}^{\text{aq}} \cdot m_{i,k} \tag{3.3}$$

$$C^{\text{manutenção}} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} N_r^{\text{op}} \cdot \gamma_{i,k}^{\text{m}} \cdot N_{i,k,r,t}^{viagens} \cdot Ext_l \cdot \delta_r^l \tag{3.4}$$

$$C^{\text{operação}} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} N_r^{\text{op}} \cdot \gamma_i^{\text{op}} \cdot \alpha_{i,k}^{\text{op}}(\nu_{l,t}) \cdot N_{i,k,r,t}^{viagens} \cdot Ext_l \cdot \delta_r^l \tag{3.5}$$

$$N_r^{\text{op}} = N_{\text{dias úteis}} + \left(N_{\text{sábados}} \cdot \frac{N_r^{\text{sábados}}}{N_r^{dias\ úteis}} \right) + \left(N_{\text{dom. e feriados}} \cdot \frac{N_r^{dom.\ e\ feriados}}{N_r^{dias\ úteis}} \right) \tag{3.6}$$

$$\delta_r^l = \begin{cases} 1 \text{ se o segmento } l \text{ está na rota } r \\ 0 \text{ caso contrário} \end{cases} \tag{3.7}$$

Para melhor compreensão dos custos, $C^{\text{construção}}$ representa os custos totais de construção de infraestrutura; $C^{\text{aquisição}}$ os custos totais de aquisição de frota; $C^{\text{manutenção}}$ os custos anuais de manutenção de frota de ônibus elétricos e de ônibus a diesel; e $C^{\text{operação}}$ os custos anuais de operação (custos de combustível). Para melhor compreensão da formulação em geral, $m_{i,k}$ representa a frota total de veículos a serem adquiridos, considerando a tecnologia i e a categoria de veículo k; N_r^{op} o número de dias equivalentes a um dia típico de operação de cada rota r por ano; $N_{i,k,r,t}^{viagens}$ o número de viagens realizadas por tipo de tecnologia i e por categoria de veículo k na rota r no intervalo de tempo t; $\alpha_{i,k}^{\text{operação}}(\nu_{l,t})$ o consumo de combustível (energia ou diesel) dependente da velocidade $\nu_{l,t}$, da tecnologia adotada i e do tipo de veículo k; e δ_r^l é uma variável que delimita quais segmentos viários l pertencem a uma rota r.

Os custos de construção correspondem ao somatório do custo unitário de construção de via exclusiva para circulação de ônibus multiplicado pela extensão de vias exclusivas a serem construídas. São admitidas duas tipologias de via exclusiva a serem implantadas, pistas exclusivas e faixas exclusivas. Em geral, os Planos Diretores apresentam quais eixos urbanos terão um sistema de corredores de ônibus estilo BRT e o modelo pré-define as vias candidatas a essa tipologia (pista exclusiva) de acordo com a legislação municipal vigente; para todas as demais vias é atribuída a tipologia de faixas exclusivas de ônibus.

Os custos de aquisição são calculados a partir do somatório, para todas as tecnologias e categorias, do custo unitário de aquisição de cada veículo multiplicado pela frota a ser adquirida, pra cada tecnologia i e categoria k.

Os custos de manutenção são calculados pela soma do custo unitário de manutenção por distância percorrida de acordo com a tecnologia i e com a categoria de veículo k multiplicado pela extensão percorrida. O custo diário de operação é calculado pelo custo unitário do combustível utilizado – energia elétrica ou diesel – multiplicado pelo consumo e pela extensão percorrida; para considerar a influência da construção de infraestrutura exclusiva, o coeficiente de consumo de combustível é dependente da velocidade da via, que por sua vez, tem probabilidade de aumento caso seja construída nova via exclusiva no segmento viário. O detalhamento dessas relações é apresentado na subseção 3.1.5. Por fim, ocorre a multiplicação por N_r^{op} para obter uma estimativa anual dos custos de manutenção e operação.

O parâmetro N_r^{op} é uma estimativa do número de dias em que o padrão de viagens de um dia típico se repete em um ano; como os valores de distância percorrida são calculados para um dia útil típico, os sábados, domingos e feriados devem ser computados com um fator de redução em relação aos dias úteis. O fator de redução levou em consideração a realidade particular de cada rota, e corresponde à relação direta de redução de viagens em sábados e domingos ou feriados quando comparados com dias úteis, conforme a Equação 3.6; a equação é válida para todas as rotas que possuem operação em dias úteis. Para rotas que operam exclusivamente em domingos e feriados, o N_r^{op} corresponde ao número de domingos e feriados do ano ($N_{\text{dom. e feriados}}$). O ano de 2024 foi usado como referência, pois é compatível com as demais fontes de dados. Desse modo, tem-se que o total de dias úteis é de 254 dias o número de sábados é 50 e o de domingos e feriados é de 63.

3.1.4.2 Emissões atmosféricas

A Equação 3.8 representa a função objetivo 2, que busca minimizar as emissões de construção de vias exclusivas e as emissões de operação do sistema de ônibus, cujo detalhamento é apresentado na sequência. Assim como nos custos, as emissões de operação são calculadas anualmente e multiplicadas pelo horizonte de análise do projeto (H).

$$min\ z_2 = E^{\text{construção}} + \ H \cdot E^{\text{operação}} \tag{3.8}$$

em que:

$$E^{\text{construção}} = FE_x^{\text{c}} \cdot \sum_{l \in L} Ext_l \cdot x_l \tag{3.9}$$

$$E^{\text{operação}} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in K} \sum_{l \in L} \sum_{r \in R} \sum_{t \in T} N_r^{\text{op}} \cdot FE_{i,k,p}^{\text{op}}(\nu_{l,t}) \cdot N_{i,k,r,t}^{viagens} \cdot Ext_l \cdot \delta_r^l \tag{3.10}$$

Para melhor compreensão das emissões, $E^{\text{construção}}$ representa as emissões totais de

construção de infraestrutura prioritária para ônibus e $E^{\text{operação}}$ as emissões anuais totais de operação e circulação do sistema de ônibus (considerando emissões de escapamento). Para melhor compreensão da formulação em geral, $FE^{\text{op}}_{i,k,p}(\nu_{l,t})$ representa o fator de emissão unitário de operação dependente da velocidade ($\nu_{l,t}$), por tecnologia i, veículo k e poluente p por unidade de distância.

As emissões de construção correspondem ao somatório do fator de emissão por unidade de distância de construção de via exclusiva para circulação de ônibus multiplicado pela extensão de vias exclusivas a serem construídas. As emissões diárias de operação são calculadas pela multiplicação do fator de emissão por tecnologia i, por categoria de veículo k e por tipo de poluente p pela extensão percorrida. Também se aplicam aqui as relações de dependência entre tipo de tráfego na via, velocidade e consumo de energia, cujo detalhamento se dá nas restrições do problema e na seção 5.3. Por fim, esse valor é multiplicado por N^{op}_r para obter uma estimativa anual das emissões de operação. No modelo, são consideradas apenas as emissões de escapamento.

3.1.5 Restrições

As restrições do problema correspondem à determinação da velocidade de operação nos segmentos viários, à autonomia das baterias de ônibus elétricos, à frota a ser adquirida, ao número de viagens de cada rota, ao consumo de combustível e energia e à natureza matemática das variáveis. As restrições são apresentadas nas Equações 3.11 a 3.24 e são detalhadas nas subseções seguintes.

$$\nu_{l,t} = \begin{cases} \Delta\nu_{l,t} \cdot \nu_{0,l,t}, & \forall\ x_l = 1 \\ \nu_{0,l,t}, & \text{caso contrário} \end{cases} \tag{3.11}$$

$$\sum_{t \in T} \alpha^{\text{op}}_{i,k}(\nu_{l,t}) \cdot N^{viagens}_{i,k,r,t} \cdot Ext_l \cdot \delta^l_r \leq N_{ciclos\ eq.} \cdot (SoC_{max} - SoC_{min}) \cdot CAP_{b,k}, \quad \forall k, r, t, y_r = 1 \tag{3.12}$$

$$m_{i=1,k} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in k} \sum_{r \in R} m_{i,k,r,t_0} \cdot y_r, \quad \forall\ k, r, y_r \tag{3.13}$$

$$m_{i=2,k} = 0, \quad \forall\ r,\ y_r = 0 \tag{3.14}$$

$$m_{i=3,k} = \sum_{i \in I} \sum_{k \in k} \sum_{r \in R} m_{i,k,r,t_0} \cdot FR_i \cdot (1 - y_r) - \sum_{i=3} \sum_{k \in k} \sum_{r \in R} m_{i,k,r,t_0} \cdot y_r, \quad \forall\ r, y_r \tag{3.15}$$

$$N^{viagens}_{i=1,k,r,t} = \sum_i N^{viagens}_{i,k,r,t,t_0} \cdot y_r, \quad \forall\ k, r, t, y_r \tag{3.16}$$

$$N^{viagens}_{i=2,k,r,t} = 0, \quad \forall\ k, r, t, y_r = 0 \tag{3.17}$$

$$N^{viagens}_{i=3,k,r,t} = \sum_i N^{viagens}_{i,k,r,t,t_0} \cdot (1 - \mathrm{y}_r), \quad \forall\ k, r, t, y_r \tag{3.18}$$

$$FE_{EEA} = \frac{\beta_1 \cdot \nu_{l,t}^2 + \beta_2 \cdot \nu_{l,t} + \beta_3 + \frac{\beta_4}{\nu_{l,t}}}{\beta_5 \cdot \nu_{l,t}^2 + \beta_6 \cdot \nu_{l,t} + \beta_7} \cdot (1 - \mathrm{RF}) \tag{3.19}$$

$$\alpha_{i,k}^{\mathrm{op}}(\nu_{l,t}) = \begin{cases} 0,277778 \cdot FE_{EEA}, & \forall i = 1 \\ \frac{FE_{EEA}}{b \cdot (1-d) + c \cdot d}, & \forall i = 2,3 \end{cases} \tag{3.20}$$

$$FE_{i,k,p}^{\mathrm{op}} = \begin{cases} FE_{EEA}, & \forall i = 2,3, p = NO_{\mathrm{x}}, MP \\ \frac{FE_{EEA}}{b \cdot (1-d) + c \cdot d} \cdot (1-d) \cdot (b) \cdot (e), & \forall i = 2,3, p = CO_2 \end{cases} \tag{3.21}$$

$$x_l \in \{0,1\} \quad \forall l, x_l^{existente} \neq 1 \tag{3.22}$$

$$y_r \in \{0,1\} \quad \forall r \tag{3.23}$$

$$m_{i,k} \geq 0 \tag{3.24}$$

3.1.5.1 Restrição de determinação da velocidade nos segmentos viários

Partindo do pressuposto que a implantação de infraestrutura prioritária altera a velocidade de circulação dos ônibus na via, a Equação 3.11 estabelece a velocidade no segmento viário em cada intervalo de tempo t. No caso de ser implantada uma via exclusiva, a velocidade é incrementada por $\Delta\nu_{l,t}$ em relação à velocidade média observada no início do período de análise $\nu_{0,l,t}$; caso contrário a velocidade de análise permanece igual à velocidade média inicial $\nu_{0,l,t}$.

3.1.5.2 Restrição de determinação da autonomia das baterias elétricas

A Equação 3.12 determina que a autonomia da bateria (quando a rota é eletrificada) não pode ser ultrapassada, isto é, a distância diária total percorrida deve ser menor ou igual à energia operacional da bateria disponível diariamente. São levados em consideração o número de ciclos equivalentes de carga e descarga da bateria realizados durante o dia ($N_{ciclos\ eq.}$), o percentual máximo de carga da bateria no início da operação (SoC_{max}) e o limite mínimo ao qual a bateria pode chegar (SoC_{min}). É assumido que os veículos são recarregados à noite na garagem e que podem realizar recargas de oportunidade durante o dia durante o período de vigência de tarifas energéticas fora de ponta. As recargas de oportunidade permitem que o número de ciclos equivalentes por dia ($N_{ciclos\ eq.}$) seja maior que 1, consequentemente permitindo o aumento das distâncias percorridas diariamente.

Para efeitos de simplificação em termos de implementação computacional, a restrição foi aplicada ao veículo com maior número de viagens diárias em cada rota e foi utilizada a velocidade média nos segmentos no início do período de análise ($\nu_{0,l,t}$). Essa decisão foi tomada após testes em relação a incrementos de velocidade, nos quais foi possível observar que a implantação de infraestrutura exclusiva não era suficiente para fazer com que novas

rotas pudessem ser eletrificadas. Desse modo, a verificação do atendimento da restrição de autonomia foi implementada como uma etapa primária no código – fora do *loop* principal – e não sofreu alterações em consequência da variável x_l, o que ajudou a reduzir o tempo de processamento computacional.

3.1.5.3 Restrição de determinação da frota a ser adquirida

A Equação 3.13 estabelece que se a variável y_r assumir o valor 1, todos os veículos daquela rota serão substituídos por veículos elétricos de categoria k equivalente. Por outro lado, se y_r assumir o valor 0, ou seja, a rota não for eletrificada, a Equação 3.14 proíbe a compra de veículos do tipo EURO V (P7), para atender aos requisitos de renovação de frota. Por fim, a Equação 3.15 garante que se a rota não for eletrificada, os veículos a diesel a serem adquiridos serão do tipo EURO VI (P8). O fator de renovação foi incluído para considerar o fato de que no horizonte de projeto, mesmo que não haja eletrificação da frota, a idade dos ônibus em operação precisa atender a critérios definidos em licitação e, portanto, parte dos veículos a diesel em operação atualmente precisam ser substituídos. Partindo desse pressuposto, veículos de modelo EURO V (P7) deverão ser substituídos em sua totalidade, enquanto que veículos EURO VI (P8) não precisarão ser substituídos no horizonte de projeto. Desse modo, tem-se que $FR_{i=2} = 1$ e $FR_{i=3} = 0$ para atender a premissa de renovação da frota. O primeiro termo da equação é zerado se a y_r assumir o valor 1 e com $FR_{i=3} = 0$, garantindo que apenas os veículos EURO V ($FR_{i=2} = 1$) sejam substituídos; o segundo termo da equação serve para remanejar os veículos EURO VI que atualmente estão operando em rotas que o modelo selecionar para serem eletrificadas.

3.1.5.4 Restrição de determinação do número de viagens diárias de cada rota

O cálculo da extensão diária total percorrida em cada rota é feito através da multiplicação do número de viagens de cada tipo de tecnologia e veículo em cada rota pela extensão da rota, que é composta pela soma de todos os segmentos viários que compõem a rota, de modo que ambas as variáveis de decisão estejam corretamente relacionadas. A Equação 3.7 estabelece uma variável binária para conectar os segmentos da rede à rota r e a extensão de cada segmento é dada pelo parâmetro Ext_l.

A Equação 3.16 estabelece que se a rota for eletrificada, para cada categoria de veículos k e intervalo de tempo t, o número de viagens realizadas por veículos elétricos corresponderá à respectiva soma (em k e em t) de todas as viagens da rota no início do período de análise (t_0). Caso a rota não seja eletrificada, a Equação 3.17 estabelece que a partir da implantação do projeto, não são mais realizadas viagens por veículos EURO V (P7) ($i = 2$). A Equação 3.18 estabelece que as viagens dos veículos EURO VI (P8) ($i = 3$) correspondem à soma das viagens de tecnologia EURO V (P7) que foram substituídas por

novos veículos a diesel e das viagens já realizadas por veículos EURO VI (P8) no início do período de análise t_0. Desse modo, as Equações 3.16 a 3.18 garantem a conservação do número de viagens.

3.1.5.5 Restrições relacionadas ao consumo de combustível e fatores de emissão

Esta parte do modelo busca apresentar os parâmetros de consumo de energia e de emissões, baseando-se nos valores do modelo da Agência Europeia do Ambiente (EMEP/EEA, 2023). A utilização da norma europeia em detrimento de metodologias nacionais se dá pelo fato de que os parâmetros nacionais, em específico os apresentados pela CETESB 2019 e comumente replicados nos inventários nacionais, não estão relacionados à velocidade de tráfego, e em relação aos tipos de veículo, os parâmetros consideram apenas as categorias micro-ônibus e ônibus urbanos, não havendo uma diferenciação para ônibus articulados, por exemplo. Quando confrontados com os dados da EEA, os parâmetros de consumo de combustível da CETESB equivalem a fatores de velocidades da ordem de 15km/h para ônibus convencionais e de 18km/h para micro-ônibus. Entretanto, essa equivalência não é mantida para fatores de emissão de MP e NO_{x}.

Dessa forma, em virtude da tentativa de elaborar um modelo sensível à velocidade e minimizar imprecisões ao mesclar métodos distintos, optou-se pela reprodução da metodologia da norma europeia. A Equação 3.19 reproduz a função genérica para os fatores de emissão de NO_{x}, MP e consumo de energia utilizada no método da EMEP/EEA (2023). Os coeficientes β_1, β_2, β_3, β_4, β_5, β_6 e β_7 são divulgados pela agência europeia para cada categoria de veículo, combustível e padrão EURO. O termo RF na equação se refere a um fator de redução (*Reduction Factor*), que é aplicado conforme necessário e representa, por exemplo, a redução de emissões de determinados poluentes de acordo com o sistemas de pós-tratamento de gases de escape. Para efeitos de simplificação, foram considerados os coeficientes correspondentes a 0% de declividade das vias e fator de carregamento de 0,5%.

A Equação 3.20 estabelece as conversões do fator de consumo de combustível obtido através da aplicação da Equação 3.19 para unidades comerciais, ou seja, converte as unidades de [MJ/km] para [kWh/km] no caso de energia elétrica e [L/km] para o caso do diesel.

Para veículos elétricos, o consumo de energia é multiplicado por 0,277778, um fator de conversão de megajoules [MJ] para quilowatt-hora [kWh]. Salienta-se, entretanto, que a EMEP/EEA (2023) não apresenta parâmetros de consumo de combustível considerando a categoria k de veículos elétricos, o que configura uma limitação dos dados de entrada e, consequentemente, do modelo. Em uma tentativa de superar parcialmente essa limitação, foi adotado que o modelo da EMEP/EEA (2023) fornece os dados referentes a veículos convencionais ou *padron* ($k = 2$) e que para veículos midi ($k = 1$) seria aplicado um fator de

redução de consumo de 25%, isto é, o consumo seria de 75% dos valores obtidos no modelo e que para veículos articulados o consumo seria 25% maior, com um consumo de 125% em relação ao modelo. Esses valores foram adotados a partir de escassos dados nacionais (ICCT, 2022; URBS, 2022). Ainda assim, são parte de um esforço de considerar as categorias de veículos e utilizar um modelo de consumo de energia dependente da velocidade, enquanto que modelos nacionais e os estudos na literatura em geral, adotam parâmetros fixos de consumo de energia para ônibus elétricos, vide por exemplo Bi, Keoleian e Ersal (2018), Gairola e Nezamuddin (2022), IEMA (2017) e Xylia et al. (2017).

Para veículos a diesel ($i = 2,\ 3$) o consumo de combustível por distância percorrida, dependente da velocidade de deslocamento média em cada segmento, foi transformado de [MJ/km] para litros de diesel comercial por quilômetro [L/km] utilizando os coeficientes b e c, que representam as densidades energéticas do diesel mineral [MJ/$L_{diesel\ mineral}$] e do biodiesel [MJ/$L_{biodiesel}$], respectivamente, e o coeficiente d, que representa a porcentagem de biodiesel no óleo diesel comercial. As densidades energéticas foram calculadas a partir de parâmetros disponíveis no Anexo VIII do Balanço Energético Nacional (BEN) e foi adotado o percentual de 11,5%, referente ao ano de 2023 (EPE, 2024). Cabe apontar que, independente da tecnologia adotada, os perfis de consumo de energia são menores conforme as velocidades aumentam (EMEP/EEA, 2023).

A densidade energética do diesel mineral (b) é:

$$0,848\left[\frac{\text{tep}}{\text{m}^3}\right]\cdot 0,001\left[\frac{\text{m}^3}{\text{L}}\right]\cdot 41868\left[\frac{\text{MJ}}{\text{tep}}\right]=35,5\left[\frac{\text{MJ}}{\text{L}}\right]$$

A densidade energética do biodiesel (c) é:

$$0,792\left[\frac{\text{tep}}{\text{m}^3}\right]\cdot 0,001\left[\frac{\text{m}^3}{\text{L}}\right]\cdot 41868\left[\frac{\text{MJ}}{\text{tep}}\right]=33,2\left[\frac{\text{MJ}}{\text{L}}\right]$$

A Equação 3.21 determina que para os poluentes NO_x e MP, as emissões são calculadas exatamente conforme a norma europeia e os valores são expressos em gramas por quilômetro [g/km]. Considerando o contexto brasileiro, assumiu-se que todos os ônibus do padrão EURO V (P7) utilizam tecnologia SCR, enquanto que os veículos do padrão EURO VI (P8) tem ambas tecnologias DPF+SCR (CETESB, 2019; IEMA, 2017). Essas tecnologias de redução de gases de escape afetam principalmente as emissões de MP e NO_x e são incluídas na equação através do termo RF. O cálculo de emissões dos veículos EURO V (P7) foi realizado apenas para efeitos de comparação dos resultados do modelo com o cenário no início do período de análise t_0.

Para as emissões de CO_2, a metodologia de conversões de unidades foi baseada em IEMA (2017), de modo que os valores resultantes da aplicação da Equação 3.21 expressam as emissões em gramas por quilômetro [g/km]. Na equação, FE_{EEA} representa os fatores de consumo de combustível dependente da velocidade, obtido da EMEP/EEA (2023) em [MJ/km]. Assim como na transformação do consumo de diesel de [MJ/km] para [L/km],

foram utilizadas as densidades do diesel mineral (b), do biodiesel (c) e o percentual de biodiesel misturado no diesel (d). O coeficiente e representa o fator de emissão de CO_2 para o diesel e equivale a 74,1 [gCO_2/MJ] (IPCC, 2006). Seguindo o estabelecido pela agência europeia e pelo IPCC e reproduzido pela CETESB e pelo IEMA, apenas o consumo de combustível fóssil foi contabilizado nas emissões de CO_2. O entendimento é de que as emissões associadas ao uso de biocombustíveis devem ser atribuídas aos setores de Uso da Terra, Mudança no Uso da Terra e Florestas do IPCC (CETESB, 2022; EMEP/EEA, 2023; IEMA, 2017; IPCC, 2006).

3.1.5.6 Definição de variáveis binárias e inteiras

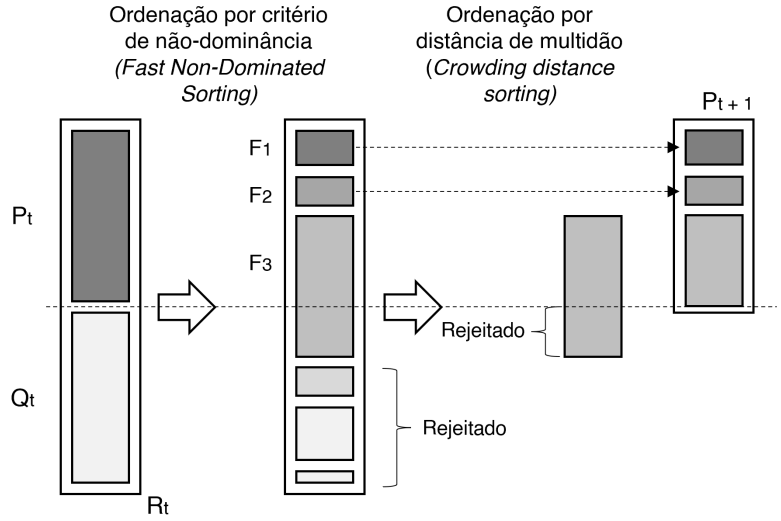
Por fim, a Equação 3.22 estabelece que a variável de decisão x_l é uma variável binária e limita o domínio de decisão da variável para o conjunto de segmentos onde não há vias exclusivas existentes no início do período de análise, a Equação 3.23 estabelece que a variável de decisão y_r é uma variável binária e a Equação 3.24 estabelece que a frota total a ser adquirida é maior ou igual a zero, uma vez que é uma variável inteira.

3.2 Método de solução

O método de solução utilizado foi o NSGA-II, um algoritmo evolutivo com forte estratégia de elitismo, sendo um dos algoritmos mais aplicados para resolução de problemas multiobjetivos em diversas áreas do conhecimento. O procedimento do NSGA-II inclui dois processos de ordenação. Primeiro, a população é classificada por um critério de não dominância (*Fast Non-dominated Sorting Algorithm*) e posteriormente, ocorre uma ordenação dos indivíduos pela chamada distância de aglomeração (*Crowding Distance*), que representa a estimativa do perímetro formado pelo cuboide cujos vértices são os seus vizinhos mais próximos. Ambas as ordenações, por critério de não-dominância e distância de aglomeração, determinam quais indivíduos vão para a próxima geração (Deb et al., 2002). Um esquema do procedimento do NSGA-II e um pseudocódigo são apresentados na Figura 6 e no algoritmo 1, respectivamente. O pseudocódigo foi adaptado de Coello, Lamont e Veldhuizen (2007).

Para o processo de ordenação por não dominância, são calculadas duas instâncias: 1) contagem de dominação n_p, ou seja, o número de soluções que dominam a solução p; e 2) S_p, o conjunto de soluções dominadas por p. Todos os indivíduos que estão na primeira frente não dominada, ou seja, não são dominados por nenhum outro indivíduo, entrada:m $n_p = 0$. Para cada indivíduo p com $n_p = 0$, cada indivíduo por ele dominado, isto é, cada indivíduo dentro do conjunto S_p, tem o valor de n_p reduzido em 1 unidade. Todos os indivíduos que passarem a ter $n_p = 0$ depois desse procedimento, passam a integrar a

Figura 6 – Procedimento do NSGA-II.



Fonte: Adaptado de Deb et al. (2002).

Algoritmo 1: Pseudocódigo do algoritmo NSGA-II

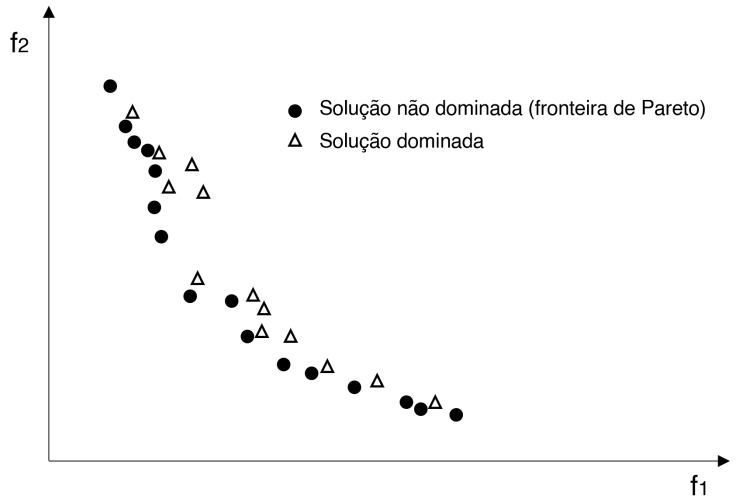
Entrada: $\mathcal{N}'$, g, $f_k(\mathbf{x}_k)$
▷ $\mathcal{N}'$ membros evoluídos por g gerações para resolver $f_k(\mathbf{x})$

início
  Inicializar População $\mathbb{P}'$;
  Gerar população aleatória – tamanho $\mathcal{N}'$;
  Avaliar valores das funções objetivo;
  Atribuir *rank* (nível) baseado na dominância de Pareto – *ordenar*;
  Gerar população de descendentes;
    Seleção por torneio binário;
    Recombinação e mutação;
  para $i = 1$ ***até*** g **faça**
    para *cada Pai e Filho na População* **faça**
      Atribuir *rank* (nível) baseado na dominância de Pareto - *ordenar*;
      Gerar conjuntos de vetores não dominados ao longo da Fronteira de Pareto conhecida;
      Loop (interno) adicionando soluções para a próxima geração começando da *primeira* frente até encontrar $\mathcal{N}'$ indivíduos;
      Calcular distância de aglomeração (*crowding distance*);
    fim
    Selecionar pontos (elitista) na frente mais baixa (com *rank* menor) e maior distância de aglomeração;
    Criar próxima geração;
      Seleção por torneio binário;
      Recombinação e mutação;
  fim
fim

segunda frente não dominada. O procedimento é repetido até que todas as soluções sejam atribuídas a uma frente (Deb et al., 2002).

Matematicamente, diz-se que uma solução factível a domina uma outra solução factível b se e somente se $f_i(a) \leq f_i(b)$ para $i = 1, ..., k$ e $f_i(a) < f_i(b)$ para pelo menos uma função objetivo k. Uma dada solução x^* é dita pertencer ao conjunto (fronteira) de Pareto se não existir nenhuma outra solução x factível capaz de melhorar um dos objetivos do problema (em relação a x^*) sem simultaneamente piorar pelo menos um dos demais (Talbi, 2009). A Figura 7 apresenta um exemplo gráfico da frente de soluções não dominadas (fronteira de Pareto) e de soluções dominadas.

Figura 7 – Exemplo de uma fronteira de Pareto com soluções dominadas e não dominadas.

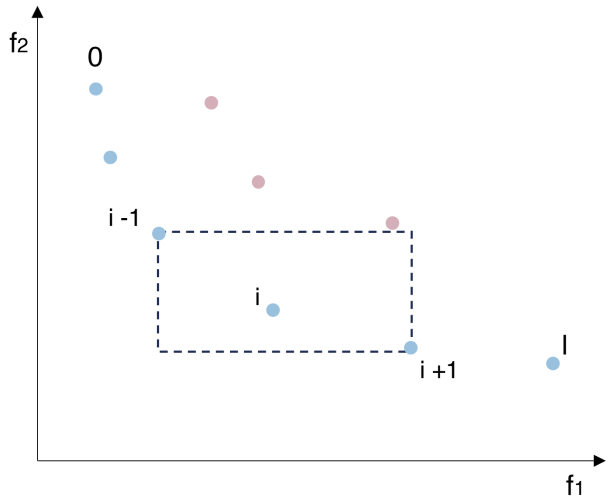


Fonte: Adaptado de Talbi (2009).

A distância de aglomeração, ilustrada na Figura 8, é utilizada quando uma frente de Pareto não pode ser integralmente incluída na nova população. Nesse caso, selecionam-se as soluções com maior distância de aglomeração para manter a diversidade. Dentro de cada frente, as soluções são ordenadas individualmente de acordo com cada função objetivo. Para cada objetivo, as soluções com os valores mínimo e máximo entrada:m distância de aglomeração infinita. Para as soluções intermediárias, calcula-se a diferença normalizada entre os valores das soluções adjacentes em cada objetivo. O valor total da distância de aglomeração de cada solução é a soma dessas diferenças normalizadas em todos os objetivos. Quanto maior a distância de aglomeração, mais isolada a solução está no espaço de objetivos e maior é sua prioridade na seleção (Deb et al., 2002).

Por fim, novos indivíduos são gerados a partir de processos de cruzamento (*crossover*) e mutação. Para o cruzamento, foi aplicada uma técnica de cruzamento conservativo, que busca preservar estruturas e informações válidas dos pais para a geração descendente, evitando a geração de soluções inválidas. Esse tratamento foi adotado para lidar com as restrições de $x_l^{existente}$ e de autonomia de baterias elétricas. O operador utilizado foi o de

Figura 8 – Cálculo da distância de aglomeração no NSGA-II.



Fonte: Adaptado de Deb et al. (2002).

cruzamento de um ponto, aplicado de maneira independente para cada variável de decisão, isto é, foram selecionados pontos de corte distintos para os vetores de x_l e y_r, permitindo que cada variável fosse recombinada de forma independente, gerando desse modo as populações descendentes. Esta abordagem preservou blocos inteiros de cromossomos durante a recombinação, caracterizando-se como uma estratégia conservativa. Uma das adversidades desse procedimento é que ele pode limitar o espaço de busca de novas conversões e levar a uma convergência prematura. Em virtude das variáveis de decisão do problema serem binárias, o processo de mutação adotado consiste na mudança clássica no valor do gene de 0 para 1 ou de 1 para 0 caso o gene seja selecionado para mutação (Gomez et al., 2010). Uma demonstração do procedimento é apresentada na Figura 9.

Figura 9 – Procedimento de mutação para variáveis binárias.

Fonte: Adaptado de Gomez et al. (2010).

3.3 Implementação computacional

O pré-processamento dos dados para inserção no modelo foi realizado através do *software* QGIS e scripts em linguagem Python. Foram utilizadas na linguagem Python, entre outros, o pacote gtfs_functions e as bibliotecas Datetime, Pandas, Geopandas, NumPy e Scikit-learn (Harris et al., 2020; Jordahl et al., 2020; Pedregosa et al., 2011; The

pandas development team, 2025; Toso; Oja, 2024). No QGIS, foram utilizadas ferramentas nativas do complemento Processamento (do inglês *Processing*), como por exemplo "Ajustar geometrias à camada" e "Associar atributos por localização" e o complemento *Trajectools* (Graser; Dragaschnig, 2024; QGIS, 2025). O NSGA-II e o modelo matemático foram implementados em linguagem Python utilizando as bibliotecas Pandas e NumPy. Para a visualização dos resultados foram utilizadas as bibliotecas Matplotlib e Seaborn (Hunter, 2007; Waskom, 2021). Para a resolução do modelo com o NSGA-II foi utilizado um Intel® Core™ i9-14900K com 128GB de memória RAM. Os *scripts* foram executados de forma simultânea por poluente.

Especificamente para a implementação nesta tese, foram utilizados quatro arquivos de entrada que compreendem o conjunto de parâmetros necessários para o modelo: *rede*, *rotas*, *parametros_veiculos* e *parametros_emissoes*. Utilizou-se os arquivos de entrada em formato .csv, por ser um formato de dados abertos, sendo que eles foram gerados a partir de outros arquivos .csv e de arquivos georreferenciados vetoriais lineares. A localização geográfica das feições (segmentos viários e rotas de ônibus) foi utilizada para pré-processamento de dados e em seguida os dados foram exportados em formato .csv para um processamento mais eficiente diretamente em Python. A estrutura e a relação entre os dados de entrada e o modelo são apresentadas nessa subseção, enquanto que o detalhamento do pré-processamento de dados está descrito no Capítulo 5.

Um pseudocódigo da implementação realizada é apresentado no algoritmo 2. A verificação de genes livres ocorre para evitar a criação de solução não factíveis, de modo que o método de solução só pode interferir nos genes da rede viária onde não há infraestrutura existente no período inicial de análise, isto é, nos genes correspondentes a segmentos com $x_l^{existente} = 0$ e nos genes das rotas que atendem à restrição de autonomia. Cabe ressaltar que o pseudocódigo apresentado corresponde ao processo de "Inicializar População $\mathbb{P}'$", "Gerar população aleatória - tamanho $\mathcal{N}'$" e "Avaliar valores das funções objetivo", apresentados no algoritmo 1.

O arquivo *rede* deve conter, para cada segmento viário, os parâmetros apresentados na Tabela 2. Cabe apontar que para dados dependentes de t, o arquivo rede deve conter um número de colunas equivalentes à segmentação temporal da operação diária, isto é, para $\nu_{0,l,t}$ e $\Delta\nu_{l,t}$ existem t colunas para cada parâmetro, correspondendo à velocidade e incremento potencial de velocidade em cada um dos períodos t.

O arquivo *rotas* deve conter, para cada rota, os parâmetros apresentados na Tabela 3. Para os parâmetros relacionados à frota existente, o número total de colunas m_{i,k,r,t_0} corresponde à combinação de i, k, r. O mesmo é válido para as colunas $N_{i,k,r,t,t0}$, cujo total corresponde à combinação de i, k, r, t. O parâmetro $N_{\text{crítico k}}$ corresponde ao número de viagens realizadas no início do período de análise (t_0) pelo veículo de cada categoria k com maior número de viagens diárias em cada rota e foi utilizado para simplificação da

Algoritmo 2: Inicialização da população $\mathbb{P}'$ e avaliação das funções objetivo (NSGA-II)

Entrada : γ_i^{op}, H, SoC_{max}, SoC_{min}, $N_{ciclos\ eq.}$, b, c, d, e; arquivos: rede, rotas, parametros_veiculos, parametros_emissoes
Saída : População $\mathbb{P}'$ com $\mathcal{N}'$ indivíduos avaliados

início
  Receber parâmetros fixos (γ_i^{op}, H, SoC_{max}, SoC_{min}, $N_{ciclos\ eq.}$, b, c, d, e)
  Carregar e pré-processar os arquivos de entrada (rede, rotas, parametros_veiculos, parametros_emissoes)
  Verificar genes livres para modificação:
    Verificar $x_l^{existente}$
    Verificar restrição de autonomia (entrada: SoC_{max}, SoC_{min}, $N_{ciclos\ eq.}$, $CAP_{b,k}$, $N_{\text{crítico k}}$, $\nu_{0,l,t}$; saída: um vetor do tamanho de y_r contendo genes com valor 1 se a rota atende restrição e 0 caso contrário)
  Criar População $\mathbb{P}'$ (entrada: genes livres de x_l e y_r)
  para *cada Indivíduo em* $\mathbb{P}'$ **faça**
    Calcular a restrição de velocidade (entrada: x_l, $\nu_{0,l,t}$, $\Delta\nu_{l,t}$; saída: $\nu_{l,t}$)
    Calcular as restrições de frota (entrada: y_r, m_{i,k,r,t_0}; saída: $m_{i,k}$)
    Calcular as restrições de número de viagens em cada período t (entrada: y_r, $N_{i,k,r,t,t0}$; saída: $N_{i,k,r,t}^{viagens}$)
    Calcular z_1:
      Calcular custo de construção (entrada: x_l, γ_l^{c}, Ext_l; saída: $C^{\text{construção}}$)
      Calcular custo de aquisição (entrada: $\gamma_{i,k}^{\text{aq}}$, $m_{i,k}$; saída: $C^{\text{aquisição}}$)
      Calcular custo de manutenção (entrada: $\gamma_{i,k}^{\text{m}}$, $m_{i,k}$; saída: $C^{\text{manutenção}}$)
      Calcular $C^{\text{operação}}$ (entrada: i, k, t, N_r^{op}, γ_i^{op}, β_1, β_2, β_3, β_4, β_5, β_6, β_7, RF, coeficientes b, c, d, $\nu_{l,t}$, $N_{i,k,r,t}^{viagens}$, Ext_l, δ_r^l; saída: $C^{\text{operação}}$)
      Calcular custo total (entrada: $C^{\text{construção}}$, $C^{\text{aquisição}}$, H, $C^{\text{manutenção}}$, $C^{\text{operação}}$; saída: z_1)
    Calcular z_2:
      Calcular emissões de construção (entrada: x_l, FE_x^{c}, Ext_l; saída: $E^{\text{construção}}$)
      Calcular emissões de operação (entrada: N_r^{op}, β_1, β_2, β_3, β_4, β_5, β_6, β_7, RF, coeficientes b, c, d, e, $\nu_{l,t}$, $N_{i,k,r,t}^{viagens}$, Ext_l, δ_r^l; saída: $E^{\text{operação}}$)
      Calcular emissões totais (entrada: $E^{\text{construção}}$, H, $E^{\text{operação}}$; saída: z_2)
    Avaliar indivíduo com valores $\{z_1, z_2\}$
  fim
fim

implementação computacional da restrição de autonomia.

No arquivo de *parametros_veiculos* cada linha corresponde a uma combinação de tecnologia i e categoria k, contendo colunas com os custos de aquisição (γ_{ik}) e de manutenção ($\gamma_{i,k}^{\text{m}}$) e a capacidade da bateria ($CAP_{b,k}$), no caso de ônibus elétricos. No arquivo de índices de emissões do modelo da EMEP/EEA (2023) cada linha corresponde a uma combinação de tecnologia i, categoria k e poluente p e as colunas contêm os parâmetros β_1, β_2, β_3, β_4, β_5, β_6, β_7 e RF. Nesse arquivo, consumo de combustível é tratado dentro da categoria de poluentes, isto é, existem linhas com parâmetros específicos para consumo

Tabela 2 – Detalhamento dos parâmetros do arquivo *rede*.

Nome do atributo	**Tipo de dado**	**Descrição**
id_rede	Número inteiro	Código identificador de cada segmento da rede
$x_l^{existente}$	Binário (0,1)	Atributo que assume o valor 1 se há infraestrutura exclusiva de ônibus no segmento no início do período de análise e 0 caso contrário
γ_l^{c}	Número inteiro	Custo unitário de construção de infraestrutura exclusiva de ônibus por unidade de comprimento (R$/km), de acordo com a tipologia adotada para o segmento
Ext_l	Número decimal	Extensão do segmento viário (em quilômetros)
$\nu_{0,l,t}$	Número decimal	Velocidade média de tráfego no segmento no período t no início do período de análise (km/h)
$\Delta\nu_{l,t}$	Número decimal	Incremento de velocidade média de tráfego no segmento viário l no período t (%)
FE_x^{c}	Número inteiro	Fator de emissão unitário de construção de infraestrutura exclusiva de ônibus por unidade de comprimento (g/km)

Fonte: Autora (2025).

Tabela 3 – Detalhamento dos parâmetros do arquivo *rotas*.

Nome do atributo	**Tipo de dado**	**Descrição**
id_rota	Número inteiro	Código identificador de cada rota
Rota	Texto	Nome da rota e campo de ligação com outras bases de dados
m_{i,k,r,t_0}	Número inteiro	Frota de veículos em operação no início do período de análise (t_0) por rota de ônibus r, tecnologia adotada i e categoria de veículo k
$N_{i,k,r,t,t0}$	Número decimal	Número de viagens realizadas no início do período de análise (t_0) por tipo de tecnologia i e por categoria de veículo k na rota r no intervalo de tempo t
$N_{\text{crítico k}}$	Número decimal	Número de viagens realizadas no início do período de análise (t_0) pelo veículo de cada categoria k com maior número de viagens diárias em cada rota
N_r^{op}	Número decimal	Número de dias equivalentes a um dia típico de operação de cada rota r por ano
δ_r^l	Lista	Lista com o campo id_rede do arquivo rede de todos os segmentos viários que pertencem a cada rota

Fonte: Autora (2025).

de combustível para cada combinação de i, k, assim como existem para MP e NO_{x}.

Os demais parâmetros como custos de combustível (γ_i^{op}), horizonte de projeto (H), estado de carga da bateria (SoC_{max} e SoC_{min}), estratégia de recarga ($N_{ciclos\ eq.}$), conversões de unidades (coeficientes b, c, d da Equação 3.20 e da Equação 3.21) e de emissões de CO_2 por litro de diesel podem ser informados diretamente no código de processamento, uma vez que não variam para cada segmento viário, rota ou tipologia de veículo. Os diferentes cenários podem ser executados com a alteração do valor de $N_{ciclos\ eq.}$ diretamente no código.

3.4 Análise de desempenho e testes de parâmetros do NSGA-II

Para verificar o desempenho do NSGA-II para solucionar o problema, foram realizados testes com diferentes parametrizações para número de indivíduos (20 e 50), gerações (100 e 200 gerações para populações com 20 indivíduos e 50 e 100 gerações para populações com 50 indivíduos) e taxa de mutação (10%, 20% e 30%). Além de analisar o desempenho em termos da resolução do problema multiobjetivo, esses testes também permitiram a verificação dos percentuais de seleção de cada segmento e rota nas soluções otimizadas para todos os poluentes, proporcionando uma maior confiabilidade no processo de decisão. Em virtude do custo computacional requerido por cada execução do código, os experimentos foram repetidos três vezes para cada configuração de parâmetros.

A taxa de cruzamento foi fixada em 100% para todos os testes. Esta decisão justificou-se pela natureza conservativa do operador de cruzamento adotado, o qual foi concebido para garantir a viabilidade das soluções filhas devido às restrições da variável de decisão x_l quando $x_l^{existente} = 1$ e de autonomia de bateria dos ônibus elétricos. O mecanismo de elitismo do NSGA-II respaldou essa decisão, uma vez que ele preserva os melhores indivíduos a cada geração, evitando a perda de boas soluções dos indivíduos pais mesmo com uma taxa de cruzamento total. Nesta configuração, o operador de cruzamento intensifica a busca em regiões promissoras, enquanto a mutação é responsável pela exploração global e manutenção da diversidade. Taxas de cruzamento de 100% também foram empregadas nos algoritmos genéticos desenvolvidos por Arbex e da Cunha (2015) e Arbex (2020) para problemas do tipo TNDFSP. Ainda, no algoritmo genético desenvolvido por Mesbah, Thompson e Moridpour (2012), as soluções obtidas com taxa de cruzamento de 100% foram melhores do que as com taxas de cruzamento menores.

3.5 Construção de cenários

Para analisar as trocas que ocorrem entre diferentes estratégias de mobilidade sustentável, foram criados os seguintes cenários de análise:

- **Cenário base (2024)**: corresponde a situação atual, com rede viária e de transporte sem alterações propostas no modelo desta tese, é utilizado para comparação dos custos de manutenção e operação com os cenários de projeção futura;
- **Cenário de continuidade**: neste cenário, os operadores e reguladores do sistema de transporte não adotam nenhuma medida adicional para melhoria do sistema de transporte público além da obrigação contratual de renovação de frota, isto é,

não são construídas novas vias exclusivas e não é adquirida frota elétrica. Nesse cenário, considera-se que a substituição ocorre no início do horizonte de projeto e os resultados demonstram os benefícios potenciais em adiantar a renovação da frota, quando comparado com o cenário base;

- **Cenários de sustentabilidade**: nos cenários de sustentabilidade, são adotadas medidas de priorização viária e/ou eletrificação da frota para melhorar a qualidade do transporte público
  - **Cenário de sustentabilidade 1 - infraestrutura**: neste cenário, os operadores e reguladores do sistema de transporte adotam apenas medidas de priorização viária para melhorar a qualidade do transporte público, mas não eletrificam a frota;
  - **Cenário de sustentabilidade 2 - eletrificação**: neste cenário, os operadores e reguladores do sistema de transporte apostam em medidas tecnológicas, mais precisamente a eletrificação da frota, para melhorar a qualidade do transporte público, mas não adotam apenas medidas de priorização viária. São adotadas as estratégias necessárias para que a maior quantidade possível de rotas e veículos sejam eletrificados;
  - **Cenário de sustentabilidade 3 - infraestrutura e eletrificação**: neste cenário, os operadores e reguladores do sistema de transporte adotam medidas conjuntas de infraestrutura e eletrificação de frota para melhorar a qualidade do transporte público. São avaliadas diversas possibilidades de estratégia de recarga para a eletrificação.

Depois de testes iniciais, os cenários de sustentabilidade foram analisados com a melhor parametrização obtida nos testes de parâmetros do NSGA-II para todos os poluentes e, conforme previamente descrito, a taxa de cruzamento utilizada foi de 100% para todos os cenários.

3.6 Contribuições ao conhecimento científico

As principais contribuições ao conhecimento científico oferecidas por essa tese estão na formulação de um modelo matemático que engloba direta e indiretamente distintas perspectivas (passageiros, operadores e comunidade/sociedade) e dimensões de sustentabilidade. Embora todos os aspectos inseridos no modelo já tenham sido trabalhados isoladamente na literatura, a modelagem de todos esses elementos conjuntamente permanecia como uma lacuna de pesquisa. Mais recentemente, com o debate de emergência climática ganhando centralidade na comunidade científica internacional, a renovação de frotas e alteração

de matriz energética de transportes também ganhou destaque. Dessa forma, também dentro da área de otimização surgiram inúmeros modelos para investigar combustíveis alternativos e, mais especificamente, veículos elétricos. Entretanto, no caso dos ônibus, a interseção com outras medidas de sustentabilidade como a priorização viária, não haviam sido investigadas. Conforme mencionado anteriormente, a velocidade é um aspecto que geralmente é neglicenciado no cálculo das emissões (Bi; Keoleian; Ersal, 2018; Gairola; Nezamuddin, 2022; Xylia et al., 2017; Zaneti et al., 2022) e esta tese contribui, mesmo que com limitações, para avançar nos estudos que integram esse aspecto.

A escala de aplicação do estudo de caso também configura uma contribuição, em uma tentativa de aplicar um modelo com a complexidade significativa em redes de grande escala. Mesmo com aplicações em cidades reais, os estudos anteriores apresentaram limitações que esta tese procurou superar. Por exemplo, Khoo, Teoh e Meng (2014) analisaram a implantação de faixas exclusivas apenas na região central de Kuala Lumpur, considerando dez rotas de ônibus. Estudos que investigam a eletrificação de frotas em redes reais, considerando inclusive o planejamento de infraestrutura de recarga (aspecto não investigado nesta tese), como é o caso de Gairola e Nezamuddin (2022) que aplicaram o modelo em uma rede com 254 rotas e 126 terminais e Xylia et al. (2017) em uma rede com 143 rotas e 403 paradas, ainda assim o fizeram através de modelagem de objetivo único e solução por ferramentas comerciais, em ambos os casos o CPLEX®. Nesta tese, o modelo é aplicado considerando 63.602 segmentos viários e 321 rotas de ônibus, usando uma abordagem mais sistêmica e não focando apenas em corredores ou rotas pré-determinados.

Uma outra contribuição explícita é fazer essa modelagem matemática apenas a partir de dados secundários, disponíveis em plataformas de acesso aberto. Ainda que seja um modelo que necessita de muitos dados de entrada, são dados possíveis de serem obtidos no cenário brasileiro e com o nível tecnológico atual. Isso não limita a reprodução do modelo apenas às cidades brasileiras, mas direcionar a modelagem para dados majoritariamente existentes a nível nacional foi uma tentativa de contribuir à prática brasileira de planejamento urbano e de transportes. Uma contribuição de maior destaque é feita em relação à eletrificação das frotas de ônibus, uma vez que as metodologias adotadas até o presente momento focam apenas no aspecto econômico desses sistemas, embora se escorem em discursos de sustentabilidade ambiental e social como retórica de impulsionamento dos projetos.

Capítulo 4

Panorama dos sistemas de transporte público nas capitais brasileiras

Este capítulo compreende a apresentação dos resultados obtidos nos levantamentos sobre dados abertos descritos na seção 1.3. Primeiramente, é apresentado um panorama dos sistemas de transporte público nas capitais brasileiras, em relação às duas variáveis de decisão propostas nesta tese, ou seja, um panorama sobre a existência de sistemas prioritários de infraestrutura e sobre a presença de veículos elétricos nas frotas. Na sequência, é apresentado um panorama da disponibilidade de dados públicos abertos nas capitais brasileiras. Os dados foram avaliados de acordo com oito princípios dos dados abertos e para o quesito de dados completos são considerados como um conjunto básico de dados para planejamento de transportes em um contexto de emergência climática: dados de demanda, rede viária e de transporte público, contendo preferencialmente possibilidades de obtenção de dados de velocidade e/ou fluxo nos segmentos viários, dados de rotas, respectivas frequências de operação e composição de frota, contendo preferencialmente composição por tecnologia e categoria de veículos que operam em cada rota e a respectiva alocação no cronograma de operação diária e dados de acidentes, como uma medida de custo das externalidades do sistema de transporte. Embora as especificidades elencadas acima possam ser contornadas de alguma forma, um maior detalhamento dos dados permite mais precisão de modelagem e essas especificidades são analisadas sob a ótica de qualidade dos dados.

A perspectiva adotada para determinar se os dados estão disponíveis e os princípios de dados abertos é a de cidadão ou cidadã auditores, não simplesmente a perspectiva de um usuário comum dos sistemas de transporte. Isso implica que, se um determinado cidadão ou cidadã quiser verificar todas as informações de um sistema de transporte, elas estão disponíveis em formato aberto e consolidados de tal forma que é possível averiguar sua autenticidade. Excluem-se dessa análise, por exemplo, a mera disponibilização de

itinerários e tabelas horárias por meio de aplicativos de informação, nos quais os usuários podem utilizar para programar uma viagem. A perspectiva adotada é mais abrangente, indo além da mera publicização dos dados.

4.1 Disponibilidade de dados abertos relacionados a transporte nas capitais brasileiras

O primeiro levantamento de dados consistiu na busca de dados gerais de mobilidade e de demanda, tais como a existência de planos setoriais de mobilidade (Planmob), a partir dos quais provavelmente poderiam ser obtidos dados ou padrões de demanda (matrizes Origem-Destino (OD)). A Tabela 4 apresenta um panorama geral desses dados. Atualmente, os planos de Brasília, Campo Grande, Macapá, Maceió e Vitória, estão sendo elaborados ou encontram-se em revisão. O plano de mobilidade é um dos instrumentos centrais da PNMU (BRASIL, 2012) e as capitais brasileiras possuem planos elaborados, em fase de preparação ou de revisão, sendo que algumas delas já tinham versões publicadas antes mesmo da promulgação da PNMU. Ressalta-se que a qualidade dos planos não foi investigada para o presente trabalho, o intuito foi averiguar se as capitais cumpriam a legislação vigente e se o processo de elaboração dos planos estava vinculado com pesquisas OD, uma vez que espera-se que os planos sejam pautados pelos padrões de demanda de quando são elaborados. O plano de Rio Branco possui mais de dez anos, estando em desacordo com a PNMU, o mesmo caso ocorria com Brasília, Campo Grande e Vitória, mas os planos estão em processo de revisão durante a finalização desta tese.

Foram localizados portais de dados abertos em 13 das 27 capitais, sendo elas Belo Horizonte (Belo Horizonte, 2023b), Brasília (Brasília, 2023), Campo Grande (Campo Grande, 2023), Curitiba (Curitiba, 2023), Florianópolis (Florianópolis, 2023), Fortaleza (Fortaleza, 2023b), Goiânia (Goiânia, 2023c), Natal (Natal, 2023a), Porto Alegre (Porto Alegre, 2023), Recife (Recife, 2023a), Rio de Janeiro (Rio de Janeiro, 2023), São Paulo (São Paulo, 2023b) e Vitória (Vitória, 2023). Embora nem todos possuam as informações necessárias para o modelo proposto nesta tese, nem se desconsiderados dados mais refinados como velocidade nos segmentos viários e composição da frota para cada rota, a presença de tais ferramentas demonstra um avanço da implementação da Lei de Acesso à Informação para além das informações obrigatórias, relacionadas principalmente a despesas e contratos dos municípios, bem como são ferramentas de transparência ativa, não apenas passiva. Além dos dados de mobilidade e desenvolvimento urbano, focos desta tese, são comumente encontrados dados dos setores de cultura, saúde, educação, entre outros.

Tabela 4 – Panorama geral das capitais brasileiras, incluindo instrumentos legislativos e dados de demanda de mobilidade.

Região	Código	Cidade	População (2022)	Planmob	Matriz OD	Portal de dados abertos	Fonte
Centro-Oeste	1	Brasília - DF	2.923.369	2011; em revisão	2018	✓	Brasília (2011)
	2	Campo Grande - MS	942.140	2009; em revisão	Não localizado	✓	Campo Grande (2022)
	3	Cuiabá - MT	694.244	2024	Não localizado	×	Cuiabá (2023)
	4	Goiânia - GO	1.414.483	2024	2022	✓	Goiânia (2023b)
Nordeste	5	Aracaju - SE	605.309	2015	2015	×	Aracaju (2023)
	6	Fortaleza - CE	2.596.157	2015	2019	✓	Fortaleza (2023a)
	7	João Pessoa - PB	889.618	2022	2018	×	João Pessoa (2020)
	8	Maceió - AL	960.667	Em elaboração	Não localizado	×	Maceió (2023)
	9	Natal - RN	751.932	2022	2007	✓	Natal (2023b)
	10	Recife - PE	1.494.586	2022	2021	✓	Recife (2023b)
	11	Salvador - BA	2.610.987	2018	2012	×	Salvador (2023)
	12	São Luís - MA	1.061.374	2017	2017	×	São Luís (2023)
	13	Teresina - PI	868.523	2021	2016	×	Teresina (2021)
Norte	14	Belém - PA	1.367.336	2016	2009	×	Belém (2023)
	15	Boa Vista - RR	408.157	2025	2024	×	Boa Vista (2023)
	16	Macapá - AP	478.448	Em elaboração	Não localizado	×	Macapá (2023)
	17	Manaus - AM	2.054.731	2015	2015	×	Manaus (2015)
	18	Palmas - TO	334.454	2024	2024	×	Palmas (2023)
	19	Porto Velho - RO	461.748	2021	Não localizado	×	Porto Velho (2023)
	20	Rio Branco - AC	364.368	2009	Não localizado	×	Rio Branco (2009)
Sudeste	21	Belo Horizonte - MG	2.392.678	2016	2012	✓	Belo Horizonte (2016)
	22	Rio de Janeiro - RJ	6.625.849	2016	2013	✓	Rio de Janeiro (2016)
	23	São Paulo - SP	12.200.180	2015	2017	✓	São Paulo (2015b)
	24	Vitória - ES	331.785	2008; em revisão	Não localizado	✓	Vitória (2008)
Sul	25	Curitiba - PR	1.871.789	2022	2016	✓	Curitiba (2021)
	26	Florianópolis - SC	574.200	2015	2014	✓	Florianópolis (2015)
	27	Porto Alegre - RS	1.404.269	2019	2003; em revisão	✓	Porto Alegre (2019)

Fonte: Autora (2025), adaptado de IBGE (2022) e demais fontes supracitadas.

Uma segunda etapa de levantamento de dados consistiu em verificar se os dados de rede viária e de transporte público estavam disponíveis nas capitais brasileiras. Como panorama geral, tem-se uma clara disparidade intra-regional no país, sendo que nos estados das regiões Sudeste e Sul, todas as capitais tem portais de dados abertos e políticas de dados abertos mais avançadas, mesmo que os dados necessários para aplicação do modelo proposto nesta tese não estejam disponíveis em todas elas. Na região Nordeste, Fortaleza, Natal e Recife possuem pelo menos parte dos dados de maneira pública, no Centro-Oeste, apenas Brasília tem dados disponíveis e que atendem – pelo menos parcialmente – os princípios de dados abertos. Na região Norte, não foram localizados dados completos em nenhuma das capitais. Essa realidade evidencia que não há, a nível nacional, um esforço por sistematizar a publicação desses dados e que em geral, a existência desses bancos de dados públicos parte de um esforço municipal. Em uma análise mais ampla, tem-se que os dados e mesmo os portais de dados não tem uma padronização de disponibilidade, isto é, os dados encontrados em uma cidade podem não estar disponíveis em outra, o que dificulta a elaboração de metodologias coerentes e facilmente reproduzíveis. Problemas similares foram apontados por Arbex (2020). Para além da investigação científica que pode ocorrer a partir desses dados, a fragmentação prejudica a capacidade de resposta frente ao contexto de emergência climática a nível nacional. Apesar de todo o esforço de levantamento realizado nesta tese, uma pergunta não pôde ser respondida: o poder público sequer tem acesso a esses dados para disponibilizá-los publicamente?

Tem-se, portanto, que o princípio de dados abertos mais violado é o de dados completos, já que nem todos os dados são disponibilizados. A partir do fato de que não estão completos, a análise de alguns outros princípios torna-se quase pueril. Ainda assim, mesmo para capitais com dados incompletos, percebe-se que o princípio de acessibilidade também é violado porque os dados não podem ser baixados, embora alguns deles, como itinerários de ônibus, possam ser visualizados de maneira fragmentada. Os demais princípios não foram averiguados para esse conjunto de cidades porque ou não era possível averiguá-los ou por já estarem vinculantemente violados pelo descumprimento dos primeiros. Para as demais cidades, em geral, se há pelo menos um portal de dados ou uma iniciativa nesse sentido, os demais princípios são respeitados. As exceções são Curitiba e São Paulo, que disponibilizam alguns dados relacionados a transporte público somente mediante cadastro de usuário, ferindo o princípio de acesso não-discriminatório.

De maneira complementar aos dados de demanda que podem ser obtidos junto à matriz OD, foram localizados dados específicos de demanda de transporte público, mais especificamente dados de bilhetagem eletrônica ou similares em Belo Horizonte, Natal e Rio de Janeiro. Os dados referentes a rede viária não estão disponíveis para todas as cidades. Até um certo grau, esse problema pode ser contornado através de outras iniciativas de dados abertos como *Open Street Maps* (OSM), porém dados oficiais tendem a ser mais

precisos. Onde esses dados foram localizados, eles em geral eram apresentados em eixos de logradouros (Curitiba, Porto Alegre), que é uma representação simplificada da rede, mas ainda assim pode ser utilizada para a aplicação do modelo. Em Belo Horizonte, Brasília, Recife, Rio de Janeiro e São Paulo foram localizados dados de circulação viária, contendo os segmentos viários com sentido de circulação, o que permite uma precisão maior do modelo.

Em relação aos dados de transporte público, o principal problema é que as informações de itinerários e cronogramas de viagens são encontrados de maneira fragmentada por rota, sem disponibilidade de um conjunto agregado de rotas e horários de viagens e sem a possibilidade de baixar os dados dos locais onde são apresentados, configurando uma violação do princípio de acessibilidade que culmina na indisponibilidade desse subconjunto de dados. Esse é o conjunto de dados mais essencial para a aplicação do modelo proposto nesta tese. Mesmo para modelos de emissão mais simplificados sem considerar velocidade ou composição detalhada da frota, as rotas e cronogramas de operação são essenciais para determinação das extensões percorridas diária e anualmente. É a partir dessas informações que a decisão de eletrificar as frotas pode ser tomada. De maneira complementar, dados reais acerca da operação permitem um refinamento maior dos modelos, além de permitir por exemplo, a fiscalização de cumprimento de tabelas horárias programadas. Em um escopo que ultrapassa o desta tese, são esses dados que tornam possível a aferição de dados reajustes tarifários, permitindo uma maior participação popular na operação dos sistemas de transporte.

Em geral, a apresentação dessas informações poderia ocorrer a partir de dados em padrão GTFS (Especificação Geral de Dados para Transporte Público, do inglês *General Transit Feed Specification*). Os dados GTFS são um formato padrão aberto utilizado por agências de transporte público em todo o mundo para disponibilizar informações sobre seus sistemas. Esses dados, estruturados em um conjunto de arquivos de texto, descrevem de forma detalhada as rotas, paradas, horários, viagens, tarifas e outras informações essenciais dos serviços de transporte. Entretanto, foram localizados dados nesse padrão ou equivalente disponível para baixar apenas em Belo Horizonte, Brasília, Curitiba, Fortaleza, Natal, Porto Alegre, Rio de Janeiro, São Paulo e Vitória, o que representa um terço das cidades analisadas.

Mesmo que os dados estejam de alguma forma disponíveis, ainda persistem problemas relacionados à qualidade de acesso. Em Brasília, por exemplo, os dados da rede viária e do sistema de transporte público estão disponíveis em dois *websites* distintos e há ainda, o portal de dados abertos, onde é possível encontrar os dados de acidentes (Brasília, 2025a; Brasília, 2025b; Brasília, 2025c). Essa fragmentação dificulta a localização dos dados, além de gerar incerteza sobre a atualidade e retidão das informações encontradas. Situação semelhante ocorre em Curitiba, em que uma parte dos dados está em Curitiba (2023) e a

outra está em Curitiba (2025), cujo acesso necessita de cadastro de usuário.

Dados de composição de frota também não foram localizados para a vasta maioria das cidades analisadas, sendo que o nível de detalhamento de qual veículo realiza qual viagem foi encontrado em apenas em Belo Horizonte, Brasília, Curitiba e Rio de Janeiro. Esse dado é fundamental para um cálculo mais preciso do consumo de combustível e de emissões, mas podem ser feitos arranjos estatísticos de alocação da frota de acordo com o cronograma de viagens de cada rota, desde que ambos os dados estejam disponíveis. As cidades supracitadas possuem dados relacionados à posição em tempo real dos veículos, a partir dos quais é possível averiguar ou derivar dados de velocidade nos segmentos viários, o que também resulta um modelo mais preciso.

Boas práticas de dados abertos foram observadas em Belo Horizonte, Curitiba, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo, embora Curitiba e São Paulo limitem o acesso através de cadastro de usuário. Para a definição do estudo de caso foram consideradas como candidatas as cidades que tinham todos os dados necessários disponíveis, acessíveis e processáveis por máquina. Fortaleza foi descartada pois não possui dados de velocidade, nem formas de derivar essa informação de outros dados. Inicialmente, considerou-se incluir na modelagem matemática acidentes de trânsito como um fator de externalidade do sistema de transporte, mas esse dado foi posteriormente excluído em virtude de incompatibilidades entre o formato de dados e a rede viária. Ainda assim, a não disponibilidade desse dado foi o motivo de exclusão de Curitiba e Rio de Janeiro, restando São Paulo e Belo Horizonte como candidatas. Optou-se por Belo Horizonte como objeto de estudo pelo fato de a cidade ainda não ter frota de veículos elétricos na cidade, enquanto que tal iniciativa já existia em São Paulo.

Ressalta-se que foi realizado um esforço na etapa de modelagem para que fosse possível aplicar o modelo em outros estudos de caso. Em alguns casos como o de Curitiba, Rio de Janeiro e São Paulo, seria necessário apenas tabular os dados para inserção no modelo. Para o caso de Fortaleza, seria necessária a produção, seja por meio de pesquisas de campo ou por meio de simulações, de dados de velocidade de circulação nos segmentos viários. Para as demais capitais brasileiras, é necessária uma produção e disponibilização massiva de dados de transporte para que o modelo possa ser aplicado. Com o debate sobre um pacote mínimo de dados necessários, esta tese buscou apresentar um direcionamento para essas cidades.

A Tabela 5 sintetiza os resultados relacionados à aderência dos dados localizados aos princípios de dados abertos, sendo eles dados completos, primários, atuais, acessíveis, processáveis por máquina, acesso não-discriminatório, formatos não-proprietários e licenças livres. Na tabela, para municípios que estão sinalizados como não completos, mas com avaliações positivas em outras colunas, houve o entendimento de que os dados disponíveis – embora não completos – atendem ao outro princípio sinalizado como positivo.

Tabela 5 – Dados de mobilidade de capitais brasileiras analisados sob a perspectiva dos oito princípios de dados abertos

Região	Código	Cidade	Completos	Primários	Atuais	Acessíveis	Processáveis	Acesso	Formato	Licença
Centro-Oeste	1	Brasília – DF	✓	✓	–	–	✓	✓	✓	✓
	2	Campo Grande – MS	×			×				
	3	Cuiabá – MT	×			×				
	4	Goiânia – GO	×			×				
Nordeste	5	Aracaju – SE	×			×				
	6	Fortaleza – CE	–	✓	–	✓	✓	✓	–	✓
	7	João Pessoa – PB	×			×				
	8	Maceió – AL	×			×				
	9	Natal – RN	×	✓	–	✓	✓	✓	✓	✓
	10	Recife – PE	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	11	Salvador – BA	×			×				
	12	São Luís – MA	×			×				
	13	Teresina – PI	×			×				
Norte	14	Belém – PA	×			×				
	15	Boa Vista – RR	×			×				
	16	Macapá – AP	×			×				
	17	Manaus – AM	×			×				
	18	Palmas – TO	×			×				
	19	Porto Velho – RO	×			✓				
	20	Rio Branco – AC	×			✓				
Sudeste	21	Belo Horizonte – MG	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	22	Rio de Janeiro – RJ	–	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
	23	São Paulo – SP	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	24	Vitória – ES	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
Sul	25	Curitiba – PR	–	✓	✓	✓	✓	×	✓	✓
	26	Florianópolis – SC	×	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	27	Porto Alegre – RS	–	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓

Fonte: Autora (2025). Nota: ✓princípio atendido; – princípio parcialmente atendido; × princípio não atendido

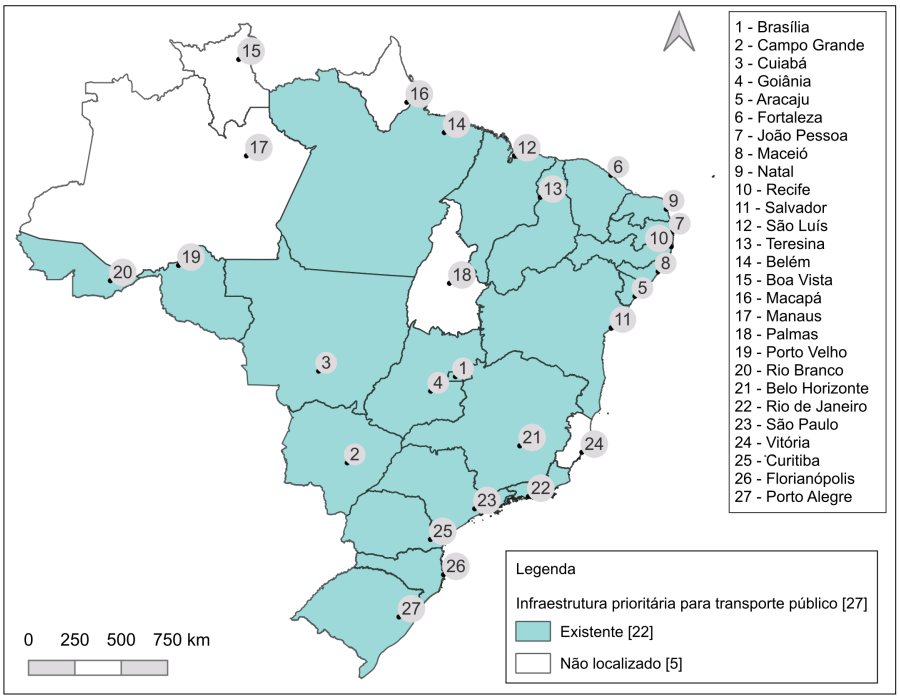
4.2 Maturidade de iniciativas de sustentabilidade dos sistemas de transporte público por ônibus

Em relação a sistemas para ônibus no Brasil, iniciativas de implantação de infraestrutura prioritária remontam às décadas de 1970 e 1980. Entretanto, a popularização de tais políticas públicas ocorre a partir da parte inicial da década de 2010, com alguns marcos importantes a nível nacional. Em 2012 foi promulgada a PNMU (BRASIL, 2012); em 2013 ocorreram os protestos que ficaram conhecidos como "Jornadas de Junho" e que tinham como pauta principal a melhoria dos sistemas de transporte público; nesse período já estavam sendo construídas as obras da Copa do Mundo de 2014 e das Olimpíadas de 2016, sendo que a implantação de sistemas de BRT, corredores e faixas exclusivas ocorreu em várias capitais brasileiras (NTU, 2015).

Desse modo, a Figura 10 reflete esse cenário, sendo possível observar que 22 capitais possuem sistemas prioritários de ônibus, mesmo que a quantidade de quilômetros dedicados e a qualidade dos sistemas varie entre as capitais. Dados da Pesquisa Nacional de Mobilidade Urbana (Pemob) mostram que, considerando a soma entre BRTs completos, corredores e faixas exclusivas, São Paulo é a capital com maior quilometragem de vias dedicadas, com aproximadamente 720 km, seguida do Rio de Janeiro com 224 km. Quando considerados apenas sistemas de BRT completos, o Rio de Janeiro lidera com 157 km, seguido de Curitiba com 78,3 km. Das capitais onde foram localizadas informações sobre prioridade, Florianópolis e Rio Branco são as que possuem menor quilometragem, com 1,0 km de vias exclusivas cada (Brasil, 2024a). Essa estratégia de mobilidade sustentável, embora apresente contrastes na extensão de vias prioritárias, se mostra como uma política pública consolidada no cenário nacional, sendo alvo de expansão inclusive com incentivo federal através do programa Novo PAC (Brasil, 2025a).

Em relação à inserção de veículos elétricos nas frotas das capitais brasileiras, a Figura 11 apresenta um levantamento de dados realizado em 2023 e outro em 2025, quando da finalização desta tese. Nela é possível observar que até 2023 apenas Brasília e São Paulo já possuíam ônibus elétricos em operação, mas que outras três (Goiânia, Manaus e Rio Branco) tinham previsão de compra e outras seis (Belém, Belo Horizonte, Curitiba, Florianópolis, Salvador e Vitória) haviam realizado ou estavam realizando testes com ônibus elétricos (Belo Horizonte, 2022; Brasil, 2021; Electra, 2023; Goiânia, 2023a; Manaus, 2022; Rio Branco, 2022; UFPA, 2020). Em 2025, nota-se que houve um avanço dessa estratégia a nível nacional. São sete capitais com ônibus elétricos em operação (Brasília, Curitiba, Goiânia, Manaus, Porto Alegre, Salvador e São Paulo), sendo que dessas, Curitiba, Porto Alegre e Salvador estão em fase de preparação para implantação de veículos que foram adquiridos através de financiamento do Novo PAC. Outras 11 capitais também

Figura 10 – Panorama de disponibilidade de dados de transporte público por ônibus e implantação de sistemas prioritários.

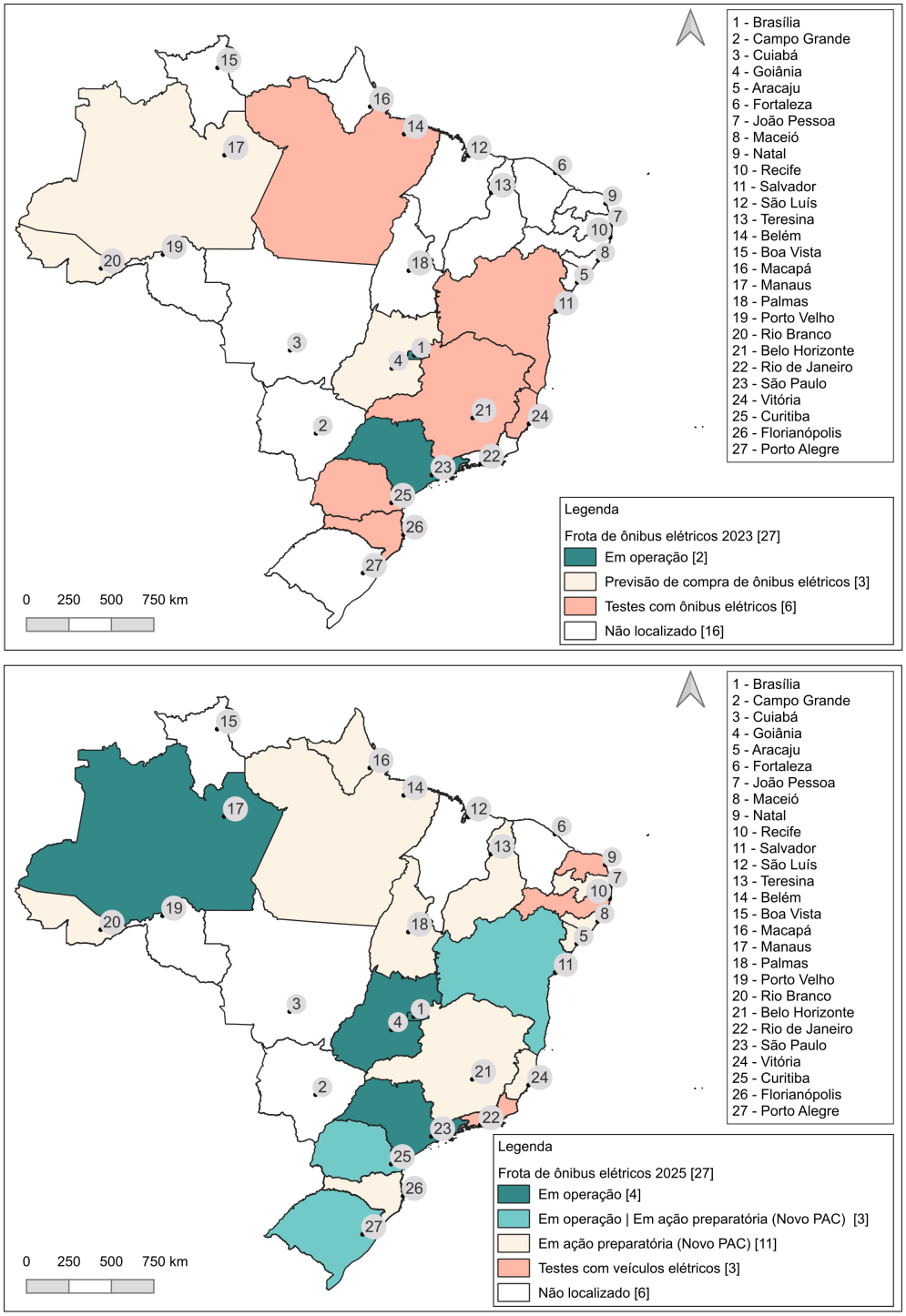


Fonte: Autora (2025).

estão em fase de preparação, o que significa que estão sendo realizados procedimentos de licitação, compra ou outros processos administrativos para início da operação com veículos elétricos. Além das capitais mencionadas, Natal, Recife e Rio de Janeiro estão realizando testes operacionais com ônibus elétricos, restando apenas seis capitais onde não foram localizadas informações contundentes a respeito de projetos de eletrificação (Brasil, 2024b; Brasil, 2025a). Ressalta-se que em Aracaju e Vitória, foram localizados projetos apenas nas respectivas regiões metropolitanas. Apesar de o foco de investigação desta tese ser as capitais brasileiras, outras cidades em diversos estados estão em processo de preparação para implantação de veículos elétricos nas frotas (Brasil, 2025a).

Ainda assim, apesar do avanço nessa política, os dados da Pemob de 2024 mostram que os percentuais de inserção de ônibus elétricos nas frotas ainda é bastante incipiente. São Paulo é a capital com o maior número de ônibus elétricos em operação, com um percentual que representa 2,80% da frota total. Salvador e Manaus possuem cerca de 1% da frota composta por veículos elétricos, Curitiba tem 0,4%, Goiânia 0,30% e Brasília 0,20% (Brasil, 2024b).

Figura 11 – Panorama de frotas de ônibus com combustíveis alternativos.



Fonte: Autora (2025), adaptado de Brasil (2024b) e ITDP (2024).

4.3 Síntese do capítulo

A partir dos levantamentos de dados apresentados neste capítulo, foi possível identificar que os princípios de dados abertos mais comumente violados são os de dados completos e acessíveis e que, a partir dessas violações, outros princípios também não

são atendidos. Foi possível demonstrar que existe uma disparidade regional em termos de iniciativas de dados abertos, com predominância nas regiões sudeste e sul, enquanto que no nordeste algumas cidades avançam nesse sentido e no centro-oeste e norte tem-se um cenário de escassez de dados públicos, exceto pelo caso de Brasília. As cidades de Belo Horizonte, Curitiba, Fortaleza, Rio de Janeiro e São Paulo apresentam boas práticas de dados abertos, embora Curitiba e São Paulo limitem o acesso através de cadastro de usuário, podendo servir de norte para outros municípios. Entretanto, é necessário o fomento de uma política centralizada e padronizada a nível nacional. No caso dessa tese, o foco é em dados de transporte, mas as conclusões aqui apresentadas podem ser aplicadas em outros conjuntos de dados, especialmente dados relevantes para mitigação e adaptação no contexto de emergência climática. Para promover cidades verdadeiramente inteligentes deve-se reconhecer que a tecnologia é apenas um dos meios para se atingir o efetivo fim – a melhoria da qualidade de vida das pessoas – e para este fim ser alcançado, é necessário que os dados sejam tratados como bem comum e social. Em síntese, os dados de acesso aberto não são um componente opcional das cidades inteligentes, são indispensáveis para otimizar serviços públicos e garantir uma governança mais democrática das cidades.

Em relação às políticas de sustentabilidade propostas como variáveis de decisão nesta tese, tem-se que a priorização viária é uma medida mais consolidada que a eletrificação das frotas, apesar de que para ambas os modelos de tomada de decisão não são claros e bem estabelecidos, se apoiando, em geral, em métodos de previsão de demanda e fornecimento de infraestrutura. Além disso, nota-se que o avanço de eletrificação de frotas no país aconteceu de maneira concomitante com o desenvolvimento desta tese, demonstrando seu ineditismo e potencial de contribuição para o cenário nacional de transição energética no setor de transportes.

Capítulo 5

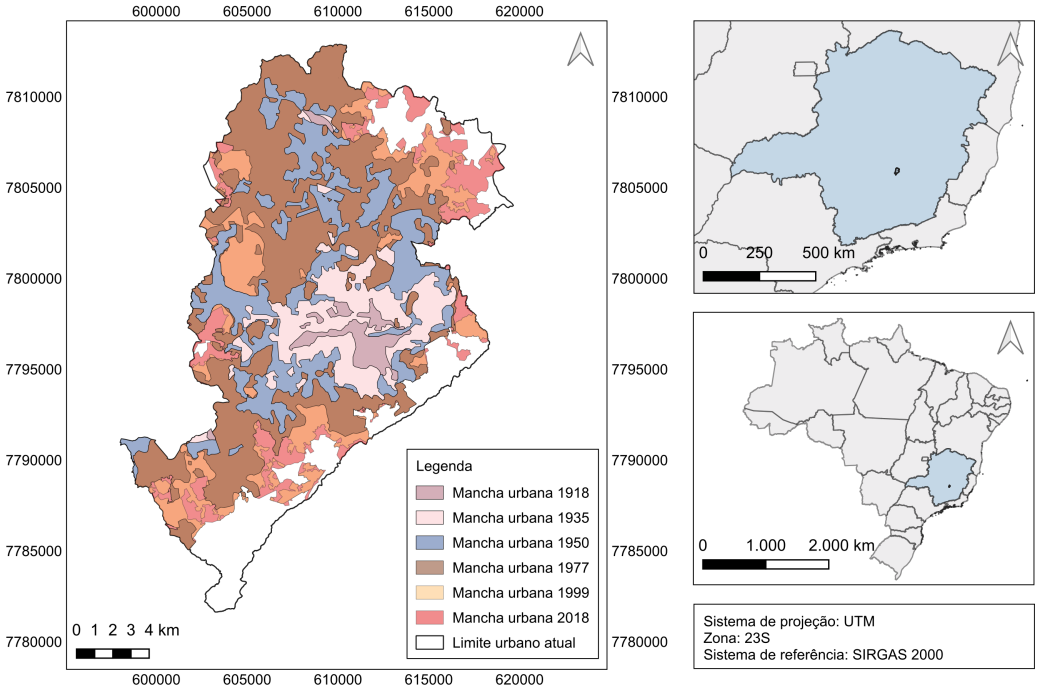
Estudo de caso e parametrização do modelo

5.1 Belo Horizonte como estudo de caso

Belo Horizonte foi construída entre 1894 e 1897 para ser a capital do estado de Minas Gerais. Foi uma cidade planejada a partir de um projeto do engenheiro Aarão Reis, que era constituído de uma malha perpendicular de ruas cortadas por avenidas em diagonal, quarteirões de dimensões regulares com a Avenida do Contorno contendo a zona de expansão urbana. Esta área central receberia infraestrutura e serviços urbanos, enquanto as áreas suburbanas, externas à Avenida do Contorno, seriam compostas por chácaras, formando um cinturão verde ao redor da cidade. Mais tarde, ao longo do século XX, a capital mineira recebeu inúmeros projetos do arquiteto Oscar Niemeyer, que configuram até hoje parte do patrimônio urbano da cidade. Assim como inúmeras cidades brasileiras, passou por um processo acelerado de urbanização ao longo do século XX, com expansão urbana para além da Avenida do Contorno. Os rápidos processos de industrialização, principalmente a partir da segunda metade do século XX, geraram inúmeros espaços de segregação social, especialmente vilas e favelas, com condições urbanas totalmente distintas do centro planejado (Aguiar, 2006). A Figura 12 mostra a evolução urbana de Belo Horizonte desde 1918.

Atualmente, a cidade possui 2.315.560 habitantes (IBGE, 2022), sendo a sétima maior cidade do país. Em termos de mobilidade, Belo Horizonte - MG possui uma das maiores taxas de motorização a nível nacional, com 682,43 auto/1.000 hab. Parte desse número pode ser explicado pelo fato de locadoras de veículos terem direito a redução na alíquota do Imposto sobre a Propriedade de Veículos Automotores (IPVA), desde que se cadastrem na Secretaria de Estado de Fazenda de Minas Gerais (SEF-MG) e tenham o pedido deferido (Minas Gerais, 2025). Esse dado pode de alguma forma, inflar os números reais de veículos circulantes em Belo Horizonte, mas ainda assim, a cidade apresenta inúmeros desafios no setor de transportes, principalmente congestionamentos.

Figura 12 – Evolução urbana de Belo Horizonte de 1918 a 2018 e localização do município



Fonte: Autora (2025), adaptado de Belo Horizonte (2023b).

5.2 Políticas públicas e sistema de transporte público por ônibus de Belo Horizonte

O sistema de transporte público por ônibus de Belo Horizonte é constituído por um sistema BRT, denominado MOVE, um convencional e um suplementar. Os sistemas são administrados pela Superintendência de Mobilidade Urbana da Prefeitura de Belo Horizonte (Sumob-BH) e pela Empresa de Transportes e Trânsito de Belo Horizonte S/A, a BHTrans.

O sistema MOVE foi implementado em virtude da realização da Copa do Mundo de 2014 e entrou em operação no mesmo ano. Atualmente o sistema opera na capital mineira e tem linhas também na região metropolitana. No sistema MOVE, as linhas ligam determinados bairros a estações de integração, onde há a possibilidade de os passageiros realizarem transferências para outras linhas do sistema; linhas troncais e alimentadoras compõem o sistema. Há integração tarifária através da utilização de cartão de transporte (cartão BHBUS) entre os sistemas MOVE e o convencional, onde os passageiros pagam 50% do valor da segunda tarifa dentro de um período de 1h30 minutos. O sistema convencional atualmente é operado sob o regime de concessão por 4 consórcios, com contratos iniciados em 2008, sendo que o sistema MOVE foi incorporado à concessão de 2008 através de aditivos contratuais em 2014 e 2015 (Belo Horizonte, 2024d; Oliveira, 2024). Considerando o sistema MOVE e o convencional juntos, são transportados mais de 275 milhões passageiros

por ano (Belo Horizonte, 2024a). O sistema suplementar, por sua vez, busca complementar os demais serviços e é operado com veículos do tipo micro-ônibus. A operação é realizada por permissionários desde 2016 e não há integração tarifária entre as linhas do sistema nem com os demais sistemas da cidade (Belo Horizonte, 2024d).

Um ponto que merece atenção é o debate acerca dos processos de concessão do transporte público, porque, em última instância, é um debate que perpassa a eletrificação da frota, uma das propostas abordadas nesta tese. A primeira concessão do sistema de transporte público em Belo Horizonte ocorreu em 1997, em uma tentativa de reformular um sistema mal regulado e aglutinado, mas após esse processo licitatório 96% do mercado ficou com as empresas que já operavam o sistema (Oliveira, 2024). Os contratos desse processo de privatização previam que o poder público remuneraria os operadores privados pela extensão total percorrida, uma forma de remuneração que incentiva o aumento do número de viagens e a própria extensão das rotas. Além disso, também estava previsto que a administração contábil e operacional do sistema permanecia sob responsabilidade da BHTrans, que garantia o equilíbrio econômico-financeiro do contrato. Porém, de acordo com Carneiro et al. (2022), devido a fatores como o aumento da motorização, a operação do sistema passou a ficar cada vez mais deficitária, culminando em complementações financeiras por parte do município da ordem de R$ 500 milhões. Ao final desse primeiro período privatizado regulado, o debate para o novo processo de concessão estava pautado nos repasses realizados para as empresas privadas (Oliveira, 2024).

A partir de licitação de 2008, que possui duração de 20 anos, o controle administrativo da BHTrans se reduziu a poder fiscalizador e regulatório. Embora ainda possua poder de aprovação sobre a racionalização do sistema (alterações em frota, horários de atendimentos, frequências de operação, etc.), a gestão contábil do sistema foi transferida para as concessionárias. O processo de privatização anterior interferiu no que está vigente atualmente, principalmente através da imposição de que as tarifas iriam cobrir os custos operacionais e não mais os subsídios públicos. Se o contrato anterior gerava insatisfação pelos repasses públicos, o contrato atual gera descontentamentos pela qualidade e pelo preço, pois o modelo atual incentiva concentração da demanda em trajetos e em horários lucrativos. A tarifa passou a ter, então, um papel central nas discussões após 2008, resultando na formação de diversos movimentos sociais relacionados com o transporte público, como o Movimento Passe Livre e o Tarifa Zero BH, principalmente após os protestos de junho de 2023 (Carneiro et al., 2022; Domingues et al., 2025; Oliveira, 2024). Nos últimos anos, tem se acirrado os conflitos relacionados ao atual contrato de concessão principalmente pela impossibilidade de controle social sobre o contrato em virtude da gestão contábil ter sido repassada para as concessionárias, tendo sido realizadas diversas investigações sobre possíveis fraudes na prestação de contas (Oliveira, 2024).

Os subsídios ao sistema foram retomados em 2023, através das leis 11.458/2023 e

11.538/2023 e do decreto nº 18.370/2023, que também permitiu um aumento da idade máxima dos ônibus. Em virtude dos conflitos acima mencionados, a retomada dos subsídios foi uma tentativa de aumentar a produção quilométrica e índices de qualidade das empresas (Belo Horizonte, 2023c; Oliveira, 2024). A crise de financiamento derivada da pandemia de COVID-19 também interferiu na implementação dos subsídios. Apesar de parecer ter sido uma medida com certo grau de consenso entre movimentos sociais e as empresas concessionárias, Domingues et al. (2025) apontam que o conflito persiste e o cenário de subsídio está em disputa tanto para um avanço no sentido da tarifa zero quanto para uma pressão das concessionárias por aumento de repasses sem necessariamente melhorias na prestação do serviço.

Com o fim do período de concessão se aproximando (2028), as empresas tem buscado postergar a substituição da frota prevista em contrato e, quando não é possível postergar, tem buscado substituir a frota por veículos menores, por exemplo, de veículos articulados para veículos convencionais, prejudicando a qualidade do serviço. Foi também a prefeitura que realizou contratação de crédito no programa Novo PAC - Refrota, para inserção de 100 ônibus elétricos no sistema, embora esse processo ainda esteja em andamento no momento de finalização desta tese e as informações sobre o modelo de repasse desses veículos para iniciativa privada não esteja claro (Brasil, 2025a). Inúmeras cidades tem apostado em uma retomada parcial dos investimentos públicos para a renovação das frotas, sendo o próprio programa Refrota do Novo PAC uma possibilidade de financiamento com juros baixos de veículos novos via Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) e fundos do Fundo de Garantia do Tempo de Serviço (FGTS), programa ao qual as concessionárias e permissionários de transporte público também tem acesso, além dos próprios municípios (ITDP, 2024; Brasil, 2025a).

Novos modelos de contratos de concessão tem sido discutidos a nível nacional, com uma maior inserção do poder público – a nível municipal e federal – no processo de financiamento do sistema, seja via subsídios diretos ou indiretos, como a previamente mencionada aquisição de frota e repasse para as concessionárias, sendo que a eletrificação das frotas tem sido apontada como uma das saídas para solução dos problemas do transporte público urbano e incentivada a nível nacional (Brasil, 2025a; ITDP, 2024). Enquanto há uma tendência centralizadora nacional quanto às práticas contratuais e de repasses do poder público à iniciativa privada, o mesmo não ocorre quando se trata de uma padronização quanto aos dados abertos e transparência conforme a LAI para facilitar a fiscalização, retirando ou diminuindo a possibilidade da participação cidadã de forma mais qualificada e organizada.

Porém, o próprio modelo de operação privada não é questionado em momento algum. Tais conflitos – presentes em diversas cidades brasileiras – podem estar apontando para um esgotamento das promessas que os discursos pró-privatizações sempre fizeram. O

descumprimento dos contratos ora firmados, as respectivas revisões com aportes diretos e indiretos de dinheiro público nos sistemas, as sucessivas quedas de qualidade dos serviços prestados e os aumentos de tarifa mostram que os resultados prometidos ao longo das últimas décadas não foram atingidos. O que sempre foi tido como eficiência privada pode ser traduzido como precarização, seja dos serviços prestados seja das condições de trabalho a que estão submetidos os trabalhadores do sistema. Afinal, a eficiência se destina às projeções de lucro e obter lucro em transporte público é possível apenas através de aumento das tarifas e/ou diminuição de custos operacionais (precarização do trabalho, não renovação adequada da frota, não cumprimento de cronograma de viagens, etc.). É preciso pautar, também, a reestruturação da operação e do financiamento do transporte público, inclusive com análises que considerem a re-estatização dos sistemas de transporte público, do contrário, estratégias como as defendidas aqui nesta tese, principalmente a eletrificação da frota, podem se tornar apenas transferência de recursos públicos para a iniciativa privada, com os ensejos da população tomados apenas como justificativa para essas transferências. A exemplo do que acontece com empresas de metrô e trem de superfície, ou de fornecimento de serviços básicos como água, esgoto e energia, a modernização do sistema pode servir de argumento para a transferência de recursos públicos para a iniciativa privada através do BNDES e programas como o Novo PAC, onde primeiro se privatiza e depois a empresa que assume o controle das operações recebe um investimento com recursos públicos. No entanto, se há verba para realizar tal investimento, por qual motivo ele não é feito de forma a melhorar a qualidade das empresas públicas e do serviço prestados por elas? Mesmo esse não sendo o foco desta tese, esse apontamento deve ser feito devido à sua importância frente a urgência em reorganização dos sistemas de transporte público no contexto de emergência climática.

5.3 Parametrização e dados de entrada do modelo

Nesta subseção, são detalhados os cálculos de parâmetros do modelo bem como os conjuntos de dados processados para obtenção desses parâmetros.

5.3.1 Conjuntos de dados utilizados

Na sequência, são apresentados os dados relacionados à rede viária e ao sistema de ônibus de Belo Horizonte, disponíveis no BHGEO - Dados Geoespaciais da Prefeitura de Belo Horizonte (PBH) e no Portal de Dados Abertos da PBH, catalogados nas organizações Empresa de Transporte e Trânsito de Belo Horizonte e Superintendência de Mobilidade (Belo Horizonte, 2023b; Belo Horizonte, 2025):

- Circulação Viária: rede que indica o sentido do tráfego destinado à circulação de veículos no município de Belo Horizonte. O arquivo contém o código identificador de cada segmento, a classificação do tipo de trecho de circulação (ex.: trecho de via, trecho de conversão), descrição do tipo de logradouro, nome e código do logradouro e as chaves correspondentes aos nós inicial e final do trecho da circulação viária;
- Circulação Viária - Nó do Trecho: contém a demarcação do início e do fim do trecho da circulação viária por meio de uma camada de pontos no município de Belo Horizonte;
- Rede Prioritária de Ônibus: contém o traçado da rede de priorização do transporte coletivo por ônibus existente conforme PlanMob-BH 2030 e Plano Diretor. O arquivo contém código de identificação das feições, a situação da rede de ônibus (real ou planejada), tipologia de infraestrutura predominante (pista exclusiva, faixa exclusiva, faixa preferencial), ano de implantação do trecho, posição da infraestrutura de priorização implantada na via, podendo ser lateral ou central, em relação ao eixo da via, identificação se o trecho possui o sistema BRT implantado, extensão, tipo e nome do logradouro, e logradouros que fazem interseção com o início e fim do trecho de priorização;
- Itinerário do Transporte Coletivo: conjunto de dados contendo as linhas/rotas de ônibus, as sublinhas, os sentidos (pontos de controle) da sublinha, classificação do sistema de transporte coletivo (Convencional, suplementar, MOVE) e extensão do itinerário;
- GTFS: conjunto de arquivos em padrão GTFS contendo a especificação dos serviços do sistema de transporte convencional (incluso o MOVE) e suplementar;
- Cadastro de Frota do Sistema Convencional: cadastros dos veículos em operação no primeiro dia do mês no sistema de transporte coletivo convencional e MOVE, do município de Belo Horizonte. Foi utilizado o registro referente a outubro de 2024;
- Mapa de Controle Operacional (MCO) Consolidado: arquivos contendo a quantidade de passageiros transportados por linhas, sublinhas, veículos e viagens realizadas no transporte coletivo por ônibus do município de Belo Horizonte. Cabe ressaltar que o conjunto de dados não contém os passageiros transportados nas linhas de bloqueio das Estações do BHBUS e nas linhas de Estações de Transferência do MOVE e, portanto, o MCO não contempla a totalidade de passageiros do Sistema Convencional e MOVE. Foram utilizados os registros de novembro e dezembro de 2024;
- Mapa de Controle Operacional (MCO) Consolidado Suplementar: arquivos contendo a quantidade de passageiros transportados por linhas, sublinhas, veículos e viagens realizadas no sistema de transporte coletivo suplementar do município de Belo Horizonte. Foram utilizados os registros de novembro de 2024;
- Tempo Real do Ônibus - Coordenada atualizada: arquivos para *download*, atualizados a cada 20 segundos, contendo as últimas coordenadas do posicionamento dos ônibus

em operação nas linhas do sistema de transporte convencional municipal inclusive as linhas do MOVE. Contém, entre outras informações, data e hora do registro de posição, coordenadas de posição, número do veículo, velocidade instantânea registrada e código da rota, a partir do qual era possível determinar a rota do sistema utilizando um arquivo de conversão disponibilizado para *download* junto com o conjunto de dados;

- Tempo Real do Suplementar - Coordenada atualizada: arquivos para *download*, atualizados a cada 20 segundos, contendo as últimas coordenadas do posicionamento dos veículos em operação nas linhas do sistema de transporte suplementar. Contém, entre outras informações, data e hora do registro de posição, coordenadas de posição, número do veículo, velocidade instantânea registrada e código da rota, a partir do qual era possível determinar a rota do sistema utilizando um arquivo de conversão disponibilizado para *download* junto com o conjunto de dados;

Dados relacionados a custos:

- Custos de construção: correspondem ao γ_l^c e foram obtidos valores para o cenário nacional de acordo com editais de licitação de obras e através dos dados do programa Novo PAC - Mobilidade Urbana Sustentável - Mobilidade Grandes e Médias Cidades, disponíveis na plataforma TransfereGOV (Brasil, 2025b);
- Custos de aquisição: obtidos junto a planilhas de reajuste tarifário para os veículos a diesel (Belo Horizonte, 2024b; SPTrans, 2024b; URBS, 2024) e em uma consulta de preços realizada pela Prefeitura de São Paulo e pela SPTrans em setembro de 2024 para veículos elétricos (SPTrans, 2024a);
- Custos de manutenção: obtidos junto a planilhas de reajuste tarifário para os veículos a diesel (Belo Horizonte, 2024b; SPTrans, 2024b) e da Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP) (ANTP, 2017; ANTP, 2023);
- Custos de operação: os preços de energia foram levantados junto à Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG), operadora na área de estudo (ANEEL, 2021; ANEEL, 2024; ANEEL, 2025) e os preços de diesel foram obtidos através da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) (ANP, 2024);

Dados relacionados a emissões:

- Coeficientes de emissão de construção de vias exclusivas: adaptação do estudo de Teles et al. (2024), realizado para rodovias no Brasil;
- Coeficientes de emissão de operação: coeficientes de emissão dependente de velocidade, de acordo com a tecnologia adotada e a categoria de veículos (β_1, β_2, β_3, β_4, β_5,

β_6, β_7 e RF), obtidos no anexo de emissões de transporte rodoviário 1.A.3.b.i-iv da EMEP/EEA (2023) (*1.A.3.b.i-iv Road Transport Appendix 4 Emission Factors 2024*).

A partir desse levantamento preliminar de dados e conforme discutido na seção 3.3, foram produzidos os seguintes conjuntos para utilização como dados de entrada do modelo:

- bh_rede: arquivo contendo as informações referentes à rede viária, cujos parâmetros utilizados no modelo são id_rede (código de identificação de cada segmento viário), extensão em quilômetros (Ext_l), velocidades médias estimadas para cada segmento viário para cada intervalo de tempo ($\nu_{0,l,t}$), os incrementos potenciais de velocidade para cada segmento viário ($\Delta\nu_{l,t}$), os custos de construção de acordo com a tipologia de via exclusiva a ser implantada na via (γ_l^{c}), as emissões de construção de vias exclusivas (FE_x^{c}) e $x_l^{existente}$, que delimita o subconjunto de L onde há tráfego exclusivo de ônibus no início do período de análise;
- bh_rotas: arquivo contendo as informações referentes ao sistema de transporte público por ônibus de Belo Horizonte, cujos parâmetros utilizados no modelo são id_rota (código de identificação de cada rota), a frota de veículos em operação no início do período de análise por rota de ônibus, tecnologia adotada e categoria de veículo (m_{i,k,r,t_0}), o número de viagens realizadas no início do período de análise por tipo de tecnologia e por categoria de veículo na rota em cada intervalo de tempo ($N_{i,k,r,t,t0}$), o número de dias equivalentes a um dia típico de operação de cada rota por ano (N_r^{op}) e δ_r^l, uma coluna contendo a lista de todos os segmentos que compõem cada rota;
- parametros_veiculos: arquivo contendo os parâmetros relacionados com os veículos, como os custos de aquisição por tecnologia e tipo de veículo ($\gamma_{i,k}^{\mathrm{aq}}$), os custos de manutenção ($\gamma_{i,k}^{\mathrm{m}}$) e a capacidade das baterias de acordo com a categoria de veículos ($CAP_{b,k}$)
- parametros_emissoes: arquivo contendo o subconjunto de fatores de emissão de EMEP/EEA (2023) pertinentes a esta tese.

O sistema de transporte público de Belo Horizonte, bem como os procedimentos de parametrização do modelo são descritos na sequência.

5.3.2 Horizonte de projeto

A partir do levantamento de dados inicial, foi possível determinar os dados de entrada do modelo para o ano de 2024. Adotou-se um horizonte de projeto de 10 anos. Em Belo Horizonte, um decreto de 2023 alterou os contratos de concessão de transporte público,

admitindo uma idade máxima de operação de 12 anos para veículos a diesel (Belo Horizonte, 2023c). Essa tendência também ocorreu em diversas cidades brasileiras, especialmente após a pandemia de COVID-19, momento em que as concessionárias passaram a alegar dificuldades financeiras para recomposição das frotas e o poder público passou a intervir, tanto por meio de subsídios quanto por meio de alterações legislativas e contratuais para abrandar as responsabilidades das concessionárias.

Quando considerados também veículos elétricos, a duração dos ciclos de vida de ônibus varia entre 7 (Xylia et al., 2019), 8 (BRASIL, 2022b), 10 (Lajunen, 2018) e 12 anos (Bi; Keoleian; Ersal, 2018), em geral para os ônibus elétricos, é adotada uma vida útil menor para as baterias, o que é modelado através de trocas de bateria durante a vida útil do veículo (Cooney; Hawkins; Marriott, 2013; Lajunen; Lipman, 2016; Xylia et al., 2017). No estado de São Paulo, entretanto, a vida útil dos veículos elétricos é contabilizada como 15 anos (São Paulo, 2015a).

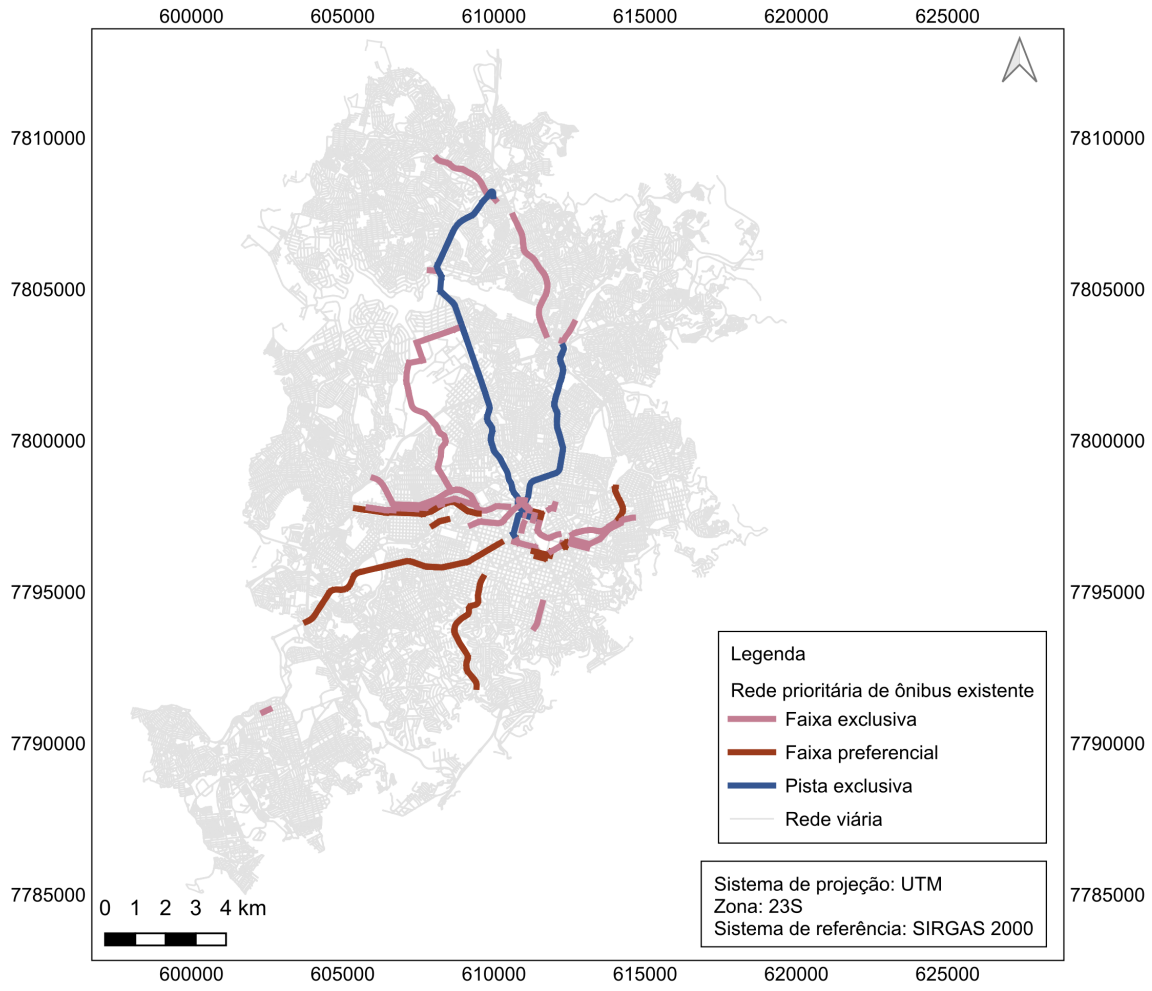
Em relação à construção de vias exclusivas, no Brasil, em geral os pavimentos de concreto tendem a ser dimensionados para atender uma vida útil de 20 anos (Teles et al., 2024). Pelo fato de a vida útil ser maior que o horizonte de projeto, não foram considerados custos de manutenção com a via.

5.3.3 Rede viária

A rede base utilizada foi a obtida no arquivo circulação viária, a partir da qual foram elencados 63.602 segmentos viários com circulação de ônibus na cidade; desses 43.615 são candidatos à implementação de infraestrutura prioritária no modelo e os demais representam trechos da via computados para efeito de cálculo das extensões percorridas, sendo compostos por exemplo por trechos de conversão ou por segmentos dentro de terminais de ônibus. Esses segmentos totalizam 2.926,7 km de rede, sendo que a rede completa de Belo Horizonte possui cerca de 9.130 km de extensão. Dessa forma, contabiliza-se que há circulação de ônibus em 32% da rede. Desse total, apenas 136 km de segmentos possuem algum tipo de priorização viária, o que representa menos de 5% da rede com circulação de ônibus e 1,5% de toda a rede viária, respectivamente. A infraestrutura prioritária existente é composta por três tipologias: pista exclusiva, faixa exclusiva e faixa preferencial, conforme apresentado na Figura 13.

Para a implementação do modelo, foram considerados todos os segmentos viários com circulação de ônibus, exceto por aqueles onde há sistemas prioritários, trechos de estações de ônibus e trechos de conversão, em um total de 2.519 km de vias candidatas. Dessas, 306,6 km são de vias cuja tipologia a ser implantada é de pista exclusiva e os demais 2.212,4 km são de faixas exclusivas.

Figura 13 – Rede prioritária de ônibus existente em Belo Horizonte (2024).



Fonte: Autora (2025), adaptado de Belo Horizonte (2025).

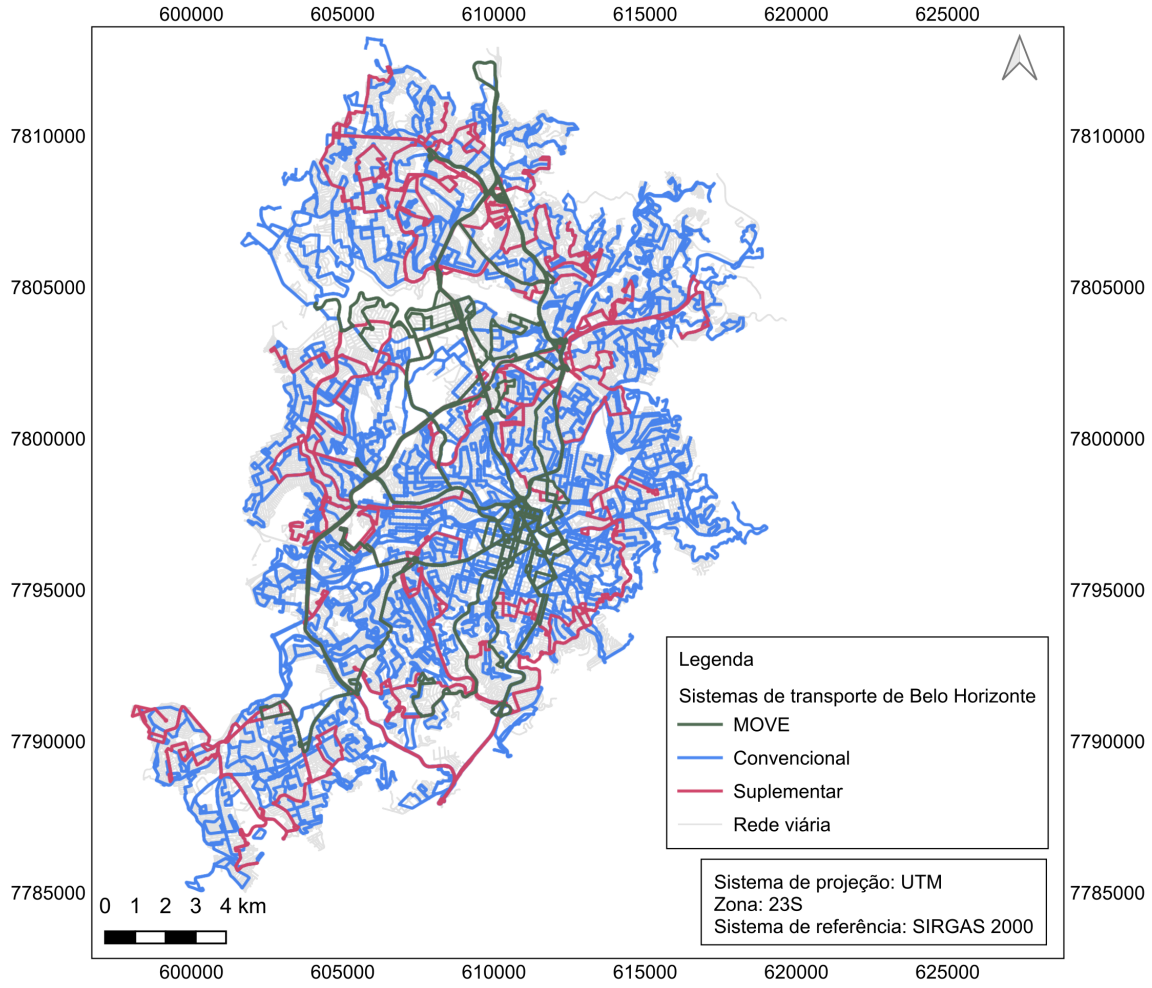
Uma alternativa para aplicação do modelo quando a rede viária não estiver disponível de maneira oficial, isto é, em arquivo geolocalizado emitido por órgão oficial como a prefeitura de um município, é utilizar dados do *Open Street Maps*. Embora nem sempre estejam completos, via de regra apresentam boa qualidade, além de estarem atualizados. Nesta tese, o OSM foi utilizado para a complementação da camada de rede viária disponibilizada pela prefeitura, especialmente em áreas de urbanização mais recente, para as quais nem sempre o mapa oficial estava atualizado.

5.3.4 Rotas

Conforme mencionado anteriormente, o sistema de ônibus de Belo Horizonte é composto pelo MOVE, transporte convencional e suplementar. De acordo com o relatório de novembro de 2024 de dados mensais do sistema de transporte, estão em operação 297 linhas de transporte convencional, 13 linhas de bloqueio das estações e 36 linhas de estações de transferência do MOVE (Belo Horizonte, 2024a). Entretanto, nos dados

GTFS e do MCO, não constam todas as rotas supramencionadas. Os conjuntos de dados apresentam um total de 321 rotas, considerando o MOVE (27), o sistema convencional (270) e o sistema suplementar (24). Uma visão geral das rotas é apresentada na Figura 14.

Figura 14 – Sistema de ônibus existente em Belo Horizonte (2024)



Fonte: Autora (2025), adaptado de Belo Horizonte (2025).

Assim como em diversas cidades, as linhas de ônibus de Belo Horizonte também possuem sublinhas, isto é, itinerários que possuem alguma variação durante o dia ou em algum evento especial. Para efeitos de simplificação, foram considerados os itinerários com maior número de viagens para o dia selecionado no MCO. Os demais itinerários foram contabilizados apenas como número de viagens. Essa simplificação gera uma imprecisão em relação à variável de decisão x_l, uma vez que algumas rotas possuem itinerários significativamente distintos. Ao mesmo tempo, essas rotas compartilham os mesmos veículos, de modo que não fazer a simplificação em relação ao itinerário implicaria em aumentar o tamanho da variável de decisão y_r, com implicações na premissa de *interlinning*. Desse modo, optou-se por manter um único itinerário para cada rota, a despeito das imprecisões causadas em x_l. As imprecisões podem ser descritas da seguinte maneira: ao considerar que duas viagens de sub-rotas distintas em um mesmo itinerário, a implementação da variável x_l

em segmentos do itinerário negligenciado implica em reduzir os impactos potenciais desses segmentos no modelo, ao passo que a implementação de x_l em segmentos considerados no itinerário, superestimaria os impactos de x_l.

Para essa simplificação, também foi necessário um ajuste nas extensões de cada sublinha. Para todas as rotas, assumiu-se que uma viagem realizada em um itinerário diferente do padrão, correspondia a um número equivalente de viagens padrão, podendo ser maior ou menor do que 1, a depender se a sublinha tinha extensão maior ou menor que a rota padrão. Esse procedimento é detalhado na subseção 5.3.13. Essa contabilização também foi aplicada dependendo de como as viagens de cada rota são apresentadas no MCO. Para algumas rotas, o MCO traz os dados referentes a um itinerário completo (ida e volta), enquanto que para outras, as viagens são separadas por ida e volta. Por padronização, foi utilizada a extensão total (ida e volta) do itinerário padrão e todos os dados destoantes desse padrão – seja por como as viagens são computadas, seja por itinerário distinto do padrão – foram contabilizados como uma proporção em relação ao dado base.

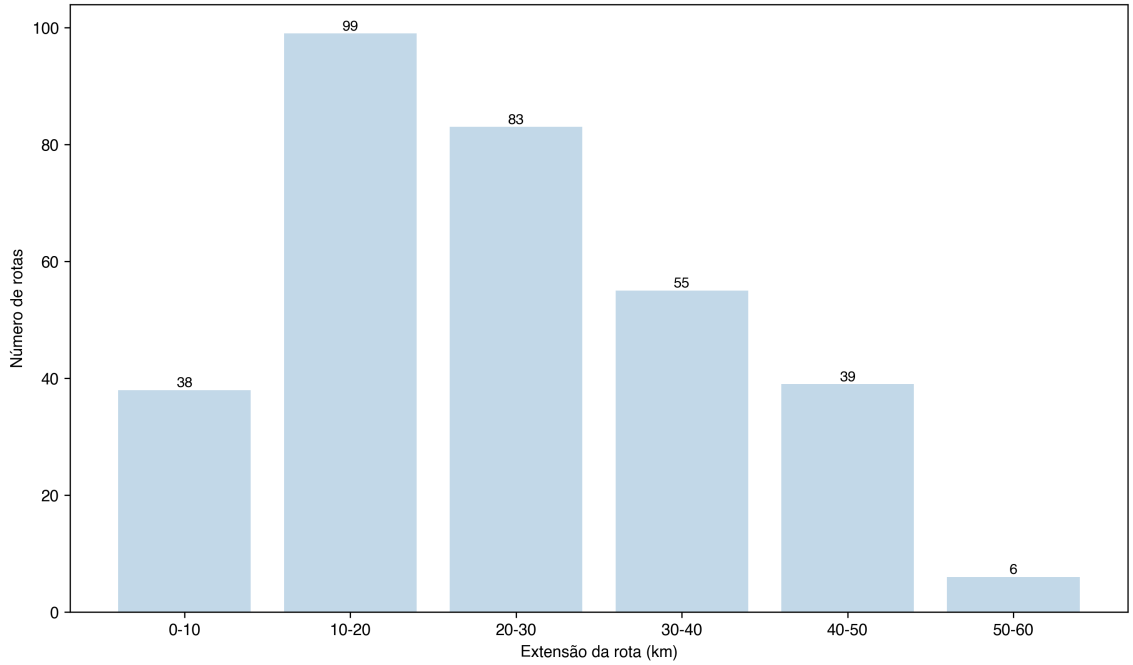
Além disso, outra informação relevante para o sistema de Belo Horizonte é o número de rotas com grandes extensões, uma vez que isso pode ter um impacto na possibilidade de eletrificação da frota. Um histograma das extensões de rotas é apresentado na Figura 15, onde é possível verificar que 101 rotas da rede possuem uma extensão de mais de 30 km e 46 tem extensão maior do que 40 km. A depender da frota disponível para a rota, pode ser tecnicamente inviável eletrificar ela, isto é, se poucos veículos operarem em rotas extensas, pode ser necessário que eles percorram grandes extensões diárias, cenário no qual o patamar atual de tecnologia de ônibus elétricos ainda restringe as extensões máximas diárias em virtude da autonomia da bateria.

5.3.5 Ajuste das rotas de ônibus à rede viária

A partir da utilização da velocidade como um parâmetro dentro do modelo, surge a necessidade de uma vinculação precisa entre rotas e segmentos viários da rede. Em geral, modelos clássicos de transporte denominam essa etapa de planejamento de transporte como escolha de rota (*do inglês routing ou route choice*). Existem diversos modelos conhecidos na literatura, sendo que o mais destacado deles é o modelo de caminho mais curto de Dijkstra (Ortúzar; Willumsen, 2011). Existem diversos pacotes para implementação de processos de escolha de rotas, o software QGIS tem uma função nativa do modelo de caminho mais curto de Dijkstra e os pacotes r5py / r5r para linguagem Python e R, respectivamente, podem ser usados para gerar matrizes de tempos de viagens para diferentes modos de transporte (Fink et al., 2022).

Entretanto, a determinação de escolha de rota ou de criação de novas rotas não

Figura 15 – Histograma da extensão das rotas em Belo Horizonte (2024)



Fonte: Autora (2025), adaptado de Belo Horizonte (2025).

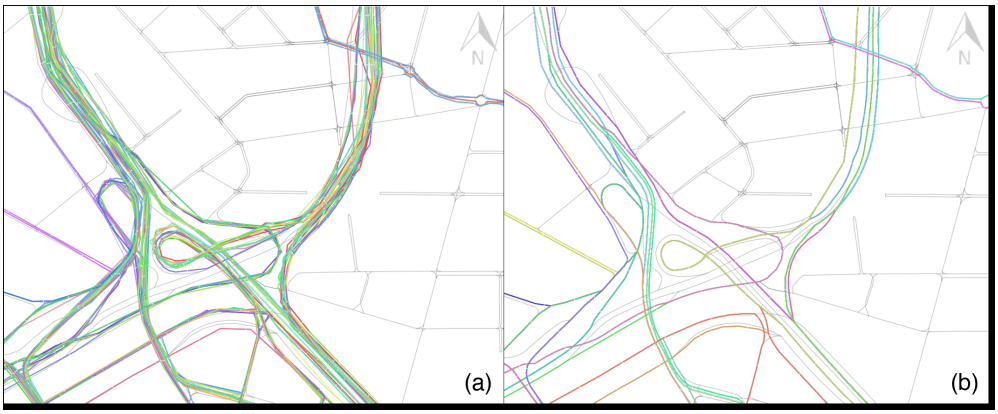
contempla a situação de listar os segmentos de rotas existentes, principalmente porque as rotas não necessariamente seguem o caminho mais curto entre dois pontos. Em geral, os estudos envolvendo apenas as rotas de ônibus podem negligenciar esse aspecto e trabalhar com a rede de transporte público segmentada entre pontos de parada; esse procedimento é adotado por exemplo, nos pacotes gtfs_functions e no complemento para QGIS *Trajectools* (Graser; Dragaschnig, 2024; Toso; Oja, 2024). Por outro lado, a segmentação de rotas existentes, como por exemplo, as de GTFS e a sua transformação em grafos ou vinculação com a rede viária não é trivial e foram localizadas poucas ferramentas que buscam realizar essa tarefa. Uma delas é o pacote *peartree* (Butts; Culbertson; Gertin, 2021), mas ele não é atualizado há cerca de quatro anos. O pacote utiliza o NetworkX, um pacote voltado a análises de rede usando grafos. Outra tentativa de segmentar dados GTFS para dados OSM foi realizada por Blanc e Carraher (2022), os autores apresentaram uma demonstração de aplicação no repositório do pacote, mas a ferramenta ainda é incipiente. Em geral, todas as referências citadas trabalham com algum grau de ajuste de mapas (do inglês *map matching*), mas o problema não é trivial porque o alinhamento precisa estar correto com os segmentos viários, inclusive com o sentido de circulação.

Devido ao grau de precisão necessário nesta tese, o ajuste foi realizado manualmente para todas as rotas sob estudo e aponta-se como uma oportunidade de pesquisa futura, o desenvolvimento e/ou aprimoramento das ferramentas mencionadas, de modo que lidem com esse problema de forma mais sistemática. Essa segmentação também é fundamental, por exemplo, para utilização de dados de transporte público em redes multimodais,

especialmente em estudos que envolvam mudanças de infraestrutura, embora isso esteja fora do escopo desta tese.

A Figura 16 apresenta uma demonstração dos ajustes que foram realizados, com enfoque na área do cruzamento da Avenida do Contorno com o Viaduto Leste em Belo Horizonte. As rotas de GTFS, embora com um certo grau de precisão, não estão completamente alinhadas com a rede de circulação viária (Figura 16(a)), essas imprecisões podem ser particularmente relevantes em elementos complexos da rede, como viadutos, conforme ilustrado na figura, levando à seleção incorreta dos segmentos que compõem a rede. O primeiro passo para realizar esse ajuste foi a utilização da ferramenta "Ajustar geometria à camada" do QGIS, com a configuração "Preferir o ponto mais próximo, inserir vértices quando necessário". Esse primeiro ajuste reduziu o trabalho manual, mas ainda assim apresentou um alto grau de imprecisão, especialmente em relação ao sentido de circulação. Por fim, todas as rotas foram revisadas manualmente e ajustadas com a ferramenta de vértices do QGIS. Para a criação da lista de segmentos que pertencem a cada rota, foi utilizado um *buffer* de 1 metro e selecionados os segmentos viários contidos dentro do *buffer* de cada rota através da ferramenta "Unir atributos por localização". Novamente, o tamanho do *buffer* e o alinhamento dos segmentos é importante para selecionar corretamente os segmentos que pertencem à rota e não selecionar equivocadamente segmentos não pertencentes. O procedimento foi validado conferindo a extensão original aferida no GTFS com a extensão obtida através da soma das extensões dos segmentos selecionados. As rotas com distorções significativas nas distâncias entre ambos os métodos foram novamente revisadas e corrigidas. Ainda assim, existem divergências nas extensões das rotas obtidas após o alinhamento, que são – via de regra – maiores que as aferidas nas feições originais do GTFS. Entretanto, ressalta-se que, em geral, a diferença da maioria das rotas é de 1-2% da extensão total e que o alinhamento das rotas à rede viária é um procedimento mais refinado que o utilizado para geração dos dados GTFS originais.

Figura 16 – Demonstração de ajustes feitos nas rotas do arquivo GTFS na região do cruzamento da Avenida do Contorno com o Viaduto Leste em Belo Horizonte.



Fonte: Autora (2025), adaptado de Belo Horizonte (2025). Nota: À esquerda (a) dados originais, à direita (b) dados ajustados.

5.3.6 Custos e emissões relacionadas à implantação de vias exclusivas

Em relação aos custos de construção de vias exclusivas, foram necessárias algumas premissas para levantar custos. O último momento na história recente no qual houve investimentos massivos em infraestrutura prioritária para transporte público remonta ao início da década de 2010, com eventos como os protestos de junho de 2013, a Copa do mundo de 2014 e em especial no Rio de Janeiro, a realização das Olimpíadas de 2016, alavancando grandes aportes de investimento. A partir de dados levantados pela NTU (2015), foi possível aferir que naquele momento, os gastos médios para sistemas BRT ficaram em torno de R$40,3 milhões/km, enquanto que para a implantação de corredores de ônibus o custo médio era de cerca de R$12,2 milhões/km. Para as faixas exclusivas, os dados são mais escassos, embora tenha havido um grande número de projetos implementados nesse período. Em 2013, a NTU (2013) estimava que os custos seriam da ordem de R$ 100 - 500 mil/km.

Para a determinação dos custos atuais de construção de faixas exclusivas, foram utilizados os dados do programa Novo PAC - Mobilidade Urbana Sustentável - Mobilidade Grandes e Médias Cidades, disponíveis na plataforma TransfereGOV (Brasil, 2025b; Brasil, 2025a). Foram considerados projetos de Diadema (proposta n. 56000001438/2023), Florianópolis (proposta n. 56000001419/2023), Fortaleza (proposta n. 56000004187/2023) Mauá (proposta n. 56000000360/2023), Santo André (proposta n. 56000000776/2023) e São Bernardo do Campo (proposta n. 56000000935/2023), com distintas variações de projetos para integração com ciclovias, desapropriações e obras de arte especiais como viadutos, pontes e trincheiras. O menor valor por quilômetro foi na cidade de Florianópolis, cujo custo é de cerca de R$ 4,4 milhões/km em um projeto sem ciclovias, obras especiais e desapropriações. O maior custo por quilômetro foi o de Mauá, de aproximadamente 15,5 milhões/km, em um projeto que prevê a implantação ciclofaixas na via e inclui 3 obras de arte. A média de custos foi R$ 9.818.071,51, sendo adotado o parâmetro de R$ 10 milhões por km de faixa exclusiva construída. Para a construção de sistemas BRT completos, foram utilizadas os custos do TransfereGOV para a cidade de Florianópolis (proposta n. 56000001419/2023), com custos em torno de R$ 26 milhões/km, do corredor BRT Sul de Brasília, com custos de cerca de R$ 28,3 milhões/km (Brasília, 2025b) e do corredor BRT Radial Leste I de São Paulo, com custos da ordem de R$ 45,3 milhões/km (São Paulo, 2023a), gerando uma média de cerca de R$38,1 milhões/km, sendo adotado o parâmetro de R$40 milhões por quilômetro para implementação do modelo.

Nota-se que em relação ao histórico de preços apresentados na década anterior, os custos de sistemas BRT se mantiveram aproximadamente no mesmo patamar; se fosse considerada a inflação do período, pode-se afirmar que os custos atuais são menores. Por outro lado, as estimativas de que as faixas exclusivas custariam entre R$ 100-500 mil/km,

mesmo que atualizadas por índices inflacionários, resultariam em valores inferiores aos observados atualmente. Cabe salientar também que a maioria dos projetos envolvendo faixas exclusivas e sistemas BRT atualmente utilizam pavimentos rígidos e incluem também a melhoria de infraestrutura de pedestres e integração com ciclovias e ciclofaixas, ao passo que a resposta imediata às demandas populares durante a metade da década de 2010 podem ter tido custos menores, mas as infraestruturas podem não ter sido corretamente planejadas para o médio e longo prazo, sem a inclusão, por exemplo, de pavimentos rígidos e integração com modos de transporte ativo.

Para os dados de emissões de construção, em geral a literatura apresenta apenas os valores de fatores de emissão de CO_2 ou CO_2eq. Portanto, as emissões de construção estão restritas a esse poluente. Para considerar dados referentes à realidade brasileira, para o parâmetro FE_x^c foi adotado o valor de 290 [tCO_2/km] para pavimentos de concreto, adaptado de Teles et al. (2024). Cabe apontar que no estudo em questão, são comparados dois sistemas de pavimentos (asfáltico e de concreto) para uma configuração de rodovia contendo duas semipistas de 3,6 metros e acostamento em ambos os lados com 2,5 metros cada. Desse modo, o valor de 973,89 [tCO_2/km] foi adaptado para representar uma única faixa de via exclusiva de 3,6 metros. Para determinar os fatores de emissão, os autores avaliaram as etapas de produção dos materiais, operações de transporte e atividades executivas de equipamentos. Os resultados obtidos por Ghate e Qamar (2020) demonstraram que emissões referentes à construção de estações representam uma fração pequena das emissões totais e, a partir disso, essas emissões não foram consideradas nesta tese.

5.3.7 Categorias de veículos k e frota atual por rota (m_{i,k,r,t_0})

De acordo com IEMA (2017) e Vieira, Pereira e Andrade (2023), é possível fazer uma equivalência entre os veículos que operam nos sistemas de transporte público em São Paulo com os veículos em operação na Europa, conforme a Tabela 6. Isso é particularmente importante nesta tese porque o modelo de emissões empregado foi o europeu (EMEP/EEA, 2023), ou seja, os padrões de emissão são validados para veículos da Europa e sua reprodução depende dessa equivalência entre as frotas.

O relatório de novembro de 2024 dos "Dados mensais do Sistema de Transporte por Ônibus Convencional e MOVE" de Belo Horizonte (Belo Horizonte, 2024a) aponta que os fabricantes da frota em operação no município são Mercedes (2.367), Volvo (115), Scania (39) e Volkswagen (245) (outros corresponde a 5 veículos; a frota total registrada no relatório é de 2.771 veículos), ou seja, também para Belo Horizonte é possível adotar um padrão de equivalência entre os ônibus em operação no Brasil e os europeus. O relatório também apresenta as características dos padrões de veículos da frota, conforme observado

Tabela 6 – Equivalência entre as categorias de ônibus urbanos de São Paulo e do modelo EEA.

Categoria SPTrans	Capacidade de passageiros	Categoria EMEP/EEA
Micro	21	Ônibus midi | Midi bus (<15 t)
Mini	40	
Midi	60	Ônibus convencional | Bus Standard (15–18 t)
Básico	68	
Padron	88	
Articulado	112	Ônibus articulado | Articulated bus (>18 t)
Biarticulado	170	

Fonte: Adaptado de IEMA (2017) e Vieira, Pereira e Andrade (2023).

na Tabela 7, de modo que foi possível criar a equivalência apresentada na Tabela 8. Entretanto, apesar de a tabela de equivalência categorizar veículos convencionais tendo peso bruto maior do que 20 toneladas, ao avaliar os veículos dessa categoria presentes na frota, notou-se que todos possuem capacidades de peso bruto total de até 17 toneladas, se encaixando, portanto, na categoria de ônibus convencional (*bus standart* (15–18 t)). Para o sistema suplementar, todos os veículos foram categorizados como ônibus midi (*midi bus* (<15 t)).

Tabela 7 – Características dos padrões de veículos da frota de Belo Horizonte.

Tipo		Padrão	Características
Leve	-	10	Peso bruto total até 10 t, potência igual ou superior a 115 cv, uma ou duas portas.
Pesado	Convencional	38	Peso bruto até 20 t, potência igual ou superior a 200 cv, motor dianteiro, duas ou três portas e caixa manual.
	Convencional	83	Peso bruto até 23 t, potência igual ou superior a 210 cv, motor dianteiro eletrônico, duas ou três portas e caixa manual.
	Padron	85	Peso bruto até 17 t, potência igual ou superior a 238 cv, motor dianteiro eletrônico, caixa mecânica, portas no lado direito (LD) e no lado esquero (LE).
	BRT Misto	86	Peso bruto até 17 t, potência igual ou superior a 260 cv, motor dianteiro eletrônico, caixa mecânica, portas LD e LE.
Articulado	-	84	Peso bruto total até 28 t, potência igual ou superior a 354 cv, três eixos, conjunto chassi/carroceria com articulação, motor eletrônico traseiro, caixa automática, portas LD e LE.

Fonte: Adaptado de Belo Horizonte (2024a).

Para o cálculo da frota atual em operação para cada rota (m_{i,k,r,t_0}), foram utilizados os conjuntos de dados MCO convencional e suplementar e o cadastro de frota do sistema convencional para outubro de 2024 (Belo Horizonte, 2025). Uma vez que a frota da cidade vem sendo renovada, alguns veículos não tiveram cadastro localizado e assumiu-se que os

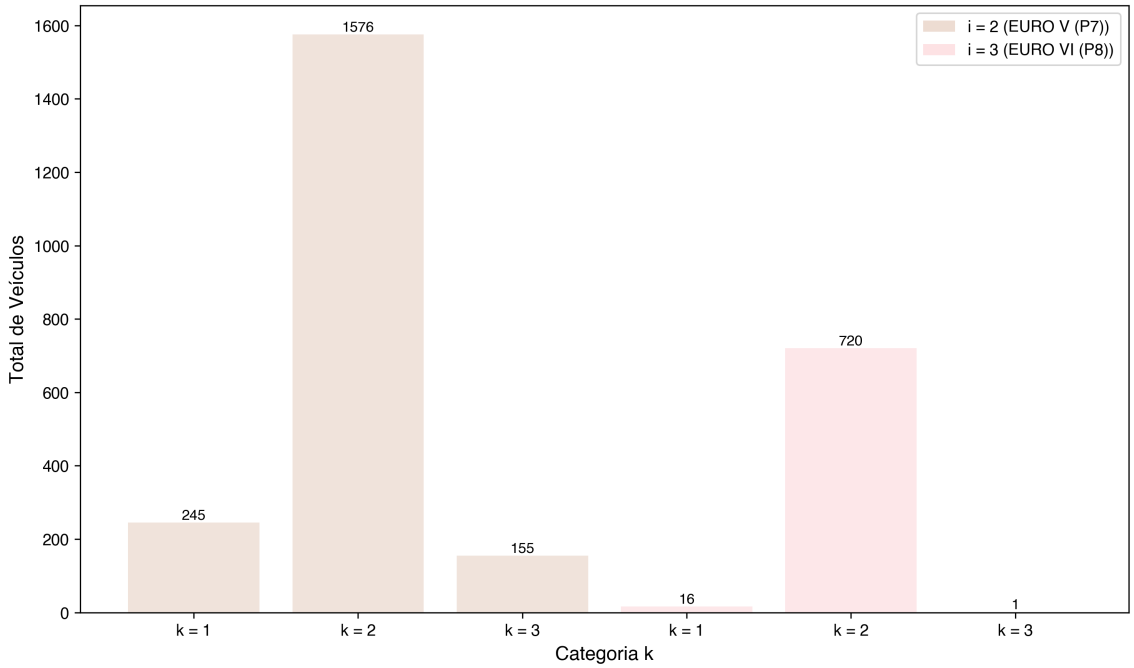
Tabela 8 – Equivalência entre as categorias de ônibus urbanos de Belo Horizonte e do modelo EEA.

Categoria BHTrans	Categoria EMEP/EEA	Categoria k
Minionibus	Ônibus midi | Midi bus (<15 t)	1
BRT *Padron*	Ônibus convencional | Bus Standard (15–18 t)	2
BRT misto		
Convencional		
BRT articulado	Ônibus articulado | Articulated bus (>18 t)	3

Fonte: Autora (2025).

veículos eram do tipo EURO VI (P8) e da categoria equivalente a rotas do mesmo tipo, de acordo com Belo Horizonte (2024a). Até o momento de finalização desta tese não havia veículos elétricos na frota de Belo Horizonte, apesar de o município ter sido contemplado com recursos para a compra de 100 veículos elétricos no programa Refrota dentro do Novo PAC (Brasil, 2025a). A Figura 17 mostra a composição da frota em 2024.

Figura 17 – Composição da frota de Belo Horizonte (2024) por tecnologia i categoria k.



Fonte: Autora (2025).

5.3.8 Parâmetros relacionados aos veículos

Os custos de aquisição de veículos foram obtidos junto a planilhas de reajuste tarifário para os veículos a diesel e em uma consulta de preços realizada pela Prefeitura de São Paulo e pela SPTrans em setembro de 2024 para veículos elétricos (Belo Horizonte, 2024b; SPTrans, 2024b; SPTrans, 2024a; URBS, 2024). Em relação à capacidade de baterias, também foram adotados dados obtidos junto à SPTrans, de modo a garantir uma equivalência entre os dados de capacidade e custos. Ambos os parâmetros são apresentados

na Tabela 9. Não foi admitida a aquisição de veículos EURO V (P7), uma vez que não é mais permitido pela legislação vigente.

Os veículos elétricos selecionados foram:

- $k = 1$: veículo fornecido pela Caio, com chassi da Mercedes e integrado pela Eletra, da categoria midi e capacidade da bateria de 330 kWh;
- $k = 2$: veículo fornecido pela Caio, com chassi da Mercedes e integrado pela Eletra, da categoria Básico e capacidade da bateria de 423,6 kWh
- $k = 3$: veículo fornecido pela Caio, com chassi e integração da BYD, tipo de veículo Articulado 21 metros e capacidade da bateria de 590 kWh.

Tabela 9 – Custos unitários de aquisição de ônibus.

Parâmetro	Capacidade da bateria ($CAP_{b,k}$; kWh)	Custo de aquisição
$\gamma^{aq}_{i=1,k=1}$	330	R$ 2.543.000,00
$\gamma^{aq}_{i=1,k=2}$	423,6	R$ 2.716.000,00
$\gamma^{aq}_{i=1,k=3}$	590	R$ 4.410.000,00
$\gamma^{aq}_{i=3,k=1}$	-	R$ 420.000,00
$\gamma^{aq}_{i=3,k=2}$	-	R$ 790.000,00
$\gamma^{aq}_{i=3,k=3}$	-	R$ 1.270.000,00

Fonte: Autora (2025), adaptado de Belo Horizonte (2024b), SPTrans (2024a), SPTrans (2024b) e URBS (2024).

Os custos de manutenção englobam despesas de rodagem, lubrificantes, Arla32 para veículos a diesel e peças e acessórios. Os valores para esses parâmetros foram obtidos em planilhas de reajuste tarifário (Belo Horizonte, 2024b; SPTrans, 2024a) e em relatórios técnicos (ANTP, 2023). Os dados de Belo Horizonte consistem apenas de veículos a diesel, os da ANTP apenas de veículos elétricos e os da SPTrans são mistos, embora os custos de peças e acessórios para veículos elétricos da SPTrans tenham sido desconsiderados por incluírem despesas de infraestrutura; quando disponível mais de uma fonte de dados para um parâmetro, foi utilizada a média aritmética dos valores. Exceto por São Paulo que estratifica os custos de acordo com a idade da frota, não foram localizados dados precisos que relacionam a tecnologia dos veículos a diesel com parâmetros distintos de manutenção, o que acarretou na decisão de utilizar os mesmos parâmetros de manutenção para as tecnologias EURO V (P7) e EURO VI (P8), com distinção apenas entre as categorias k. Ressalta-se também que há muita incerteza em relação aos parâmetros de manutenção de veículos elétricos. Em geral, na literatura é apresentado que os veículos elétricos requerem manutenção menor, uma vez que a menor quantidade de peças móveis e a não ocorrência de combustão desgastam menos os motores elétricos (Callegari et al., 2025; EPE, 2020; Ercan et al., 2015; Teoh et al., 2018) e estudos apontam que os custos de manutenção de ônibus elétricos podem ser até 25% menores que os de ônibus a diesel (EPE, 2020); essa

premissa foi adotada na tese quando não havia valores reais para determinadas categorias de veículos.

Os custos de manutenção foram reajustados pela média histórica de inflação efetiva (medida pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), em %) entre os anos de 2015 e 2024, obtendo-se um valor médio de 5,779% ao ano (Banco Central do Brasil, 2025); foi calculado o respectivo custo $\gamma_{i,k}^{m}$ para cada ano futuro no horizonte de projeto e calculada a média desses valores. Os valores utilizados no modelo são apresentados na Tabela 10, tanto para o ano base quanto para os demais anos do horizonte de projeto. Os dados de veículos EURO V (P7) ($i = 2$) foram utilizados para cálculo do cenário atual.

Tabela 10 – Custos de manutenção por tecnologia i e categoria de veículo k no ano base e no horizonte de projeto.

Parâmetro	Custos de manutenção (2024; R$/km)	Custos de manutenção (Horizonte de projeto; R$/km)
$\gamma_{i=1,k=1}^{m}$	R$0,4644	R$0,6408
$\gamma_{i=1,k=2}^{m}$	R$0,5228	R$0,7213
$\gamma_{i=1,k=3}^{m}$	R$0,6694	R$0,9237
$\gamma_{i=2,k=1}^{m}$	R$0,6192	-
$\gamma_{i=2,k=2}^{m}$	R$0,6970	-
$\gamma_{i=2,k=3}^{m}$	R$0,8926	-
$\gamma_{i=3,k=1}^{m}$	R$0,6192	R$0,8543
$\gamma_{i=3,k=2}^{m}$	R$0,6970	R$0,9618
$\gamma_{i=3,k=3}^{m}$	R$0,8926	R$1,2316

Fonte: Autora (2025), adaptado de ANTP (2023), Banco Central do Brasil (2025), Belo Horizonte (2024b) e SPTrans (2024b).

5.3.9 Autonomia de baterias

Análises preliminares para a rede de Belo Horizonte mostraram que a cidade possui inúmeras linhas com alta quilometragem diária por veículo (em algumas rotas, há veículos que operam mais de 400km/dia). O estudo de Leitão, Ferreira Jr e Costa (2024) aponta que como o baixo índice de passageiros por quilômetro (IPK) observado no sistema de Belo Horizonte pode ser um indicativo de que o sistema carece de uma maior racionalização das rotas. Os autores salientam a necessidade de realizar uma investigação qualitativa da rede para resultados mais robustos acerca do indicador, mas de forma geral, pode haver um impacto da dispersão urbana sobre a organização do sistema de transporte. Embora esta tese não considere modificações na rede de ônibus, é importante destrinchar os desdobramentos que a configuração atual impõe sobre o processo de eletrificação da frota.

Para uma rede com essas características, utilizar apenas a estratégia de recarga noturna poderia inviabilizar a eletrificação da frota. Um exemplo: sem utilizar recarga de

oportunidade, mesmo que sejam adotadas baterias com capacidade equivalente a veículos do tipo $k = 3$ para veículos $k = 2$, isto é, 590 kWh ao invés de 423,6 kWh, ao final do horizonte de projeto (10 anos) considerando uma degradação da bateria que chega a 75% da capacidade inicial, apenas 33,3% das rotas continuariam com a operação garantida, sendo que no período inicial considerando 100% da capacidade, esse percentual é de 85,7%; esse cálculo foi realizado utilizando uma taxa de decaimento linear anual da capacidade da bateria de 2,5%, em uma extrapolação ao cenário apresentado em BRASIL (2022a), onde a bateria atinge 20% de perda de capacidade em oito anos. Ou seja, em uma análise preliminar, com a rede mantida constante, não é possível pensar na eletrificação do sistema (em um projeto de longo prazo) sem considerar recarga de oportunidade ao longo do dia.

Uma vez observada a necessidade de recargas de oportunidade, foi necessário demonstrar que essas recargas eram viáveis, isto é, que o tempo de recarga seria praticável com a operação. Embora o planejamento dos sistemas de energia não seja foco desta tese, realizou-se um pequeno exercício para demonstrar essa viabilidade. Analisando o cenário mais crítico do final de vida útil, onde considera-se que a degradação da bateria só permite que o estado de carga máximo da bateria chegue a apenas 75% da capacidade nominal e considerando carregadores de 160 (2x80kW) para veículos midi e convencional e carregadores de 200 (2x100kW) para veículos articulados, determina-se o tempo necessário de recarga de oportunidade como:

$$t_{recarga} = \frac{\text{Energia recarga}}{\text{Potência} \cdot 0,9} \tag{5.1}$$

Os resultados dessa análise (Tabela 11) mostram que se no final do horizonte de projeto, quando a bateria atinge 75% da capacidade inicial como SoC_{max}, e é realizada apenas recarga noturna (correspondendo a $N_{ciclos\ eq.} = 1$), um total de 33 rotas atenderiam à restrição de autonomia, enquanto que se forem feitas recargas equivalentes a 2 ciclos, 289 rotas atendem à restrição. A duração da recarga de oportunidade nesse cenário é de até 2h, dependendo da categoria do veículo. Aponta-se que esse é o cenário mais crítico de operação das baterias, isto é, ao final da vida útil delas e os tempos de recarga são potencialmente viáveis.

Tabela 11 – Análise de rotas viáveis para eletrificação de acordo com estados de carga da bateria.

SoC_{max}	$N_{ciclos\ eq.}$	Energia disponível	Rotas passíveis de eletrificação	Duração da recarga de oportunidade
0,75	1	$0,55 \cdot CAP_{b,k}$	33 (10,3%)	-
0,75	2	$1,10 \cdot CAP_{b,k}$	289 (90%)	1-2h

Fonte: Autora (2025).

Ainda assim, aponta-se que as recargas de oportunidade podem ser feitas de modos distintos. Alguns autores (vide por exemplo Yao et al. (2020)) e municípios como Curitiba (ITDP, 2024), optam por recolher os veículos para as garagens nos horários entre picos (geralmente entre 10h e 15h) para recarga, enquanto que outra alternativa é a eletrificação

de terminais e paradas de ônibus (Gairola; Nezamuddin, 2022; Lajunen, 2018; Xylia et al., 2017). A estratégia de recolher os veículos nas garagens faz com que a distância morta percorrida aumente, além de inutilizar o veículo por um determinado período de tempo, ao passo que diminui os custos com infraestrutura de recarga. A eletrificação de terminais, por outro lado, diminui as distâncias mortas e os veículos podem ser recarregados durante os períodos entre viagens, entretanto, os custos de implantação de infraestrutura serão maiores.

Na implementação do modelo, foi considerado que as recargas de oportunidade ocorrem nos períodos fora de ponta, isto é, não há alteração do preço de energia se os veículos recarregarem até determinado horário do dia. Embora isso varie de acordo com cada concessionária de energia, em geral os períodos de ponta e intermediários ocorrem simultaneamente com o período do pico da tarde de operação do transporte público, de modo que é plausível admitir que os veículos não vão ser recarregados nesse período também em virtude de restrições temporais de operação. Esse cenário é condizente com a precificação de energia no Brasil, embora possa não ser válido em outros contextos de precificação dinâmica de energia. Por fim, cabe apontar também que as recargas de oportunidade podem degradar mais rapidamente a bateria, sendo necessária, portanto, a realização de manutenção preventiva e monitoramento da saúde da bateria.

5.3.10 Preços de combustível

O preço do óleo diesel S10 foi estimado a partir da média anual do preço de distribuição para o ano de 2024 apresentado na série histórica da ANP (2024). Salienta-se, entretanto, que o valor pago pelas concessionárias pode variar, por exemplo, de acordo com o volume comprado, a disponibilidade de tanques próprios de armazenamento e a distância para a base de distribuição (EPE, 2020). Em Belo Horizonte, o preço médio para 2024 foi R$5,345/l, enquanto que na planilha de reajuste tarifário o preço considerado do diesel – referente a setembro de 2024 – foi de R$4,60/l (Belo Horizonte, 2024b). Mesmo assim, foi adotado o valor obtido junto à ANP, pelo possibilidade de replicá-lo a outros estudos de caso e pela sua disponibilidade, enquanto que os dados do reajuste tarifário de Belo Horizonte se baseiam em notas fiscais dos operadores do sistema de transporte e não estão disponíveis publicamente para averiguação.

Para o preço da energia elétrica, foi considerado que os ônibus serão carregados de madrugada nas garagens e as recargas de oportunidade ocorrerão fora dos períodos de ponta e intermediários, e o operador pode, portanto, usufruir de tarifas mais baratas por serem períodos fora de ponta. Foram levantados os dados de preços de energia para o Grupo A4 (EPE, 2020), vigentes para 2024 para a companhia CEMIG, realizada uma média ponderada de acordo com as bandeiras tarifárias (oito meses de bandeira verde,

dois meses de bandeira amarela, um mês de bandeira vermelha 1 e um mês de bandeira vermelha 2) e aplicados os tributos incidentes sobre a energia elétrica (36%). Desse modo, o preço médio aferido para 2024 em Belo Horizonte foi de R$0,5903/kWh (ANEEL, 2021; ANEEL, 2024; ANEEL, 2025).

Os preços do óleo diesel e de energia foram reajustados pela média histórica de inflação efetiva (medida pelo IPCA, em %) entre os anos de 2015 e 2024, obtendo-se um valor médio de 5.779% ao ano (Banco Central do Brasil, 2025); foi calculado o respectivo preço para cada ano futuro no horizonte de projeto e calculada a média desses valores, os preços médios no horizonte de projeto aplicados no modelo são R$7,3754/L para o óleo diesel S10 e R$0,8145/kWh para energia elétrica.

5.3.11 Dias equivalentes de operação anual ($N_r^{\mathbf{op}}$)

Foi realizada uma análise preliminar em relação aos dias de operação, para selecionar um dia típico. A partir dos dados de GTFS e do MCO, verificou-se que não há diferença significativa entre os dias úteis e optou-se por adotar uma quarta-feira, particularmente o dia 06/11/2024. Em virtude de alterações em algumas rotas no final de novembro de 2024, o conjunto de dados desse dia foi mesclado com o dia 05/12/2024. As alterações correspondem a modificações nas rotas 2036, 209, 9214 e 9211 (atendimento Centro de Saúde – Havaí) (Belo Horizonte, 2024c). Para além dessa alteração, foram comparadas as quartas-feiras do mês de novembro de 2024 e não houve diferenças significativas de operação. Portanto, esse conjunto de dados foi adotado como representativo de um dia típico de operação. Além disso, em Belo Horizonte, algumas rotas operam apenas aos domingos, para as quais foi tomado como dia típico o dia 03/11/2024, depois de ser realizada uma verificação de que não havia diferença de operação entre os distintos domingos e feriados.

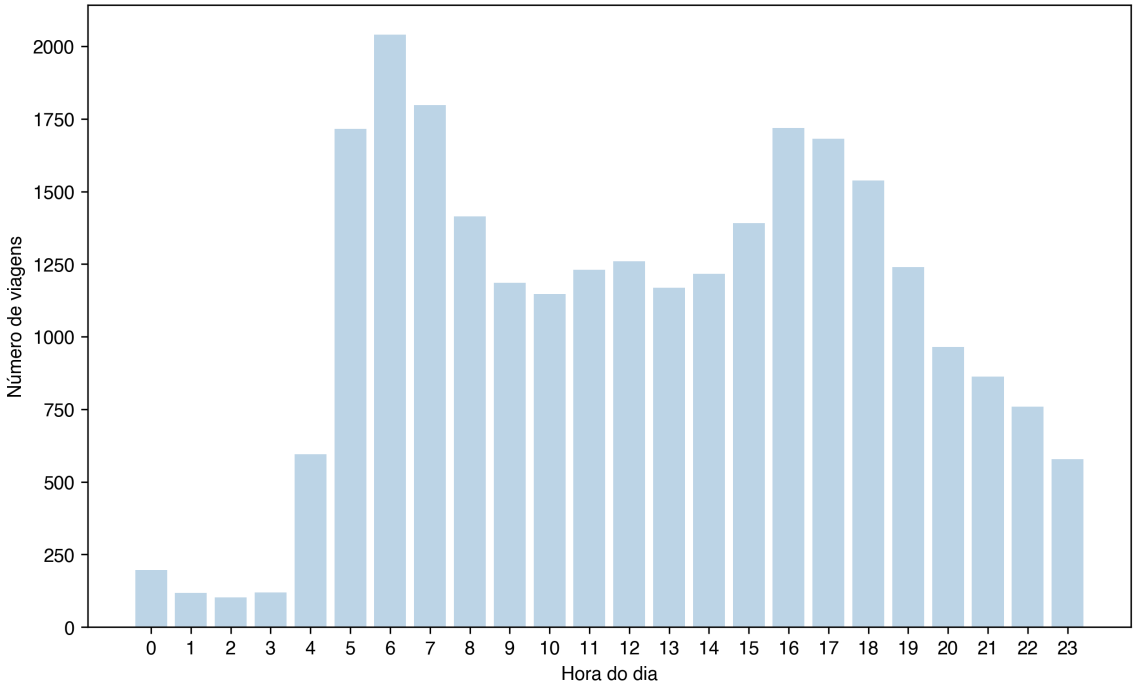
Para a estimativa de dias equivalentes de operação anual, isto é, o número de vezes que o padrão de viagem adotado como típico se repete ao longo de um ano, foram analisados os dados do MCO de novembro e 2024 para calcular a proporção de viagens de sábados, domingos e feriados em relação aos dias úteis, conforme Equação 3.6 apresentada no Capítulo 3. Para rotas que operam apenas aos domingos, foi estabelecido que o N_r^{op} era igual ao número de domingos e feriados de 2024, ou seja, 63.

5.3.12 Intervalos de tempo t

Ao analisar a distribuição horária de viagens para um dia típico de operação em Belo Horizonte, é possível perceber que existem 5 períodos distintos de operação e, portanto, foram definidos 5 intervalos de tempo para análise do modelo. O primeiro intervalo t_1 ocorre de madrugada, das 00:00 até 04:59, seguido pelo pico da manhã t_2 que vai das 05:00

às 08:59, do entre picos t_3 das 09:00 às 14:59, do pico tarde t_4 das 15:00 às 18:59 e, por fim, t_5 que corresponde ao intervalo das 19:00 às 23:59.

Figura 18 – Distribuição horária de viagens para um dia típico de operação em Belo Horizonte.



Fonte: Autora (2025).

5.3.13 Número de viagens realizadas para cada rota em um dia típico

Para a determinação do número de viagens realizadas em um dia típico de operação, foram utilizados os dados do MCO para o sistema convencional e suplementar. Conforme apresentado anteriormente, em virtude da existência de sublinhas e de diferentes contabilizações de viagem (ida e volta como uma única viagem ou ida e volta separadas), o número de viagens encontrado no MCO foi contabilizado a partir de uma proporção em relação ao itinerário padrão selecionado. As viagens foram contabilizadas de acordo com os intervalos de tempo t em função do horário de início da viagem. Foram desconsideradas viagens mortas, isto é, aquelas que não representassem deslocamentos entre pontos de início e fim de rotas, chegando ao número total de 20.667 viagens equivalentes em um dia típico.

5.3.14 Velocidades de operação por segmento viário

O procedimento mais fácil para a obtenção desse parâmetro é através da utilização dos dados GTFS. O pacote Python *gtfs_functions* e o complemento para QGIS *Trajectools* (que incorpora as funcionalidades do pacote *gtfs_functions*) determinam esse parâmetro

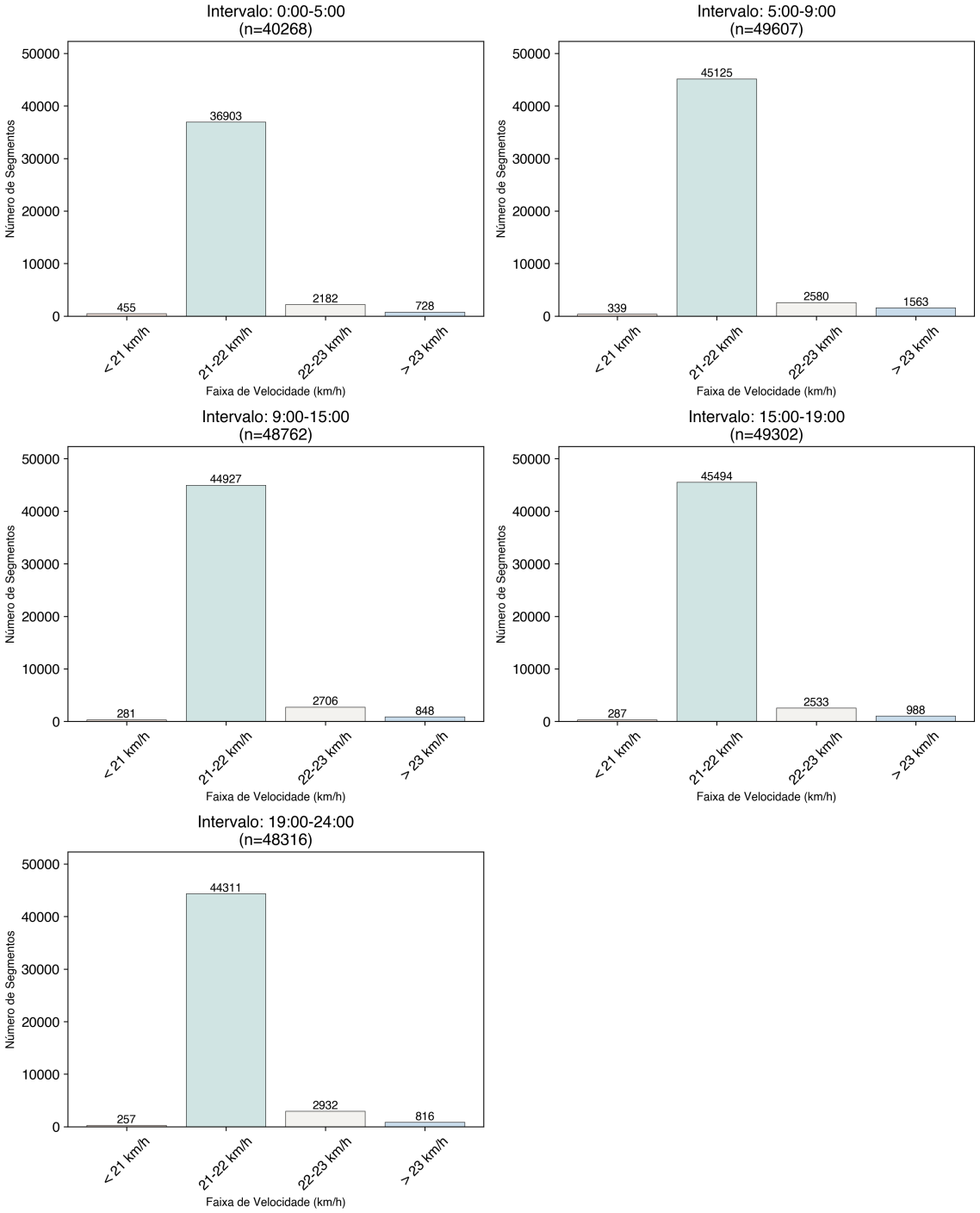
através da segmentação das rotas do GTFS entre cada parada de ônibus. A partir da sobreposição do conjunto de rotas entre duas paradas, é possível atribuir a velocidade àquele segmento e depois disso, é possível atribuir as velocidades dos segmentos entre paradas para os segmentos viários, através, por exemplo, de pequenos *buffers* e da função "Unir atributos por localização" do QGIS. A segmentação por intervalos de tempo também é prevista em ambas as ferramentas. Esse procedimento é realizado no pacote *gtfs_functions* com uma função que agrega a velocidade média ponderada em cada segmento, levando em consideração todas as rotas que param em sua parada inicial e final e se baseia nas distâncias percorridas e nas diferenças de tempo entre cada parada, informações contidas no arquivo *stop_times*.txt do GTFS e, portanto, a qualidade dos dados obtidos está diretamente relacionada com a qualidade dos dados GTFS.

Entretanto, quando aplicado a Belo Horizonte, o procedimento resultou em velocidades de 21 a 22km/h para todos os intervalos de tempo em mais de 90% dos segmentos, inviabilizando o uso desses dados no modelo matemático devido à falta de variabilidade significativa entre os segmentos. A Figura 19 mostra uma distribuição dos dados obtidos através da aplicação do procedimento descrito.

Uma vez que esse procedimento não resultou em dados válidos para a cidade de Belo Horizonte, foi adotado um procedimento alternativo, descrito a seguir. Foram coletados via API os conjuntos de "Tempo Real do Ônibus - Coordenada atualizada" e "Tempo Real do Suplementar - Coordenada atualizada" para um dia típico de operação (Belo Horizonte, 2025). Os dados estão disponíveis para *download* a cada 20 segundos, entretanto, nem todos os pontos registrados correspondem a esse exato intervalo de tempo. O conjunto de dados possui, entre outras informações, data e hora da posição registrada, coordenadas (WGS84 fuso 23S), número do veículo, velocidade instantânea do veículo (coluna VL) e código do número de linha (é disponibilizado um arquivo de conversão das linhas para os códigos do sistema convencional e suplementar).

Depois de coletados, esses dados de pontos foram alinhados às rotas de ônibus e posteriormente ligados criando segmentos entre um ponto de referência e o ponto seguinte, desde que a distância mínima percorrida fosse de 100 metros, e os valores das colunas rota e número do veículo fossem iguais. Importante ressaltar que uma vez que os pontos foram alinhados às rotas de ônibus, foi possível criar os segmentos também alinhados às rotas, de modo que a distância percorrida se aproxima da real distância percorrida na rede, não apenas a distância Euclidiana entre os dois pontos. A partir dos comprimentos dos segmentos – que representam a distância percorrida – foi possível determinar a velocidade média percorrida em cada segmento, uma vez que os dados originais contém o dia e a hora em que aquela posição foi averiguada. Os segmentos também foram classificados de acordo com os intervalos de interesse desse estudo, isto é, t_1 a t_5. Aplicando esse procedimento em todo o conjunto de dados de posição em tempo real, foi obtido um conjunto de cerca

Figura 19 – Distribuição de velocidades em km/h por intervalo de tempo t obtida a partir dos dados de GTFS de Belo Horizonte com o complemento para QGIS *Trajectools*.



Fonte: Autora (2025).

de 1,3 milhão de segmentos considerando todos os intervalos de tempo mencionados.

Foram utilizados alguns procedimentos para tratar *outliers*, por exemplo, foi delimitada uma diferença de tempo entre os pontos de 300 segundos, evitando dessa forma que fossem criados segmentos entre viagens de ida e volta. Entretanto, conforme mencionado, embora os *downloads* tenham sido feitos a cada 20 segundos, nem todas as posições averi-

guadas tinham essa exata diferença de tempo. Além disso, foi estabelecida uma velocidade máxima de 60 km/h, que corresponde à maioria das velocidades máximas permitidas em vias urbanas no Brasil – embora alguns trechos de rodovias possam percorrer os centros urbanos e tenham um limite de velocidade superior. De maneira similar, os modelos de emissões da EEA (EMEP/EEA, 2023) possuem limites de velocidade máxima de 70 e 85km/h, dependendo do tipo de veículo. O limite máximo de velocidade foi utilizado para a determinação de velocidades médias, de acordo com as seguintes regras: 1) se a velocidade média calculada for maior que o limite de velocidade estabelecido, a velocidade média será determinada pela média das velocidades instantâneas aferidas nos dados originais; 2) no caso de os valores das velocidades instantâneas serem iguais a zero, a velocidade máxima foi delimitada como a velocidade média daquele segmento. Para tratar *outliers* de velocidade média muito baixa, foi aplicada a regra de calcular a velocidade média também através dos valores de velocidades instantâneas, desde que eles fossem maiores do que 0. Por fim, foram eliminados os segmentos com velocidade média menor do que 5 km/h e que tivessem uma diferença de tempo maior do que 60 segundos, que poderiam indicar que de alguma forma o veículo estava parado em um terminal e que o registro não representava a velocidade de deslocamento nos segmentos viários.

Uma vez obtidos os registros de segmentos com velocidades sobre as rotas de ônibus, foi preciso atribuir essas velocidades aos segmentos viários. Primeiramente, os segmentos de rotas foram divididos nos pontos de início e fim dos segmentos viários, isto é, com este procedimento, foi aplicada a premissa de que a velocidade média entre os pontos de posição em tempo real era válida para todos os segmentos viários percorridos entre os pontos. Desse modo, o conjunto inicial de 1,3 milhão de segmentos transformou-se em um conjunto de 6,5 milhões de trechos de sobreposição. Por fim, foi feito um *buffer* de 1 metro nos segmentos viários e calculada a média de velocidade para cada intervalo de tempo t utilizando as informações dos trechos de segmentos de velocidade contidos dentro desse *buffer*.

Ainda assim, apenas uma quantidade limitada (cerca de 1/6 dos segmentos viários) teve a média de velocidades calculada dessa forma. Para completar o registro de dados, foi criado um novo *buffer* (de 10 metros) para cada segmento viário e foi feita uma união de atributos por localização no QGIS, dessa vez diretamente com a camada de pontos do conjunto de dados da posição em tempo real dos ônibus. Para estimação da velocidade média, foi utilizada a média da coluna VL, que representa a velocidade instantânea aferida no conjunto de dados original. Nessa etapa de processamento, para evitar a criação de *outliers*, foram removidos registros de segmentos que tinham velocidade média menor do que 5km/h e segmentos com velocidade menor do que 10km/h e maior do que 40km/h que continham apenas 1 ponto de aferição. Segmentos com médias superiores a 60km/h que não foram excluídos pela regra anterior, tiveram o valor substituído por 60km/h, em

cumprimento à legislação de trânsito.

Por fim, os segmentos cuja velocidade não pôde ser calculada por nenhum desses procedimentos, tiveram a média calculada por interpolação espaço-temporal. Foram utilizadas técnicas de imputação de valores faltantes, em específico através das funções de *IterativeImputer* da biblioteca *Scikit-learn*, primeiramente considerando os dados de velocidade em si e posteriormente aplicando uma correção espacial, utilizando a função *NearestNeighbors*. Em termos de impacto no modelo, para o intervalo de 0 às 5h, havia cerca de 20 mil segmentos faltantes que tiveram dados imputados, o que reflete também o fato de haver uma menor circulação de ônibus nesse período e, consequentemente, um menor conjunto de dados disponíveis para cálculo das velocidades. Por outro lado, os demais intervalos tiveram cerca de 3 a 4 mil segmentos com velocidades imputadas, o que representa menos de 10% do total de segmentos analisados.

Ressalta-se que as velocidades de cada segmento são um conjunto de parâmetros de suma importância no modelo, dado o impacto que podem ter sobre os resultados obtidos. Apesar do esforço em sistematizar uma abordagem de cálculo a partir de dados abertos e da minimização de imprecisões, esse conjunto de dados pode não representar completamente a realidade analisada, ao mesmo tempo que não invalida o esforço de incluir essa variável na modelagem. A aplicação de técnicas mais precisas, como as desenvolvidas por Arbex e Cunha (2016) ou mesmo da simulação com outros *softwares* e metodologias das velocidades de cada segmento configuram uma limitação deste estudo, que pode ser superada por estudos futuros.

5.3.15 Incremento potencial de velocidade de operação

Para as estimativas de incremento de velocidade de operação $\Delta\nu_{l,t}$ foram feitas simulações de Monte Carlo, realizadas a partir de análises da configuração atual da rede.

Inicialmente, foram usados os testes de normalidade (Shapiro-Wilk) e homogeneidade de variâncias (Levene) para verificar se os dados de velocidade atual seguiam uma distribuição normal. As velocidades de todos os intervalos de tempo t considerados tiveram p-valor = 0,00 nos testes de Shapiro-Wilk (Estatística | p-valor: $\nu_{0,0-5}$ 0,9782 | 0,000, $\nu_{0,5-9}$ 0,9653 | 0,000, $\nu_{0,9-15}$ 0,9569 | 0,000, $\nu_{0,15-19}$ 0,9537 | 0,000, $\nu_{0,19-24}$ 0,9660 | 0,000) e Levene (Estatística: 544,1937, p-valor: 0,0000), indicando que os dados não seguem uma distribuição normal e, portanto, testes estatísticos paramétricos não podem ser aplicados ao conjunto de dados. Após isso, foi realizado o teste de Kruskal-Wallis, que é uma alternativa não paramétrica ao ANOVA. Os resultados de Kruskal-Wallis (Estatística: 17721,4714, p-valor: 0,0000) indicam que há diferença estatística significativa entre os intervalos de tempo, o que confirmou a decisão de que deveriam ser calculados incrementos de velocidade $\Delta\nu_{l,t}$ para cada intervalo de tempo t.

Em seguida, foram realizados testes estatísticos para verificar se na configuração atual da rede há diferença significativa entre as tipologias de via exclusiva existente. Todos os testes de Kruskal-Wallis tiveram como resultado um p-valor = 0,0000, de modo que pode ser inferido que há diferença significativa nas velocidades de acordo com a tipologia de infraestrutura prioritária. A partir disso, foram calculadas as velocidades médias de acordo com a tipologia de via exclusiva existente para cada intervalo de tempo t e a proporção de velocidade entre cada tipologia exclusiva em relação à tipologia "sem prioridade", conforme pode ser observado na Tabela 12.

Tabela 12 – Análise de velocidades médias por tipologia de via prioritária e por intervalo de tempo t.

Intervalo	**Tipologia de via exclusiva**	**Velocidade média (km/h)**	**Proporção de velocidade**
0 - 5h	Faixa Preferencial	32,62	1,35
	Faixa Exclusiva	32,85	1,36
	Pista Exclusiva	36,48	1,51
	Sem prioridade	24,09	1,00
5 - 9h	Faixa Preferencial	24,72	1,21
	Faixa Exclusiva	26,32	1,29
	Pista Exclusiva	31,17	1,52
	Sem prioridade	20,46	1,00
9 - 15h	Faixa Preferencial	24,44	1,24
	Faixa Exclusiva	26,19	1,33
	Pista Exclusiva	30,57	1,55
	Sem prioridade	19,72	1,00
15 - 19h	Faixa Preferencial	21,91	1,16
	Faixa Exclusiva	24,80	1,31
	Pista Exclusiva	30,13	1,60
	Sem prioridade	18,86	1,00
19 - 24h	Faixa Preferencial	26,71	1,28
	Faixa Exclusiva	28,57	1,37
	Pista Exclusiva	32,13	1,54
	Sem prioridade	20,91	1,00

Fonte: Autora (2025).

Dessa forma, as simulações de Monte Carlo foram feitas utilizando como critérios a classificação viária, via exclusiva existente ($x_l^{existente}$), tipologia de via exclusiva a ser implementada, velocidades de operação atual ($\nu_{0,l,t}$) e a frequência de viagens de ônibus no segmento viário, os dois últimos segmentados nos intervalos de tempo t. Foi utilizada uma distribuição Beta, com limite inferior de incremento de 20% e limite superior de 40% se implementadas faixas exclusivas e limite inferior de incremento de 40% e limite superior de 60% se implementadas pistas exclusivas. Os dados da Tabela 12 foram utilizados para ajuste dos parâmetros α e β da distribuição Beta.

Capítulo 6

Resultados

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos com a aplicação do modelo. Primeiramente, é apresentada uma análise de desempenho do NSGA-II para os modelos propostos, bem como testes de diferentes configurações de parâmetros para o NSGA-II. Em seguida, são apresentados os cenários de análise contendo o cenário base, o cenário de continuidade e os cenários de sustentabilidade com diferentes implementações de prioridade viária e eletrificação de frota. Por fim, derivados do percentual de seleção nos testes de parâmetros, são apresentados os mapas de prioridade viária e de rotas selecionadas para eletrificação. O capítulo é encerrado com uma síntese dos resultados obtidos.

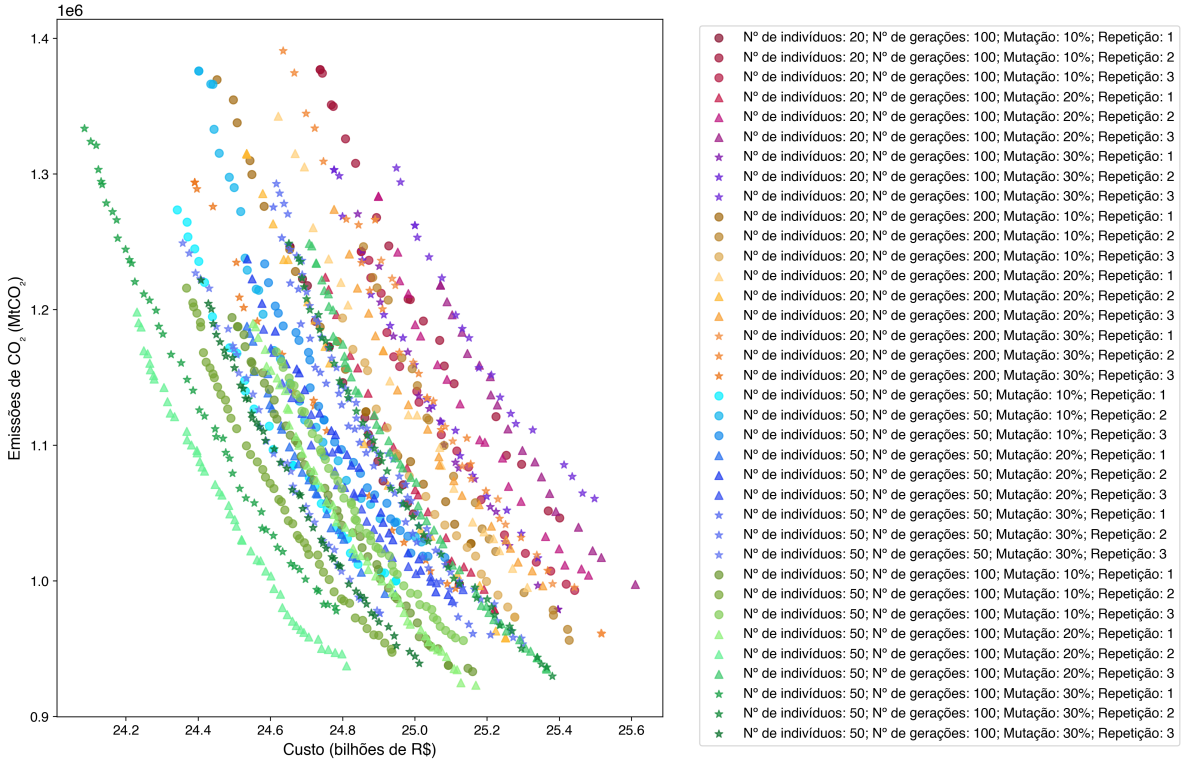
6.1 Análises de desempenho e testes dos parâmetros do NSGA-II

O código formulado para o problema, considerando a rede com 63.602 segmentos e 321 rotas, processa cada avaliação em cerca de 7 a 8 segundos no computador Intel® Core™ i9-14900K com 128GB de memória RAM com os três modelos de poluentes rodando simultaneamente. Isso significa que o tempo de processamento de cada configuração de parâmetros depende do número total de avaliações, que por sua vez é dependente do tamanho da população (número de indivíduos) e do número de gerações.

Para verificar o comportamento e desempenho do NSGA-II para solucionar o problema, foram realizados testes com número de indivíduos igual a 20, com número de gerações igual a 100 e 200. Ademais, considerou-se outra configuração com 50 indivíduos, com número de gerações parametrizado para 50 e 100. As taxas de mutação analisadas foram de 10, 20 e 30% para todas as configurações mencionadas, sendo realizadas três repetições para cada configuração. Os testes dos parâmetros do NSGA-II foram realizados utilizando $N_{ciclos\ eq.} = 2$, outras estratégias de recarga são apresentadas na seção de

construção de cenários. Em geral, os tempos de processamento para cada poluente com 20 indivíduos e 100 gerações foi de cerca 4,5 horas, para 20 indivíduos e 200 gerações foi em torno de 9 horas, para 50 indivíduos e 50 gerações foi de aproximadamente 5,5 horas e para 50 indivíduos e 100 gerações foi de aproximadamente 11 horas. Conclui-se que, embora seja um modelo computacionalmente custoso, ele apresenta um desempenho satisfatório para a escala de planejamento para a qual foi elaborado. Ainda assim, uma possibilidade de estudos futuros é a análise de desempenho de outras metaheurísticas para esse tipo de problema, especialmente considerando a construção de algoritmos para variáveis binárias e para redes de grande porte. Em relação aos resultados em si, a Figura 20 apresenta os resultados dos testes de CO_2, a Figura 21 os de MP e a Figura 22 os de NO_x.

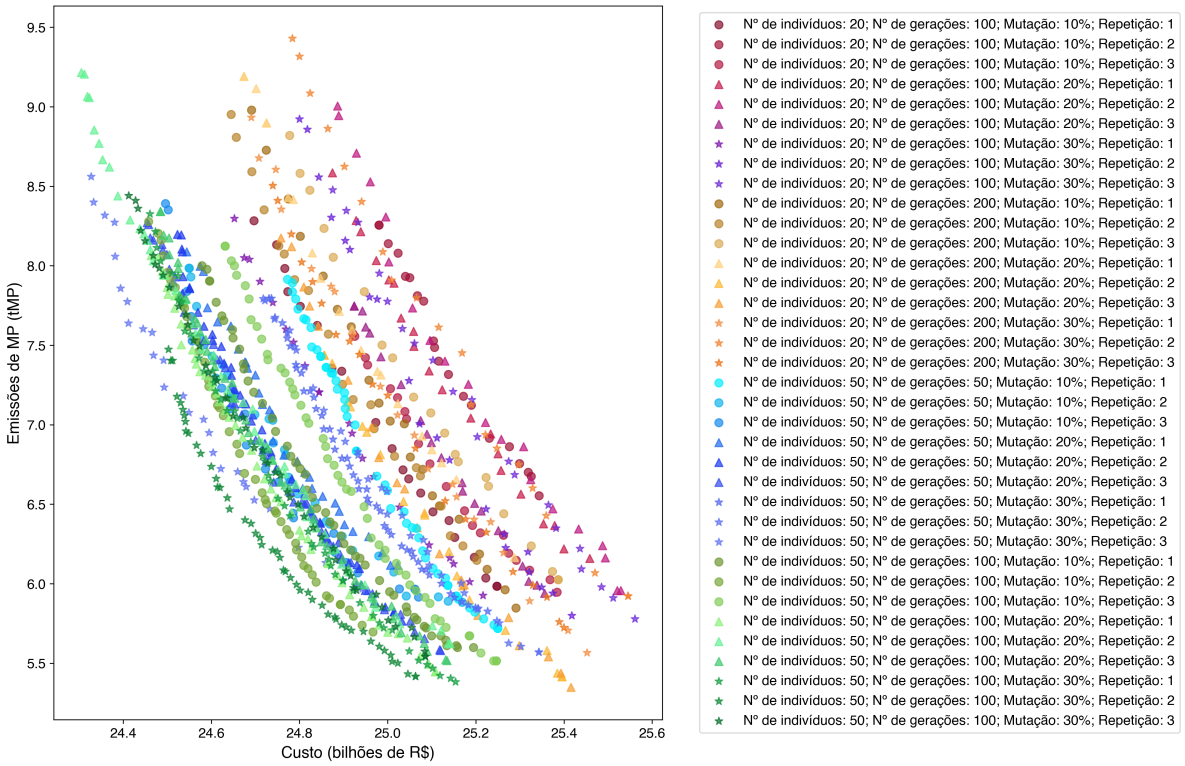
Figura 20 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de CO_2.



Fonte: Autora (2025).

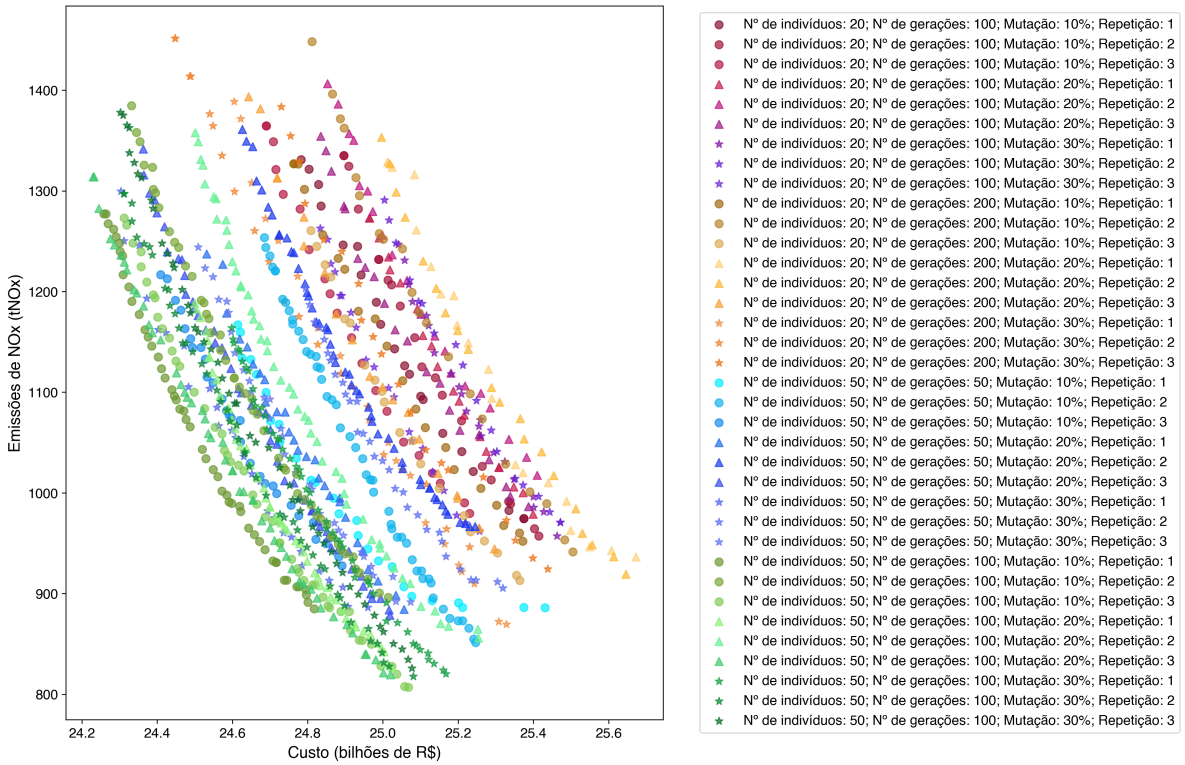
De maneira consistente entre todos os poluentes (CO_2, MP e NO_x), as configurações com 50 indivíduos (50/50 e 50/100) dominaram a maioria das soluções com 20 indivíduos, independentemente do número de gerações. Quando comparadas entre si as soluções de 50 indivíduos, as com 100 gerações tendem a dominar as com 50 gerações, mas existem soluções com 50 gerações que tem desempenho superior às de 100. Ainda assim, para todos os poluentes, a solução não dominada entre todas as execuções foi obtida com a configuração de 50 indivíduos e 100 gerações. Este resultado evidencia que, para o modelo proposto, uma maior diversidade genética inicial é mais crucial que o refinamento proporcionado pelo aumento de gerações. A configuração com 50 indivíduos e 50 gerações apresentou um custo-benefício computacional vantajoso, apresentando soluções que dominaram os

Figura 21 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de MP.



Fonte: Autora (2025).

Figura 22 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de NO_x.

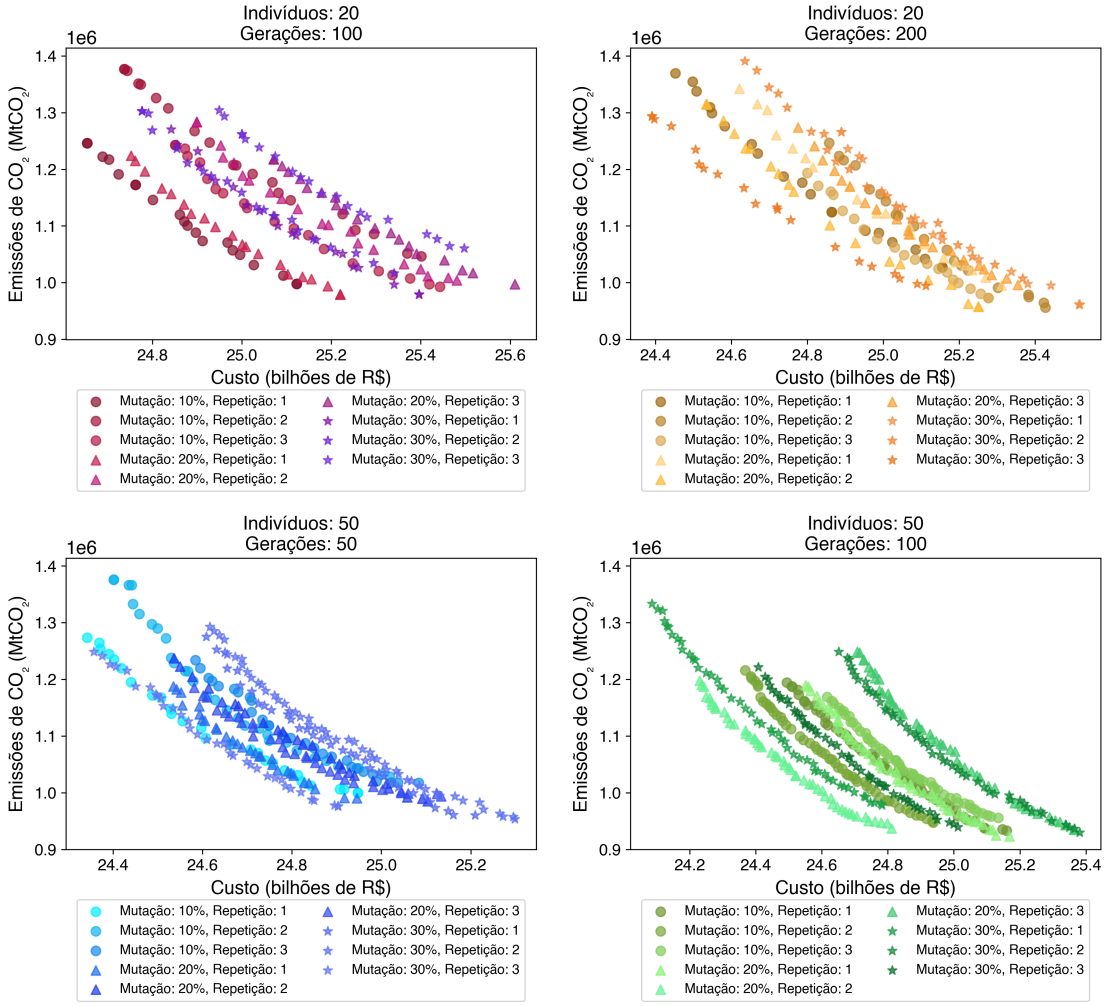


Fonte: Autora (2025).

resultados de configurações com mais gerações (20/200), mesmo tendo um menor número de avaliações totais (2.500 *versus* 4.000). O aumento do número de gerações apresentou resultados ambíguos para populações menores, indicando possível convergência prematura, enquanto para populações maiores proporcionou um refinamento adicional, particularmente significativo para CO_2 e NO_x.

Para observar o comportamento em relação a diferentes taxas de mutação, a Figura 23 apresenta separadamente cada configuração de indivíduos e gerações para o modelo de CO_2, a Figura 24 para o modelo de MP e a Figura 25 para o modelo de NO_x.

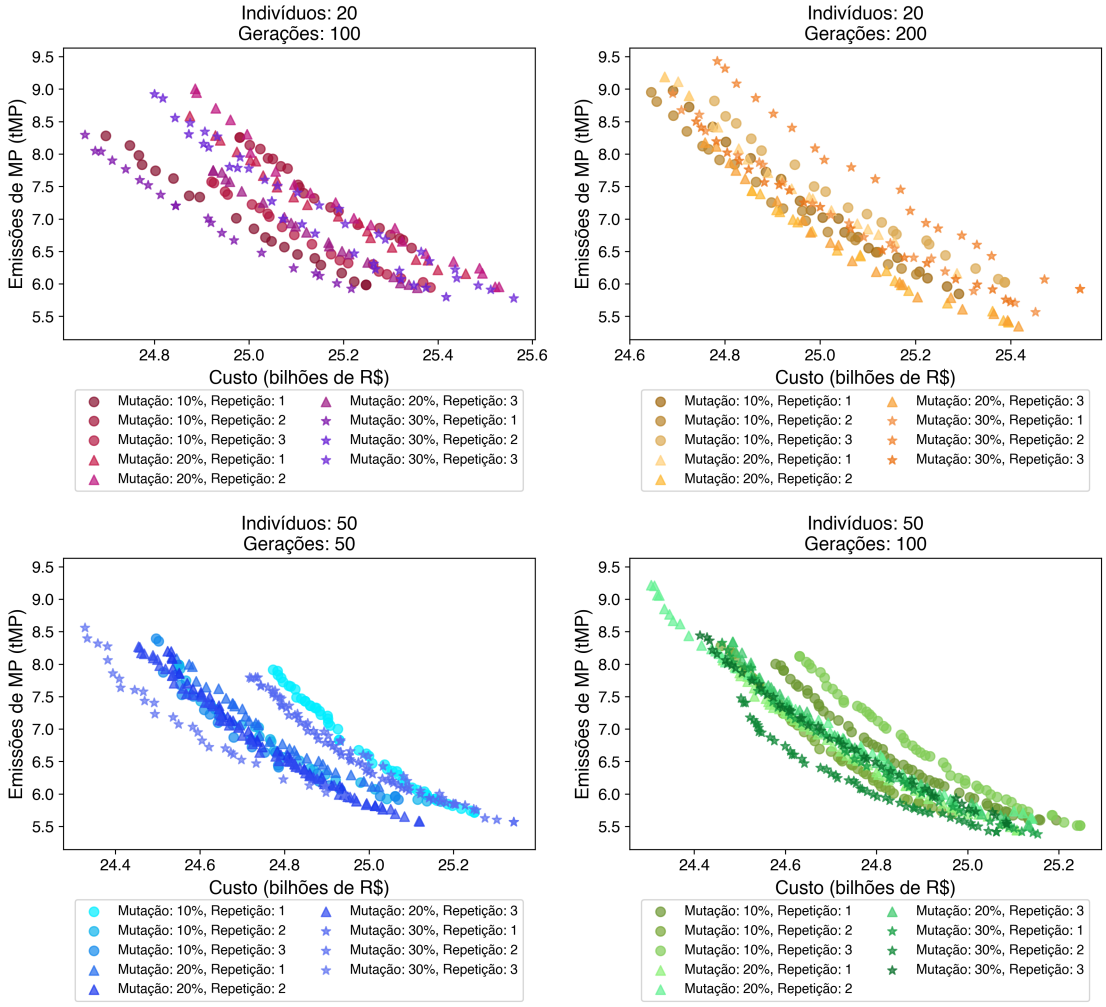
Figura 23 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de CO_2, com ênfase nas taxas de mutação.



Fonte: Autora (2025).

Em relação às taxas de mutação, a análise para os três poluentes não revelou um padrão consistente e previsível de desempenho. Para o CO_2, os melhores resultados emergiram em repetições com 20% (50/100) e 30% de mutação (20/200 e 50/50). Para MP, as taxas de 20% e 30% produziram os resultados mais consistentes, com uma repetição de 30% (50/100) se destacando. O modelo de NO_x apresentou o comportamento mais variável, embora repetições com 10% (50/100) e 30% tenham gerado soluções dominantes

Figura 24 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de MP, com ênfase nas taxas de mutação.

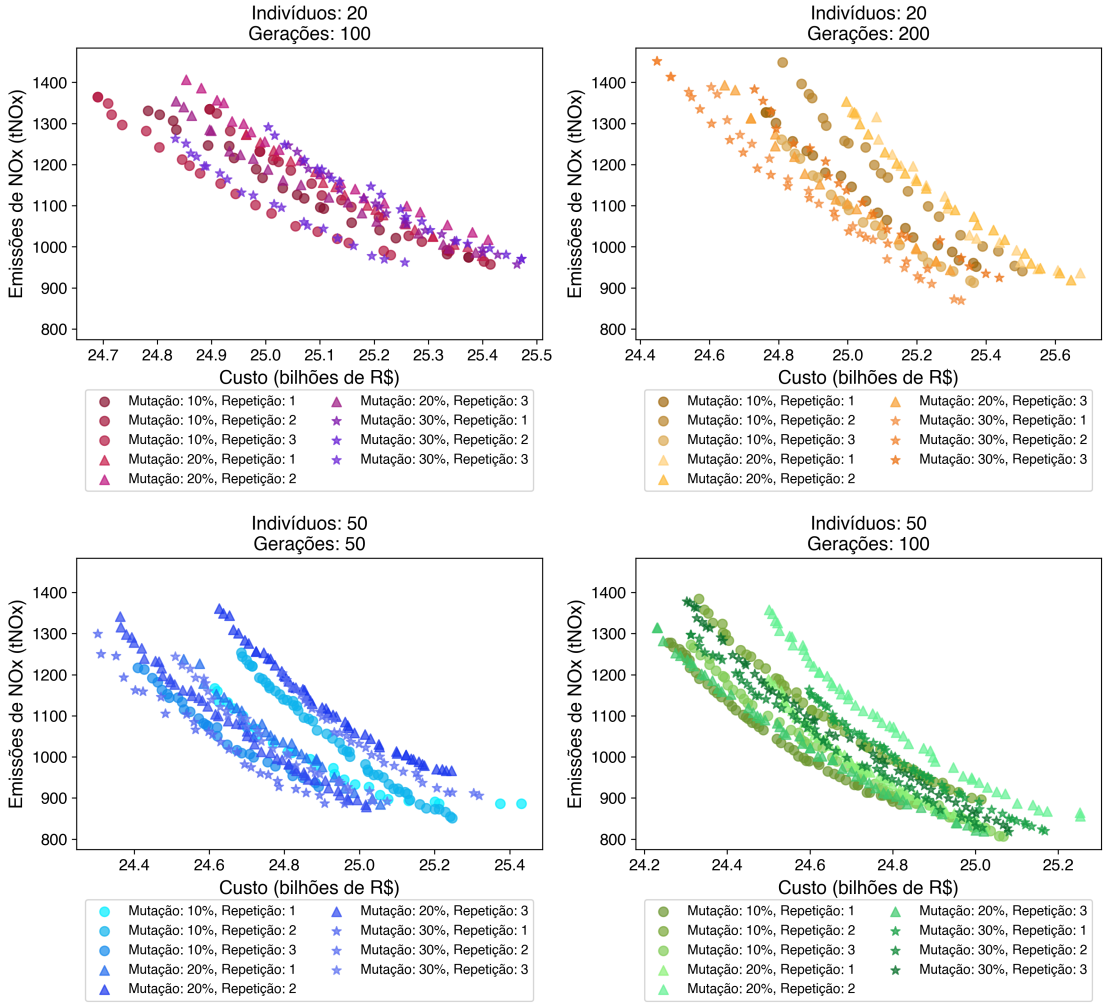


Fonte: Autora (2025).

em diferentes configurações. Esta variabilidade indica a impossibilidade de estabelecer uma taxa de mutação *a priori*, sendo necessária a execução de testes para validação dos parâmetros.

Uma síntese geral da análise da parametrização do NSGA-II para o modelo proposto nesta tese é de que é mais importante utilizar uma configuração que mantenha uma maior diversidade inicial de soluções, fato que se relaciona com a necessidade de utilizar uma técnica de cruzamento conservativa para aplicação das restrições do modelo. Em relação às taxas de mutação, as repetições analisadas apresentaram uma certa variabilidade, sendo necessária uma análise cuidadosa da configuração a ser adotada para cada modelo de poluente. Os resultados obtidos nessa seção foram utilizados para configurar os cenários de análise para os respectivos poluentes e para criar os mapas de representação de seleção de segmentos para implantação de infraestrutura prioritária e de rotas para eletrificação, de forma que o NSGA-II foi parametrizado com 50 indivíduos, 100 gerações e probabilidade de cruzamento de 100% para todos os poluentes. A probabilidade de mutação foi de 20% para

Figura 25 – Testes de parâmetros do NSGA-II para o modelo de NO_x, com ênfase nas taxas de mutação.



Fonte: Autora (2025).

CO_2, 30% para MP e 10% para NO_x, de forma a realizar uma comparação padronizada utilizando as configurações com os melhores resultados obtidos nos testes de parâmetros em todos os cenários. A Tabela 13 apresenta uma síntese das diferentes configurações de parâmetros analisadas.

Tabela 13 – Síntese dos resultados de testes de parâmetros do NSGA-II.

Configuração	CO_2	MP	NO_x	**Tempo de Processamento**	**Observações Gerais**
20 indivíduos / 100 gerações	Dominada por configurações de 50 indivíduos	Dominado por configurações de 50 indivíduos	Dominado por configurações de 50 indivíduos	Aprox. 4,5 horas	Apesar de ser o modelo com menor tempo de processamento, as soluções produzidas por essa configuração são dominadas pelas demais
20 indivíduos / 200 gerações	Dominada por configurações de 50 indivíduos e resultados variáveis em relação à configuração 20/100	Dominado por configurações de 50 indivíduos e resultados variáveis em relação à configuração 20/100	Dominado por configurações de 50 indivíduos e resultados variáveis em relação à configuração 20/100	Aprox. 9 horas	As soluções dessa configuração são dominadas por configurações com 50 indivíduos, levando à interpretação de que um número maior de gerações não é capaz de compensar o tamanho reduzido da população
50 indivíduos / 50 gerações	Boa performance, produz soluções não dominadas quando comparado com a configuração 20/200, mesmo tendo um número menor de avaliações totais	Boa performance; algumas soluções formam uma faixa de sobreposição com configurações 50/100	Boa performance; algumas soluções formam uma faixa de sobreposição com configurações 50/100	Aprox. 5,5 horas	Apresenta um bom custo-benefício em termos de resultados e tempo de processamento. Para os modelos de MP e NO_x, é capaz de produzir soluções que se sobrepões às de 50/100, utilizando cerca de 50% do tempo de processamento
50 indivíduos / 100 gerações	Melhor performance geral	Melhor performance geral	Melhor performance geral	Aprox. 11 horas	Produz soluções não dominadas por outras configurações para todos os modelos de poluentes, apesar de apresentar um custo computacional mais elevado

Fonte: Autora (2025).

6.2 Cenários de análise

Para uma análise dos benefícios potenciais que as estratégias de sustentabilidade propostas podem proporcionar, os cenários de análise são comparados com um cenário base que corresponde à aplicação do modelo para o ano de 2024, considerando a composição atual da frota. Em seguida, são apresentados os cenários de continuidade, onde apenas a frota é renovada, mas com veículos diesel para atender a obrigações contratuais. Para este cenário, foi considerada que a renovação ocorre no início do horizonte de projeto, de modo a elencar os benefícios potenciais que essa medida poderia ter, mesmo que contratualmente os operadores não sejam obrigados a renovar toda a frota em um mesmo ano. Na sequência, são analisados os cenários de implantação de apenas uma das medidas de sustentabilidade propostas na tese, isto é, apenas a priorização viária ou apenas a eletrificação. Por fim, é analisado o cenário onde ambas as medidas são implementadas conjuntamente, considerando diferentes estratégias de recarga.

6.2.1 Cenário base

Ao aplicar o modelo para o cenário atual (2024), foi possível obter estimativas do consumo de diesel, dos custos de manutenção e operação e das emissões de CO_2, MP e NO_x para um ano típico de operação antes da implementação de qualquer alteração na rede. Um panorama desse cenário é apresentado na Tabela 14; os dados apresentados contemplam o sistema convencional, MOVE e suplementar.

Tabela 14 – Dados de consumo de diesel, custos e emissões para o ano base (2024).

Item	**Valor**	**Unidade**
Custos de manutenção	113,60	milhões R$/ano
Custos de operação	320,24	milhões R$/ano
Extensão anual percorrida	161.580.038,55	km/ano
Consumo diesel	59,91	ML/ano
Emissões de CO_2	0,1395	MtCO_2/ano
Emissões de MP	10,60	tMP/ano
Emissões de NO_x	932,55	tNO_x/ano

Fonte: Autora (2025).

Os resultados obtidos mostram que a extensão anual total percorrida nas rotas analisadas é de 161.580.038,55 quilômetros, o consumo de diesel é de quase 60 milhões de litros por ano, o que resulta em um custo anual de operação de mais de R$ 320 milhões e emissões de CO_2 da ordem de 0,14 milhões de toneladas. Os custos de manutenção são de aproximadamente R$ 120 milhões por ano e as emissões de MP e NO_x são da ordem de 10,60 tMP/ano e 932,55 tNO_x/ano.

A princípio, a planilha de reajuste tarifário de 2025 (Belo Horizonte, 2024b) poderia ser uma boa fonte de calibração dos dados obtidos no modelo. Entretanto, existem algumas diferenças significativas entre as duas fontes de dados. Uma delas é a ausência da totalidade das rotas de ônibus nos arquivos disponíveis no portal de dados abertos da cidade. A partir dos dados do MCO, GTFS e Itinerário de Transporte Público, foi possível sintetizar dados para 321 rotas, enquanto que o relatório mensal de novembro de 2024, apresenta que existem, no mínimo, 346 rotas no sistema convencional (incluindo o MOVE), além do sistema suplementar. Ao analisar os dados da planilha de reajuste, a extensão percorrida anualmente é de 153.327.389,90 km no sistema convencional e 12.482.701,54 no sistema suplementar, totalizando 165.810.091,44 quilômetros por ano. Essa extensão percorrida inclui também as distâncias mortas percorridas, que no modelo desta tese são desconsiderados. Aqui as fontes de imprecisão podem ser a ausência de algumas rotas, bem como as distâncias mortas.

Outro ponto de discrepância é o consumo médio de diesel adotado pela prefeitura, sendo de 0,49 l/km (autonomia de 2,03 km/l) para o sistema convencional e 0,30 l/km (autonomia de 3,33 km/l) para o sistema suplementar, enquanto que os dados obtidos no modelo são da ordem de 0,37 l/km (autonomia de 2,7 km/l); os dados do sistema suplementar adotados pela prefeitura são baseados nos índices fornecidos pela ANTP (2017). Era de se esperar que o modelo se aproximasse mais do consumo real adotado para o sistema convencional, já que é o sistema com maior volume de viagens e extensão. Aqui, aponta-se que as fontes de imprecisão podem ser as estimativas de velocidade adotadas como dados de entrada do modelo, mas também pode ser o fato de que o modelo da EMEP/EEA (2023) não considerar diretamente o uso de ar-condicionado no consumo. Os percentuais de frota com ar-condicionado ou climatizador variam de 77,6 a 92,6% em Belo Horizonte, o que justificaria um consumo maior do que o estimado no modelo. Entretanto, os insumos base para a determinação desse padrão de consumo não estão disponíveis, isto é, no documento emitido pela prefeitura e na memória de cálculo esse valor é apresentado sem possibilidade de confirmação (Belo Horizonte, 2024b). Ainda assim, os dados do modelo são condizentes com o que a ANTP define como coeficiente de consumo mínimo para ônibus da categoria básico sem ar-condicionado, composição principal da frota de Belo Horizonte.

Essas imprecisões implicam em distorções no consumo de diesel e, consequentemente, no custo de operação. De acordo com os valores informados pela prefeitura, o consumo anual de diesel é de cerca de 79,42 milhões de litros (75,68 para o sistema convencional e 3,74 para o sistema suplementar), com um custo anual total de operação de cerca de R$ 370,39 milhões. Esse valor representa uma diferença de cerca de R$ 50 milhões por ano em relação ao calculado pelo modelo. Além disso, as estimativas de emissões de CO_2 também podem estar subestimadas, uma vez que são dependentes do consumo de diesel. Os custos

de manutenção, por outro lado, se assemelham aos observados na planilha de reajuste, com uma diferença de cerca de R$ 7 milhões, mas que pode ser mais facilmente relacionada com as diferenças de distâncias totais entre a planilha e o modelo (Belo Horizonte, 2024b).

Em relação à comparação com outras estimativas de poluentes, também não foi possível realizar uma comparação realista. Os inventários de emissão de GEE da prefeitura de Belo Horizonte contém informações sobre as emissões de $CO_{2eq.}$, nas quais são computadas as emissões de CO_2, CH_4 e N_2O. As emissões são agregadas por modo de transporte (rodoviário, ferroviário e aéreo) e por tipo de combustível (gasolina, etanol, diesel, entre outros), mas não apresenta a participação de cada categoria de veículos para as emissões, não sendo possível distinguir o que é emitido pelo transporte público do que é emitido por caminhões, por exemplo. Além disso, os inventários não contém informações para emissões de poluentes locais como MP e NO_{x} (Belo Horizonte, 2023a).

6.2.2 Cenário de continuidade

Para detalhar melhor o impacto das variáveis de decisão propostas no modelo, apresenta-se aqui o cenário de continuidade, isto é, aquele onde ocorre apenas a renovação da frota a diesel, com substituição dos veículos EURO V (P7) ($i = 2$) por veículos EURO VI (P8) ($i = 3$), sem eletrificação da frota e sem construção de novas vias exclusivas para ônibus. A despeito da redução de emissões que mesmo a renovação de frota a diesel pode proporcionar, esse cenário não apresenta os benefícios para os passageiros que poderiam ser obtidos a partir a implementação de vias exclusivas. A Tabela 15 apresenta uma síntese dos resultados obtidos.

Tabela 15 – Síntese dos resultados do cenário continuidade.

Item	**Valor**	**Unidade**
Custos totais	7,77	bilhões R$
Custos de aquisição	1,54	bilhões R$
Custos de manutenção	1,57	bilhões R$
Custos de operação	4,66	bilhões R$
Aquisição de frota midi (k=1)	245	un.
Aquisição de frota convencional (k=2)	1.576	un.
Aquisição de frota articulado (k=3)	155	un.
Extensão anual percorrida	161.580.038,55	km / ano
Consumo diesel	63,16	ML/ano
Emissões CO_2	0,1470	MtCO_2/ano
Emissões MP	1,40	tMP/ano
Emissões NO_{x}	211,41	tNO_{x}/ano

Fonte: Autora (2025).

Os custos totais para o horizonte de projeto incluindo aquisição de frota, custos de manutenção e operação é de cerca de R$ 7,77 bilhões. Os custos de aquisição e manutenção são da ordem de 20% cada, enquanto que o custo de operação representa 60% do total.

Nesse cenário, são adquiridos 245 veículos midi, 1576 veículos convencionais e 155 veículos articulados, todos de tecnologia EURO VI (P8), totalizando um custo de aquisição de R$ 1,54 bilhão. Uma vez que a tecnologia diesel não foi considerada nos parâmetros de manutenção, em virtude da ausência de dados primários para compor essa informação, os custos de manutenção no cenário de troca de frota para veículos EURO VI permaneceu igual ao cenário atual, exceto pelo reajuste inflacionário; o valor dessa parcela é em torno de R$ 156,76 milhões/ano, totalizando R$ 1,57 bilhão no horizonte de projeto. Os custos de operação somam R$ 4,66 bilhões no horizonte de projeto e os valores anuais, além da aplicação da inflação, são cerca de 5% maiores do que no contexto atual. Isso decorre de um aumento de mesma proporção do consumo de diesel. Os coeficientes de consumo de energia do modelo EMEP/EEA (2023) são levemente superiores para veículos EURO VI quando comparados com veículos EURO V, com cenários mais críticos em velocidades mais baixas, o que explica o aumento de consumo de combustível e, consequentemente, das emissões de CO_2. Por outro lado, as emissões de MP e NO_x caem drasticamente e representam cerca de 13,18% e 22,67%, respectivamente, das emissões observadas no cenário base.

Pode-se inferir a partir dos resultados desse cenário que, embora as emissões de CO_2 aumentem, ainda assim há impactos positivos na redução de poluentes locais que são diretamente associados a problemas de saúde na população geral.

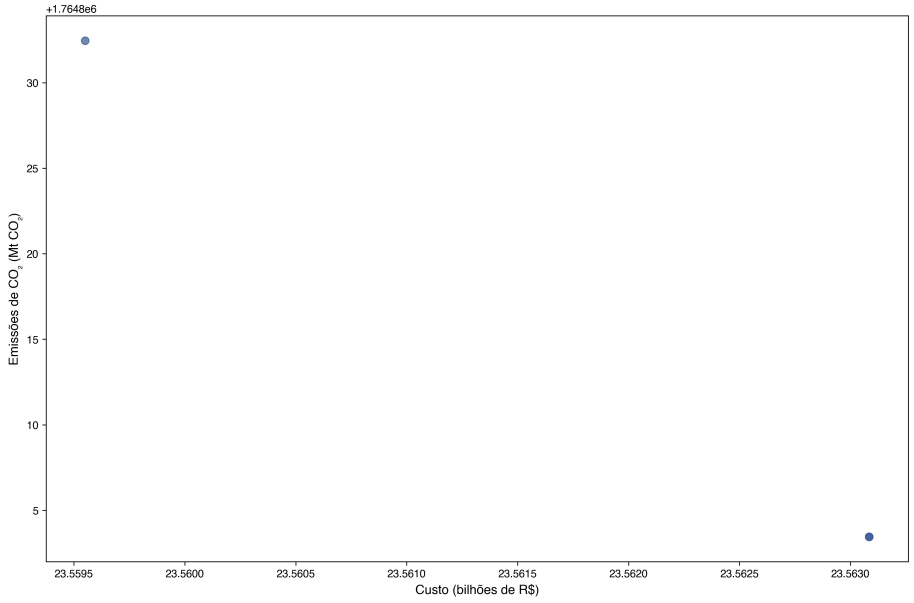
6.2.3 Cenário de sustentabilidade 1 – infraestrutura

Para este cenário, foi adotado que os operadores e reguladores do sistema de transporte adotam apenas medidas de priorização viária para melhorar a qualidade do transporte público, mas não eletrificam a frota. O cenário contempla indiretamente os benefícios para os passageiros obtidos a partir da implementação de vias exclusivas, mas não considera alterações na matriz energética da frota. Os veículos EURO V (P7) são substituídos por EURO VI (P8) para cumprimento de obrigações contratuais, mas não são inseridos veículos elétricos na frota. As emissões de CO_2 são afetadas principalmente pelo aumento da eficiência energética a partir da melhoria das velocidades operacionais, enquanto que as emissões de MP e NO_x, além desse incremento, são afetadas também pela modernização de veículos a diesel. Os resultados gerais da seção são apresentados para cada poluente e por fim é apresentada uma análise conjunta de aspectos do modelo pertinentes ao cenário.

6.2.3.1 Emissões de CO_2 no cenário de infraestrutura

Os resultados obtidos mostram que com a implantação de infraestrutura, mas sem a eletrificação da frota, a variabilidade de indivíduos na fronteira de Pareto é bastante reduzida, assim como a diferença entre os patamares de emissões de CO_2. Sem a eletrificação e com as emissões de construção, este cenário é o que apresenta os maiores índices de emissões de CO_2 entre todos os cenários avaliados, ficando em torno de 1,765 MtCO_2 no horizonte de projeto. Desse total, cerca de 20% corresponde às emissões de construção e 80% às emissões operacionais. Em relação ao cenário base, ocorre um leve aumento (1,7%) das emissões operacionais de CO_2, em virtude da troca de frota para veículos EURO VI, como ocorreu também no cenário de continuidade. Porém, quando comparado com este último, a instalação de vias prioritárias propicia uma redução de cerca de 3,6% das emissões. Os custos triplicam em relação ao cenário de continuidade e orbitam em torno de R$ 23,6 bilhões. A composição dos custos será melhor explorada na síntese do cenário, englobando todos os poluentes simultaneamente. A fronteira de Pareto para CO_2 no cenário de infraestrutura é apresentada na Figura 26.

Figura 26 – Relação entre custo e emissões de CO_2 no horizonte de projeto para o cenário de infraestrutura.



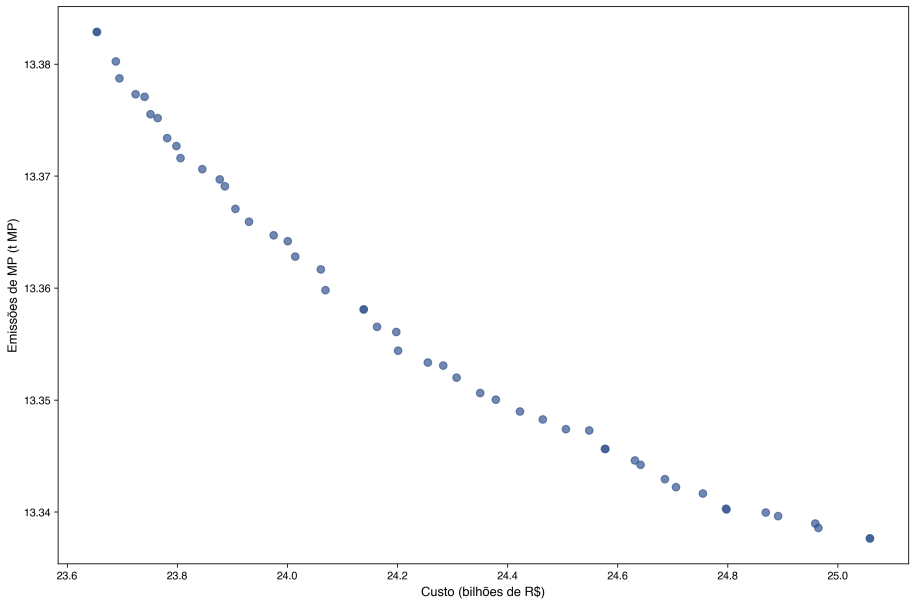
Fonte: Autora (2025).

6.2.3.2 Emissões de MP no cenário de infraestrutura

Os resultados obtidos para MP mostram que com a implantação de infraestrutura, as emissões tem uma redução de cerca de 4,2 a 4,5% em relação ao cenário de continuidade, oriunda da melhoria das velocidades operacionais. Quando comparado com o cenário base, a redução é mais expressiva, chegando a 87,4%, mas se deve principalmente à substituição

de veículos EURO V (P7) na frota. Os custos também são expressivos, assim como no modelo de CO_2, variando entre R$ 23,7 e R$ 25,1 bilhões. A fronteira de Pareto para MP no cenário de infraestrutura é apresentada na Figura 27.

Figura 27 – Relação entre custo e emissões de MP no horizonte de projeto para o cenário de infraestrutura.



Fonte: Autora (2025).

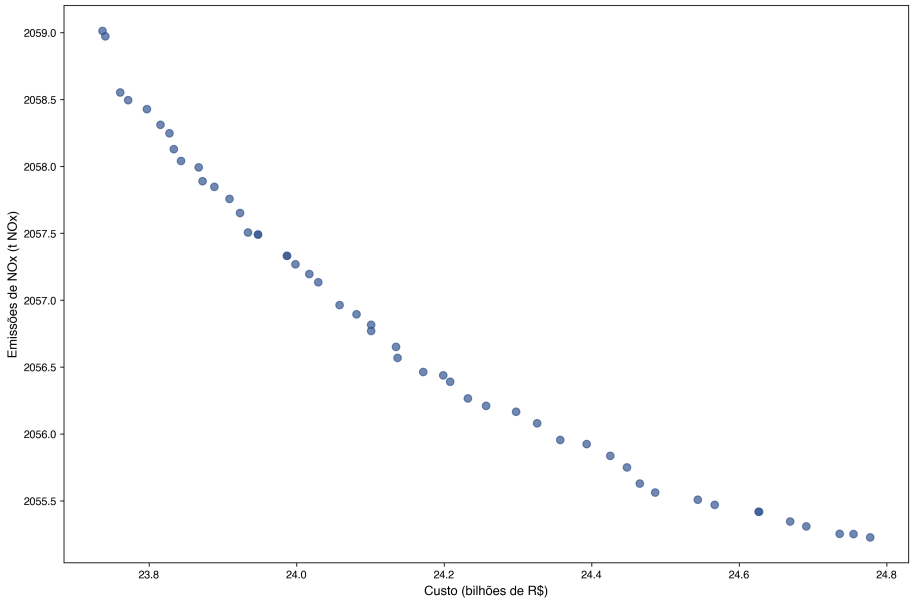
6.2.3.3 Emissões de NO_x no cenário de infraestrutura

Os resultados obtidos para NO_x mostram que com a implantação de infraestrutura, as emissões tem uma pequena redução em torno de 2,6 a 2,8% em relação ao cenário de continuidade, obtida através da melhoria das velocidades operacionais. Assim como para MP, ao comparar os resultados desse cenário com o cenário base, observa-se uma redução mais expressiva, em torno de 78%, mas isso ocorre principalmente em virtude da renovação da frota para veículos EURO VI (P8). Os custos também são expressivos, assim como nos modelos de CO_2 e MP, variando entre R$ 23,7 e R$ 24,8 bilhões. A Figura 28 apresenta a fronteira de Pareto para NO_x no cenário de infraestrutura.

6.2.3.4 Síntese do cenário

Nessa subseção, é apresentada uma síntese com comparação dos resultados dos modelos de cada poluente de acordo com aspectos pertinentes a esse cenário. Primeiramente, a Figura 29 apresenta a composição de custos do sistema, cujos valores totais triplicam em relação ao cenário de continuidade. Como não há alteração da matriz energética do sistema, os custos de manutenção e aquisição são parcelas constantes ao longo do horizonte de projeto. Em relação ao cenário base, a única alteração dos custos de manutenção é em

Figura 28 – Relação entre custo e emissões de NO_x no horizonte de projeto para o cenário de infraestrutura.

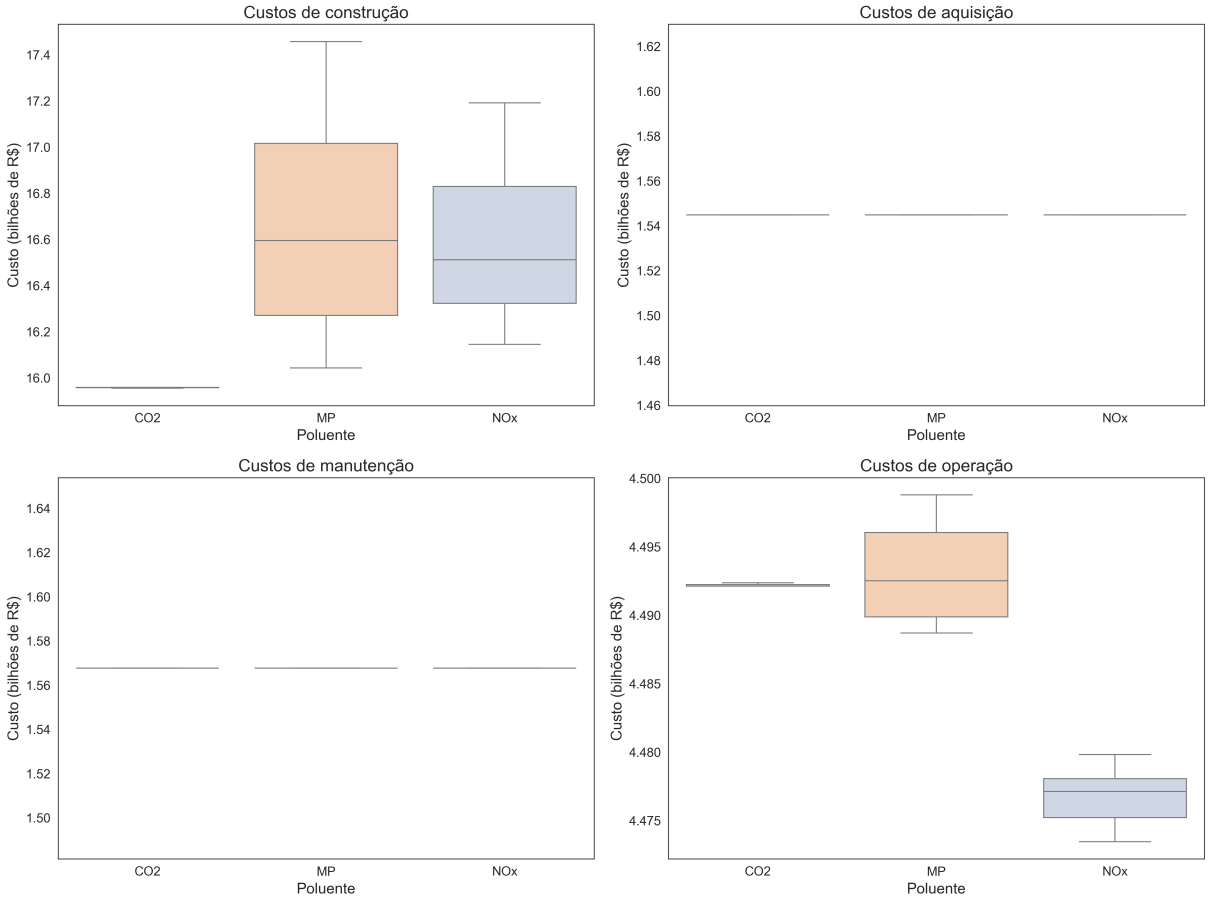


Fonte: Autora (2025).

relação aos preços que foram reajustados pela inflação; para os custos de aquisição, não há diferenças entre o cenário de infraestrutura e o de continuidade, já que em ambos ocorre a renovação da frota com a compra de veículos EURO VI (P8). As demais parcelas são detalhadas na sequência.

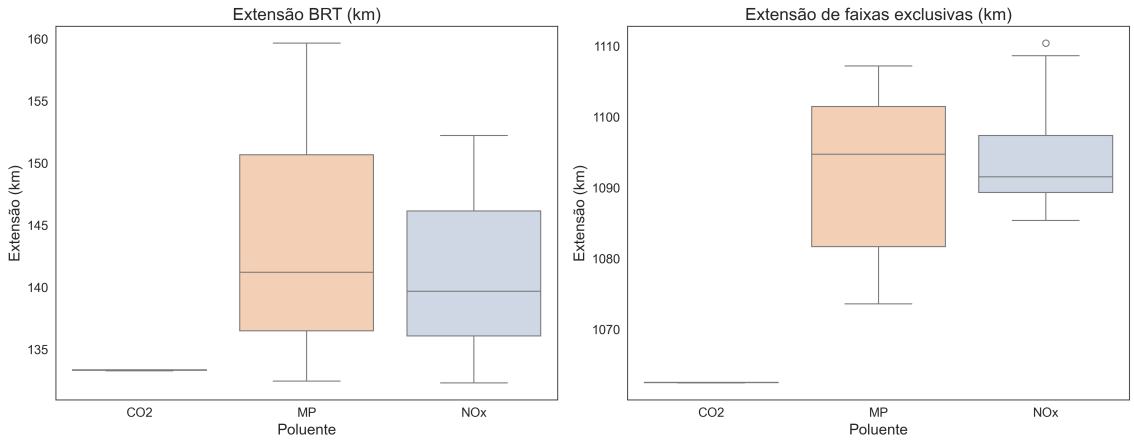
A parcela referente aos custos de construção é a que representa o maior percentual de participação nos custos totais e é também a parcela que apresenta diferenças significativas entre as soluções dos modelos para todos os poluentes. Para o modelo de CO_2, cuja variação é menor, a diferença não é significativa entre a solução mais barata e a mais cara, sendo que a diferença é de cerca de R$ 3,8 milhões. Esse valor sobe para mais de R$ 1 bilhão quando analisado o modelo de NO_x e para mais de R$ 1,4 bilhão quando analisado o modelo de MP. Essas diferenças ocorrerem devido ao fato de que os modelos de NO_x e MP selecionam mais vias para implementação de sistemas prioritários. Esse padrão se repete para as duas tipologias adotadas, embora a variação entre as soluções seja maior para faixas exclusivas. Em geral, o modelo de CO_2 seleciona em torno de 133 km de pistas exclusivas (43,5% do total da extensão de vias candidatas) e 1.062 km de faixas exclusivas (48% do total da extensão de vias candidatas). Para MP, os percentuais variam de 43,2 a 52,1% para pistas exclusivas e de 48,6 a 50% para faixas exclusivas; para NO_x, os valores variam de 43,1 a 49,6% para pistas exclusivas e de 49,1 a 50,2% para faixas exclusivas. Quantitativamente, não são percentuais ou extensões expressivos, entretanto, em virtude dos altos custos atrelados à implantação de infraestrutura, mesmo percentuais pequenos representam um impacto significativo no custo total. A Figura 44 apresenta as variações de extensões para cada tipologia e para cada modelo de poluente.

Figura 29 – Distribuição das parcelas de custos no cenário de infraestrutura para cada modelo de poluente.



Fonte: Autora (2025).

Figura 30 – Extensão de vias exclusivas por tipologia no cenário de infraestrutura para cada modelo de poluente.

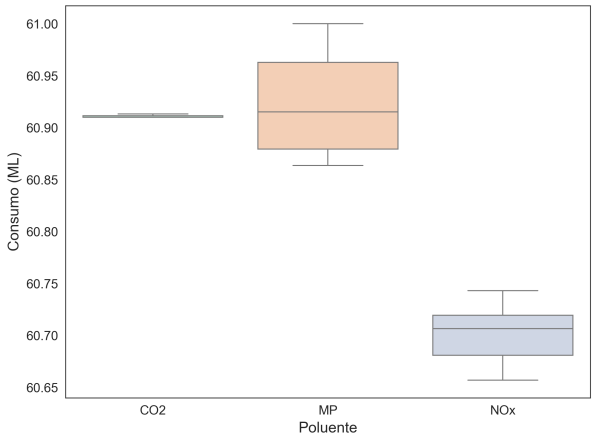


Fonte: Autora (2025).

Os incrementos de velocidade são responsáveis pelas variações nos custos de operação do sistema. Para o modelo de CO_2, a variação dos custos de operação não é expressiva, ficando em torno de R$ 4,4925 bilhões no horizonte de projeto. Para o modelo de NO_x há uma variação um pouco maior, mas é uma diferença da ordem de R$ 6,4 milhões, o que

não é um valor expressivo para a parcela de custos de operação nem para o valor global do projeto. O mesmo ocorre para MP, mesmo com uma variação maior entre as soluções, a diferença da ordem de R$ 9,8 milhões não representa um percentual significativo dos custos. Essas variações decorrerem do consumo anual de diesel, apresentado na Figura 31. Para CO_2, há um leve aumento – 1,7% – em relação ao cenário base em virtude da renovação da frota a diesel, mas ocorre uma redução de 3,6% em relação ao cenário de continuidade. Ou seja, a implementação de vias prioritárias é capaz de mitigar uma pequena parcela das emissões adicionais oriundas da renovação da frota. Os patamares de redução são similares aos de CO_2 para MP, enquanto que NO_x apresenta um aumento um pouco menor em relação ao cenário base – 1,3% – e uma redução levemente maior (3,9%) quando comparado com o cenário de continuidade. Para o modelo de CO_2, as soluções com menor ou maior consumo de diesel obtidas com o NSGA-II não apresentam diferenças e isso se deve, conforme mencionado anteriormente, à baixa diversidade observada na fronteira de Pareto para esse modelo neste cenário. Para NO_x a diferença é de cerca de 0,09 ML de diesel/ano, enquanto que o modelo de MP apresenta variações da ordem de 0,13 ML de diesel por ano, dependendo da solução adotada.

Figura 31 – Consumo anual de diesel no cenário de infraestrutura para cada modelo de poluente.



Fonte: Autora (2025).

Uma síntese para esse cenário é de que ele possui custos elevados de implementação, mas as reduções de emissões operacionais provocadas pelo aumento das velocidades não são suficientes para – sozinhas – mitigar as emissões adicionais de CO_2 provocadas pela troca de veículos diesel nem as emissões de construção. As reduções de percentuais das emissões dos outros poluentes em relação ao cenário de continuidade, por exemplo, tornam esse cenário pouco atrativo do ponto de vista econômico, pois há investimentos massivos com baixos potenciais de redução de emissões. Ainda assim, é um cenário que traz benefícios indiretos para os passageiros, de modo que a priorização viária não deve ser negligenciada, mas adotada em conjunto com outras estratégias de sustentabilidade.

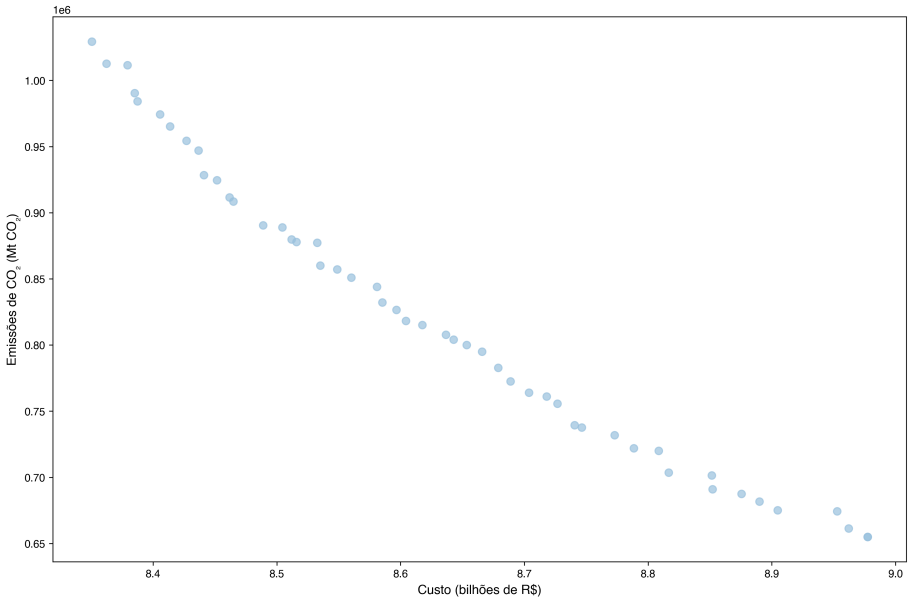
6.2.4 Cenário de sustentabilidade 2 – eletrificação

Este cenário representa a tentativa de melhoria do sistema de transporte público via tecnologia, mais precisamente, através da eletrificação da frota de ônibus. A despeito da redução de emissões que a renovação de frota pode proporcionar, esse cenário não contempla os benefícios para os passageiros que poderiam ser obtidos a partir a implementação de vias exclusivas. Para a implementação computacional, foi utilizado $SoC_{max} = 0,75$ em virtude do decaimento da bateria no final do ciclo de vida, $SoC_{min} = 0,20$ e $N_{ciclos\ eq.} = 2$, assumindo que os operadores e reguladores do sistema de transporte adotarão todas estratégias necessárias para que a maior quantidade possível de rotas e veículos sejam eletrificados, o que no caso de Belo Horizonte significa adotar estratégia de recarga noturna e de oportunidade. Salienta-se que mesmo com a adoção dessa premissa, nem todas as rotas de Belo Horizonte atendem a restrição de autonomia, ou seja, nem todas as rotas podem ser eletrificadas na configuração atual do sistema. Os resultados gerais da seção são apresentados para cada poluente e por fim é apresentada uma análise conjunta de aspectos do modelo pertinentes ao cenário.

6.2.4.1 Emissões de CO_2 no cenário de eletrificação

Os resultados obtidos mostram que com a eletrificação da frota, mas sem a implantação de infraestrutura, os índices de emissões de CO_2 são significativamente mais baixos que os cenários anteriores. A depender da solução adotada, a redução é de 26,2 a 53% em relação ao cenário base, de 30 a 55,5% quando comparado com o cenário de continuidade e de 27,4 a 53,8% em relação ao cenário de infraestrutura, uma consequência lógica da transição da matriz energética no sistema de transporte. A variação entre soluções para este cenário é de mais de 0,37 MtCO_2 no horizonte de projeto, isto é, as soluções mais caras geram um total de emissões de 0,65 MtCO_2, enquanto que as mais baratas ultrapassam 1 MtCO_2. A ausência de emissões de construção também colabora para que no horizonte de projeto esse cenário apresente os menores índices de emissões de todos os cenários analisados. Mas, conforme apontado anteriormente, apenas a transição tecnológica e energética não é capaz de alterar a dinâmica espacial da cidade e não traz benefícios adicionais como a redução dos tempos de viagem. Em termos de custos, o valor total varia entre pouco menos de R$ 8,4 e R$ 9 bilhões, sendo um cenário mais caro que o de continuidade, porém mais barato que o cenário de infraestrutura. Quando comparado com o cenário de continuidade, as diferenças de custo vão de R$ 0,6 bilhões a R$ 1,2 bilhão, mas são capazes de reduzir significativamente as emissões, tornando este um cenário ambiental e economicamente atrativo. A fronteira de Pareto para CO_2 no cenário de eletrificação é apresentada na Figura 32.

Figura 32 – Relação entre custo e emissões de CO_2 no horizonte de projeto para o cenário de eletrificação



Fonte: Autora (2025).

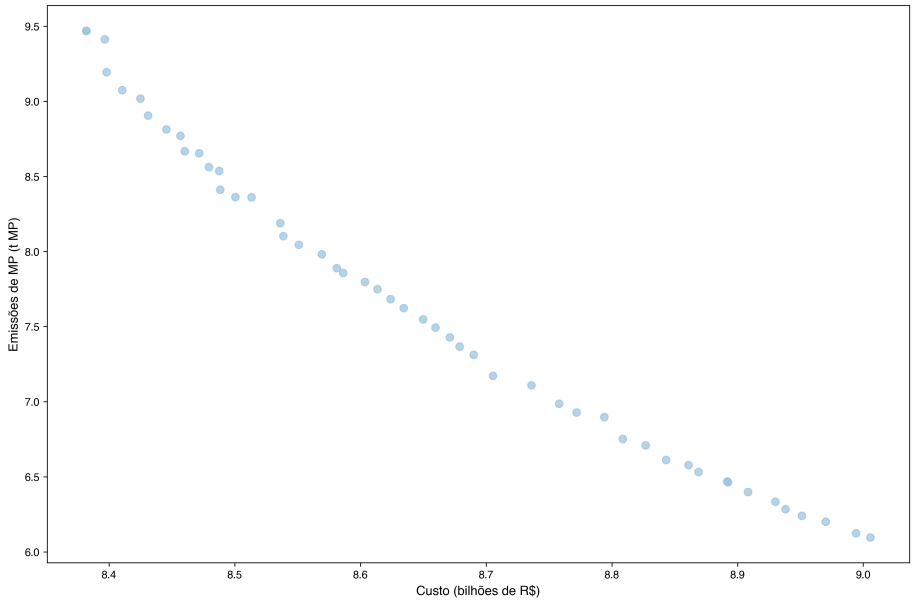
6.2.4.2 Emissões de MP no cenário de eletrificação

Os resultados obtidos para MP mostram que com a eletrificação da frota, as emissões tem uma redução de cerca de 91,1 a 94,2% em relação ao cenário base, de 32,2 a 56,3% em relação ao cenário de continuidade e de 29,2 a 54,3% em relação às emissões operacionais do cenário de infraestrutura. Ou seja, mesmo que a renovação da frota a diesel possa reduzir as emissões desse poluente, a eletrificação é capaz de produzir efeitos ainda mais positivos. Os custos totais são similares aos do modelo de CO_2, variando entre pouco menos de R$8,4 e R$ 9 bilhões no horizonte de projeto. Se comparados com o cenário de continuidade, por exemplo, os custos são de R$ 0,6 a R$ 1,2 bilhão mais caros, mas capazes de produzir reduções significativas nas emissões de MP, trazendo benefícios ambientais e sociais. A fronteira de Pareto para MP no cenário de eletrificação é apresentada na Figura 33.

6.2.4.3 Emissões de NO_x no cenário de eletrificação

Os resultados obtidos para NO_x mostram que com a eletrificação da frota, as emissões tem uma redução de cerca de 84,6 a 89,7% em relação ao cenário base, de 31,9 a 54,6% em relação ao cenário de continuidade e de 30,1 a 53,3% em relação às emissões operacionais do cenário de infraestrutura. Assim como para MP, mesmo que a renovação da frota a diesel possa reduzir as emissões de NO_x, a eletrificação é capaz de produzir efeitos ainda mais positivos. Os custos totais, similares aos modelos de CO_2 e MP, variam entre R$ 8,4 e R$ 9 bilhões no horizonte de projeto. A Figura 34 apresenta a fronteira de

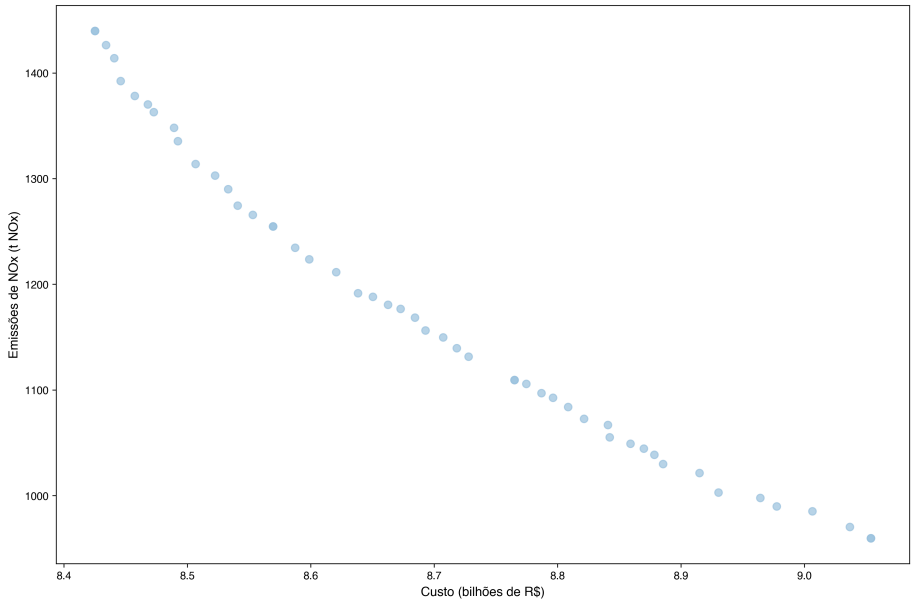
Figura 33 – Relação entre custo e emissões de MP no horizonte de projeto para o cenário de eletrificação.



Fonte: Autora (2025).

Pareto para NO_x no cenário de eletrificação.

Figura 34 – Relação entre custo e emissões de NO_x no horizonte de projeto para o cenário de eletrificação.



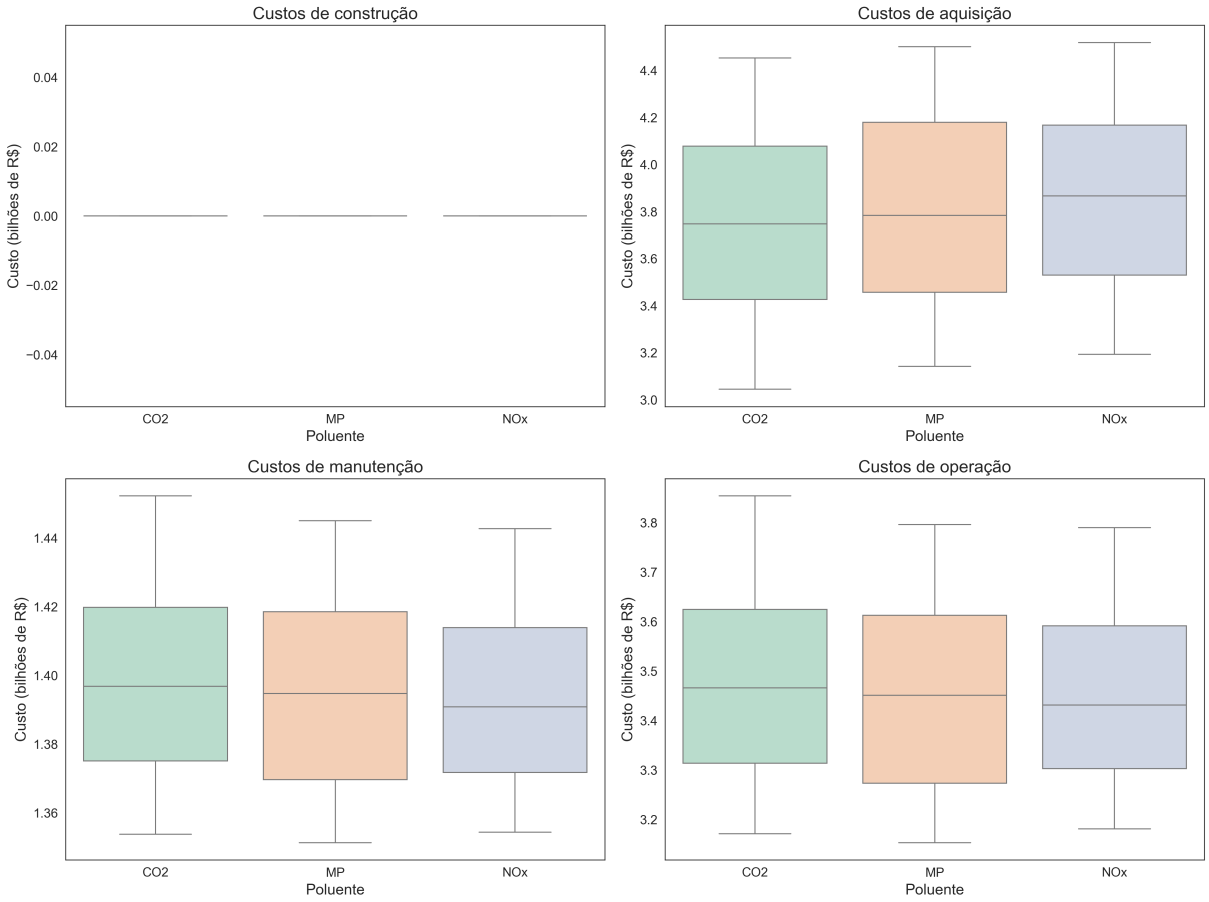
Fonte: Autora (2025).

6.2.4.4 Síntese do cenário

Nessa subseção, é apresentada uma síntese com comparação dos resultados dos modelos de cada poluente de acordo com aspectos pertinentes a esse cenário. A Figura 35 apresenta a composição de custos do sistema. Como não há implementação

de vias exclusivas, o custo de construção é nulo. Todas as demais parcelas variam nesse cenário e são detalhadas na sequência.

Figura 35 – Distribuição das parcelas de custos no cenário de eletrificação para cada modelo de poluente.



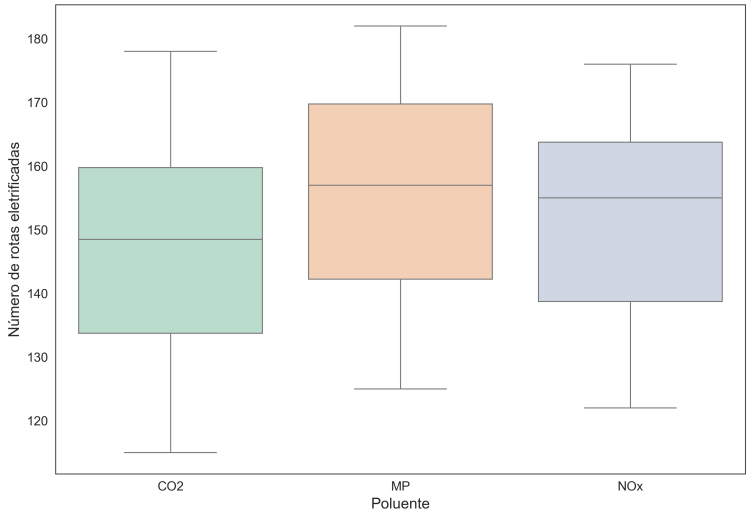
Fonte: Autora (2025).

Os custos de manutenção são a menor parcela dos custos totais, mas ainda assim, as diferenças entre as soluções no horizonte de projeto são da ordem de R$ 98,4 milhões para CO_2, R$ 93,7 milhões para MP e R$ 88,3 milhões para NO_x, não sendo de todo desprezíveis. Os custos de manutenção nesse cenário são menores que nos cenários de continuidade e infraestrutura devido à inserção de veículos elétricos na frota. Em geral, os custos de aquisição compõem a maior parcela dos custos totais, seguida dos custos de operação. Notadamente há uma intercambialidade entre estas duas parcelas, isto é, um aumento nos custos de aquisição causado pela maior aquisição de veículos elétricos vai provocar uma redução nos custos de operação, ao passo que custos mais baixos de aquisição causados por uma menor aquisição de veículos elétricos vão elevar os custos de operação. Esta lógica também se aplica aos custos de manutenção.

A variação nos custos está atrelada ao número de rotas que são eletrificadas. A Figura 36 apresenta este dado para os modelos de CO_2, MP e NO_x. Em geral, há uma variabilidade grande no número de rotas eletrificadas de acordo com cada poluente, mas neste cenário, o número mínimo é de 115 rotas (valor mínimo do modelo de CO_2), o que

corresponde a cerca de 36% do total de rotas de Belo Horizonte. Nos limites superiores, os modelos de CO_2 e NO_x selecionam, respectivamente, 178 e 176 rotas para eletrificação, o que corresponde a cerca de 55% do total de rotas. O modelo de MP tem os limites inferior e superior maiores que os demais modelos, com um valor mínimo de 125 e máximo de 182 rotas eletrificadas, o que representa 39 e 57% do total, respectivamente.

Figura 36 – Número de rotas eletrificadas no cenário de eletrificação para cada modelo de poluente.



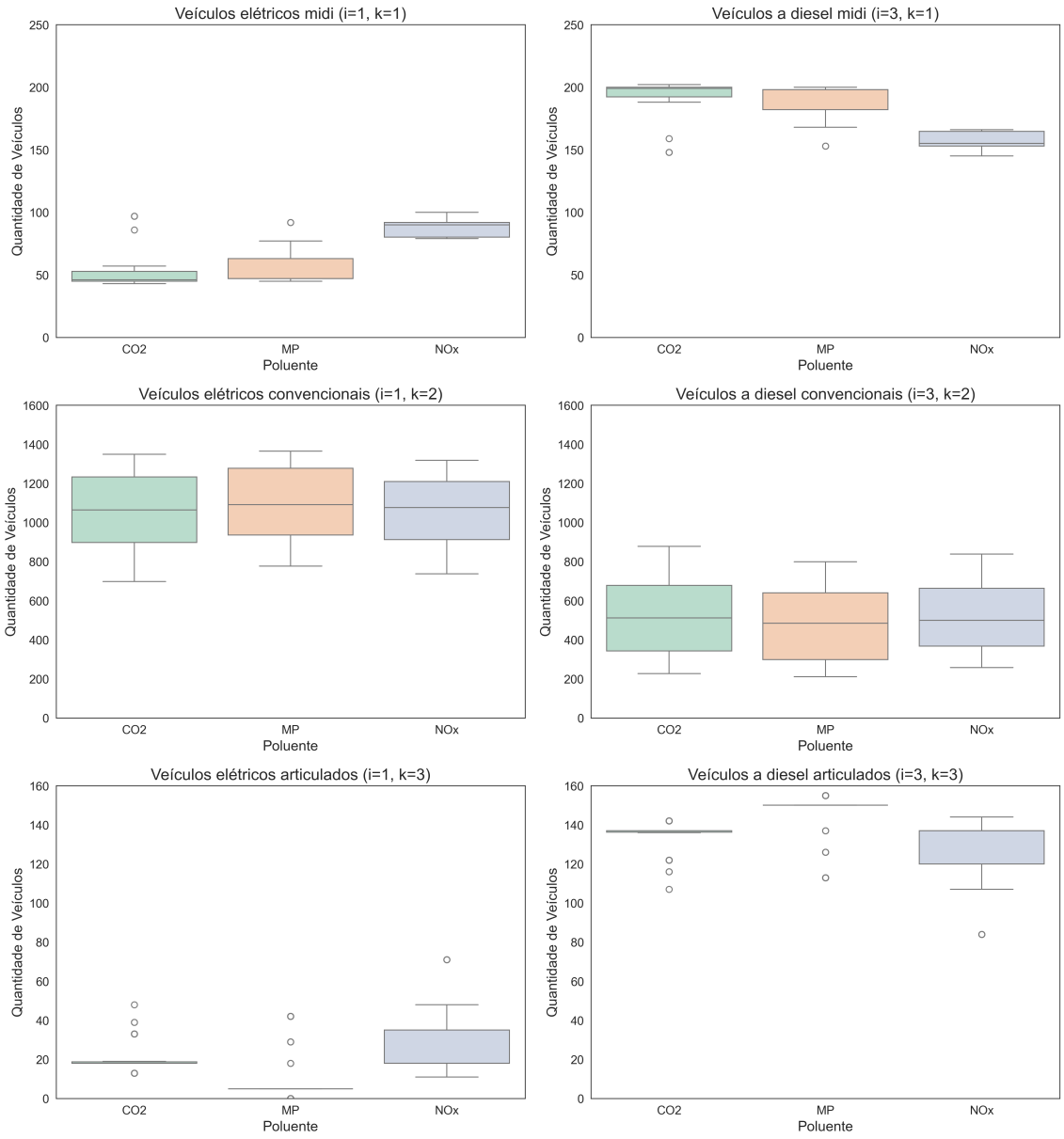
Fonte: Autora (2025).

O número de rotas eletrificadas influencia, obviamente, a composição da frota, cujo detalhamento é apresentado na Figura 37, e essa composição interfere diretamente, conforme mencionado, nos custos de manutenção, aquisição e operação. Ao analisar a figura, é possível apontar que para as categorias $k = 1$ e $k = 3$, a maioria dos veículos selecionados são veículos a diesel e, embora haja algumas soluções que destoam da distribuição central dos dados, a variabilidade das soluções é baixa para ambas categorias. Para $k = 2$, há uma inversão do padrão, com uma composição geral com um maior número de veículos elétricos, embora existam algumas soluções com mais veículos a diesel para todos os modelos.

Por fim, o último dado que se relaciona com a composição da frota, são os consumos anuais de diesel e energia para todos os poluentes, apresentados na Figura 38. Para o modelo de CO_2, o consumo anual de diesel varia de 28,1 a 44,2 ML/ano, a depender da solução analisada. As reduções percentuais desse componente se assemelham às observadas nas emissões, uma vez que são dados relacionados. Para MP, o consumo de diesel fica entre 27,7 e 42,9 ML/ano, enquanto que para NO_x a variação é de 28,4 a 42,7 ML/ano. A demanda de energia elétrica apresenta patamares entre 72,8 e 136,2 GWh/ano, sendo que os modelos de MP e NO_x são os que apresentam os maiores limites máximos. Isso ocorre, conforme mencionado anteriormente, porque os modelos para esses poluentes possuem soluções com números maiores de rotas eletrificadas.

Uma síntese para esse cenário é de que ele possui custos mais elevados que o cenário

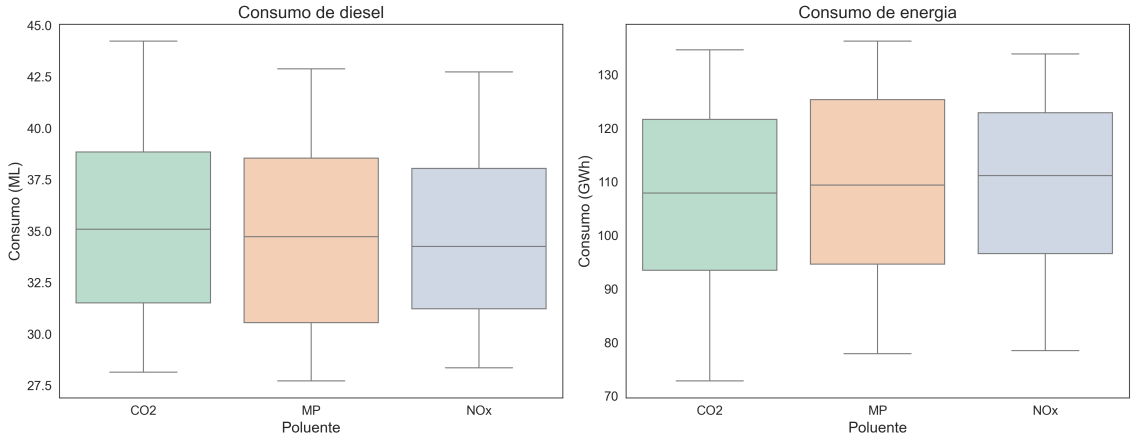
Figura 37 – Composição da frota no cenário de eletrificação para cada modelo de poluente.



Fonte: Autora (2025).

de continuidade, mas as reduções de emissões operacionais provocadas pela eletrificação são significativas a ponto de tornar este um cenário atrativo dos pontos de vista ambiental, econômico e social. Quando comparado com o cenário de infraestrutura, a eletrificação possui custos e emissões totais menores. Entretanto, apenas a substituição da matriz energética não produz benefícios indiretos de redução dos tempos de viagem, nem é capaz de pautar um debate de reestruturação da rede viária, com prioridade efetiva do transporte público em relação aos modos motorizados individuais. É um cenário que apresenta grandes benefícios, mas que sozinho não é capaz de alterar estruturalmente os problemas atuais do transporte urbano de passageiros.

Figura 38 – Consumo anual de diesel e de energia no cenário de eletrificação para cada modelo de poluente.



Fonte: Autora (2025).

6.2.5 Cenário de sustentabilidade 3 – infraestrutura e eletrificação

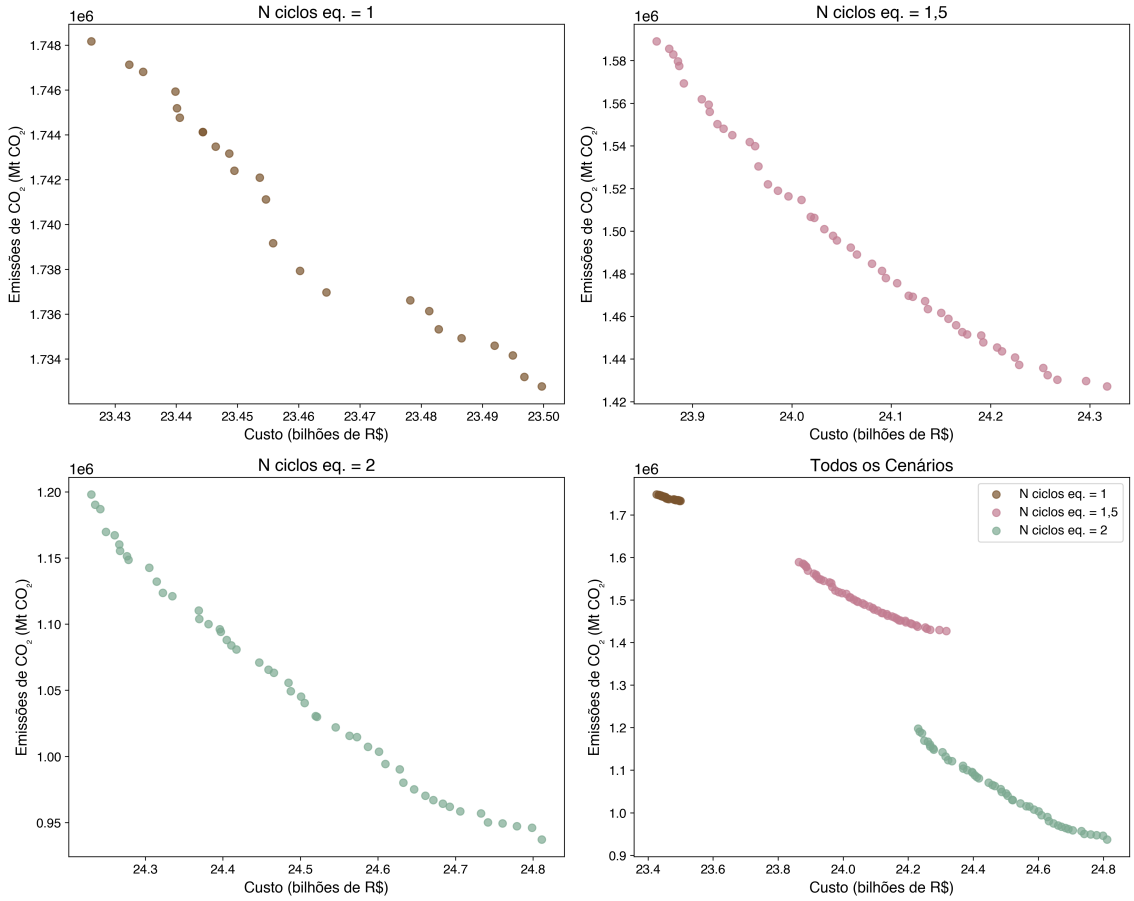
Para este cenário, foi utilizado $SoC_{max} = 0,75$ em virtude do decaimento da bateria no final do ciclo de vida e $SoC_{min} = 0,20$. A partir disso, foram investigados 3 diferentes padrões de recarga, $N_{ciclos\ eq.} = 1$, 1,5 e 2. Os resultados gerais da seção são apresentados para cada poluente e por fim é apresentada uma análise conjunta de determinados aspectos do modelo, como composição dos custos, extensão de vias exclusivas, número de rotas eletrificadas e composição da frota.

6.2.5.1 Emissões de CO_2 no cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada

Os resultados obtidos mostram que a estratégia de recarregar a bateria com 2 ciclos equivalentes diários é a estratégia que produz os menores índices de emissão de CO_2, mas também é a solução que apresenta os maiores custos, com custos totais da ordem de R$ 24,8 bilhões para as soluções com as menores emissões totais. As fronteiras de Pareto para CO_2 são apresentadas na Figura 39 e o detalhamento das emissões é apresentado na Figura 40.

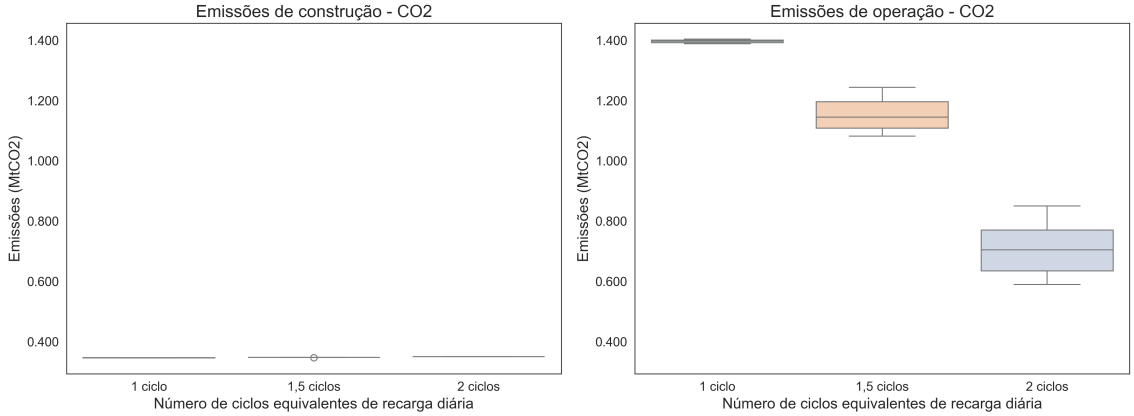
As emissões de construção tem uma baixa variabilidade de acordo com a estratégia de recarga adotada e estão na faixa de 0,35 MtCO_2 no horizonte de projeto. Apesar de configurar um montante significativo de emissões, a participação percentual nas emissões totais varia entre 20 e 37%, de acordo com a estratégia de recarga adotada; os percentuais mais modestos estão vinculados à estratégia de recarga noturna, mas esse percentual é menor justamente porque as emissões operacionais são elevadas. O cenário no qual as emissões de construção correspondem a 37% do total é representado pela solução com menor valor total de emissões quando adotada recarga noturna e de oportunidade com $N_{ciclos\ eq.} = 2$. Ainda assim, as emissões operacionais compõem a parcela mais significativa

Figura 39 – Relação entre custo e emissões de CO_2 no horizonte de projeto para o cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada.



Fonte: Autora (2025).

Figura 40 – Proporção de emissões de construção e operação nas emissões de CO_2 no horizonte de projeto para o cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada.



Fonte: Autora (2025).

das emissões totais no horizonte de projeto. Na análise a seguir, as estratégias de recarga serão analisadas pelo potencial de redução de emissões quando comparadas com outros cenários. Para alguns cenários, foi realizada também uma análise do ponto de vista de potencial de mitigação das emissões de construção e isso significa que, com a adoção de

uma determinada estratégia de recarga, os patamares de emissão totais no horizonte de projeto se equiparam com o cenário de comparação, principalmente o cenário base e o de continuidade.

Quando analisadas as soluções com $N_{ciclos\ eq.} = 1$, observa-se que as emissões operacionais são praticamente iguais às do cenário base, com uma redução de 0,5% para a solução mais cara e um acréscimo de 0,6% se considerada a solução mais barata. Em relação ao de continuidade, as reduções são da ordem de 4,6 a 5,6% e em relação ao cenário de infraestrutura a redução é de 1,1 a 2,2%. Por fim, comparado ao cenário de eletrificação, a estratégia de recarga noturna representa um aumento das emissões entre 36,3 e 111,9%, a depender da solução analisada. Isso decorre do fato de que no cenário de eletrificação foi adotado $N_{ciclos\ eq.} = 2$, a partir da premissa de que operadores e reguladores do sistema farão esforço máximo para eletrificar a frota. Além disso, o cenário com $N_{ciclos\ eq.} = 1$ apresenta-se como não atrativo do ponto de vista econômico, uma vez que os custos são significativamente maiores que os cenários anteriores, devido principalmente à construção de vias exclusivas, cujas emissões também se configuram como um fardo adicional que não são compensadas pela redução das emissões em virtude dos ganhos de velocidade.

As soluções de $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ apresentam patamares de emissões operacionais que variam de 77,5 a 89,1% quando comparados com o cenário base e de 73,5 a 84,5% quando comparados com o cenário de continuidade. Em relação ao cenário de infraestrutura, as emissões operacionais correspondem a 76,2 - 87,6%, ou seja, com o cenário $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ há redução entre 12,4 e 23,8% dessas emissões. Comparado com o cenário de eletrificação, novamente há um aumento das emissões em virtude de um menor grau de eletrificação da frota, porém o aumento é de 20,7 a 65,1%, inferior aos aumentos observados com $N_{ciclos\ eq.} = 1$. Essa configuração de recarga resulta, obviamente, em custos e emissões intermediários em relação aos outros cenários, as reduções de emissões são um pouco mais significativas que com $N_{ciclos\ eq.} = 1$, mas a mitigação das emissões de construção depende de qual solução é adotada dentro dessa configuração, isto é, as soluções mais baratas apresentam emissões totais no horizonte de projeto maiores que no cenário de continuidade, por exemplo, enquanto que algumas das soluções mais caras conseguem ficar abaixo dessa projeção.

Com $N_{ciclos\ eq.} = 2$, é possível chegar a patamares de emissões de operação entre 0,0588 e 0,0849 MtCO_2/ano, o que corresponde a proporções de 42,2 a 60,9% das emissões operacionais do cenário base, 40 a 57,7% do cenário de continuidade, 41,5 a 59,9% do cenário de infraestrutura e 82,5 a 89,8% do cenário de eletrificação. Nota-se, portanto, que o cenário com 2 ciclos equivalentes de recarga diária são os que apresentam maiores reduções das emissões operacionais, com soluções variando entre 10 e 60%, dependendo do cenário de comparação e da solução analisada. Essa redução acontece também quando analisado o cenário de eletrificação, de modo que é possível afirmar que os incrementos de

velocidade proporcionados pela implantação de vias prioritárias é capaz de mitigar, pelo menos parcialmente, as emissões de construção.

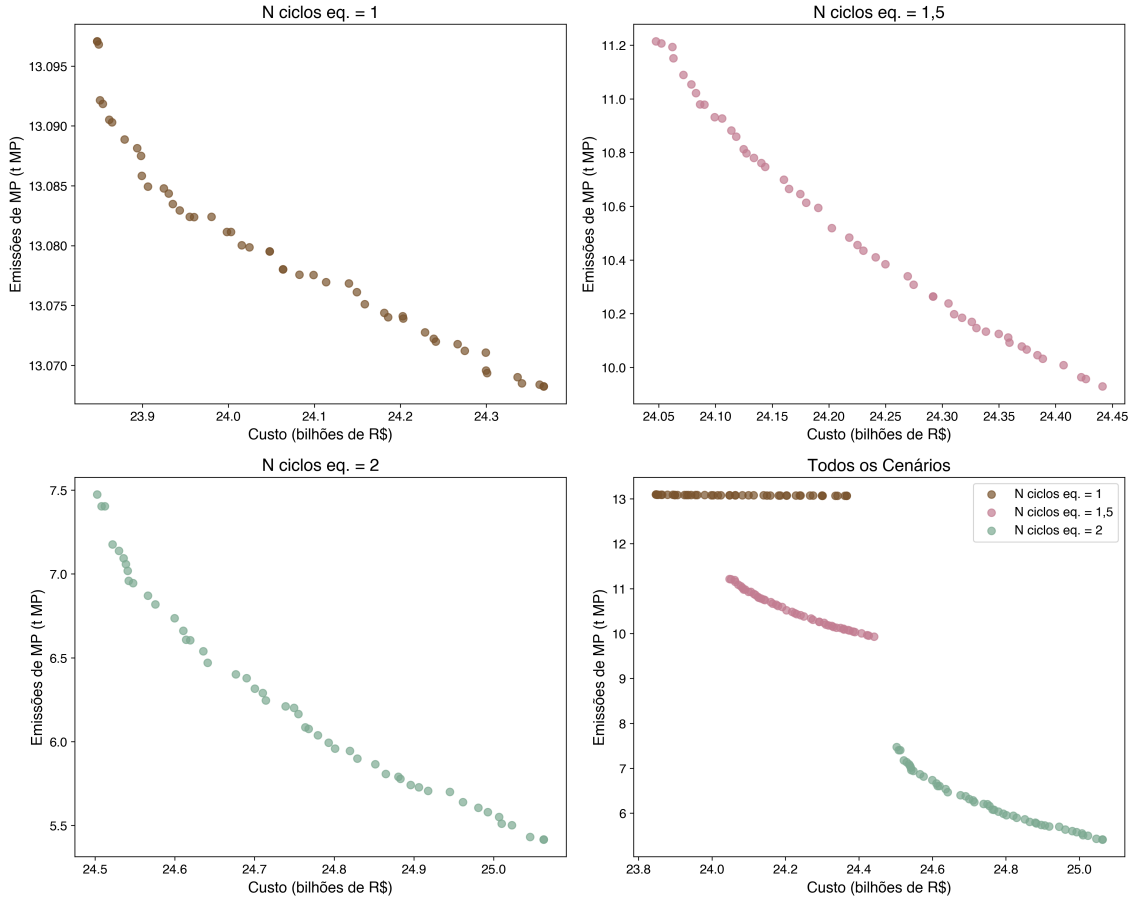
Um ponto de atenção para as emissões de CO_2 é que algumas soluções das estratégias de recarga com $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ apresentam custos superiores a soluções das estratégias com $N_{ciclos\ eq.} = 2$, ainda que as emissões desta última sejam inferiores. Embora as soluções de $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ sejam não dominadas dentro do seu próprio conjunto de soluções, alguns desses indivíduos passam a ser dominados por soluções de outras estratégias de recarga e, em termos de tomada de decisão, essas soluções não devem ser implementadas, uma vez que trazem benefícios ambientais menores com os mesmos patamares de gastos.

6.2.5.2 Emissões de MP no cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada

Os resultados obtidos mostram que a estratégia de recarga com 2 ciclos equivalentes diários é a que produz os menores índices de emissão de MP, mas também é a solução que apresenta os maiores custos, em torno de R$ 25,1 bilhões para atingir as menores emissões totais. As fronteiras de Pareto para MP são apresentadas na Figura 41. Salienta-se que, conforme apontado anteriormente, em virtude da não localização de parâmetros de emissão para MP, não foram consideradas emissões de construção para esse poluente e os valores apresentados de emissões correspondem a emissões de operação. A análise detalhada das emissões de MP a seguir é feita a partir de valores anuais para um melhor efeito de comparação com os outros cenários, porém os valores apresentados na Figura 41 correspondem aos valores no horizonte de projeto.

Quando analisadas as soluções com $N_{ciclos\ eq.} = 1$, observa-se que a variabilidade de redução das emissões para essa configuração de recarga é bastante baixa, mesmo que os custos totais variem em mais de R$ 500 milhões no horizonte de projeto. Isso fica evidente, por exemplo, no gráfico conjunto da Figura 41, onde as soluções de $N_{ciclos\ eq.} = 1$ parecem estar localizados em cima de uma reta horizontal. Nessa configuração de estratégia de recarga, as emissões operacionais de MP correspondem a cerca de 12,3 - 12,4% das emissões do cenário base. Assim como no cenário de continuidade, as emissões de MP se beneficiam da renovação da frota, mesmo que esse processo ocorra com veículos a diesel, mas a eletrificação da frota com estratégia de recarga noturna é capaz de reduzir adicionalmente cerca de 6% das emissões. Comparado com o cenário de infraestrutura, a redução de emissões fica em torno de 2% e comparado com o cenário de eletrificação, há um aumento de emissões de 38,3 a 114,3%, dependendo da solução adotada. Como mencionado na seção de CO_2, isso ocorre por causa da adoção de $N_{ciclos\ eq.} = 2$ no cenário de eletrificação. Assim como para CO_2, essa configuração de recarga não se apresenta como atrativa tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, uma vez que os custos são significativamente maiores que os cenários anteriores, mas as reduções de emissões não

Figura 41 – Relação entre custo e emissões de MP no horizonte de projeto para o cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada.



Fonte: Autora (2025).

são significativas a ponto de justificar investimentos tão elevados.

As soluções de $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ apresentam patamares de redução das emissões operacionais de cerca de 89,2 - 90,6% quando comparados com o cenário base, cerca de 1,7 - 3,0% a mais do que o cenário de $N_{ciclos\ eq.} = 1$. Em relação ao cenário de continuidade, a recarga com $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ é capaz de reduzir as emissões de MP entre 19,7 e 28,9%, a depender da solução escolhida. Comparado com o cenário de infraestrutura, observam-se reduções entre 16,2 e 25,6% e comparado ao cenário de eletrificação ocorrem aumentos entre 18,4 a 62,9%, dependendo da solução.

Com $N_{ciclos\ eq.} = 2$, é possível chegar a patamares de emissões de operação entre 0,5416 e 0,7475 tMP/ano, o que corresponde a cerca de 5,1 - 7,1% das emissões operacionais do cenário base e 38,8 - 53,5% do cenário de continuidade, respectivamente, demonstrando que uma robusta estratégia de eletrificação pode reduzir significativamente (46,5 a 61,2%) as emissões desse poluente, mesmo quando comparado com a renovação da frota a diesel. Em relação ao cenário de infraestrutura, as emissões de $N_{ciclos\ eq.} = 2$ são da ordem de 40,6 e 55,9%, ou seja, com índices de redução que variam de 44,1 a 59,4%. Por fim, comparado ao cenário de eletrificação, é possível obter reduções adicionais de cerca de 11,2 a 21,1%

ao adotar medidas conjuntas.

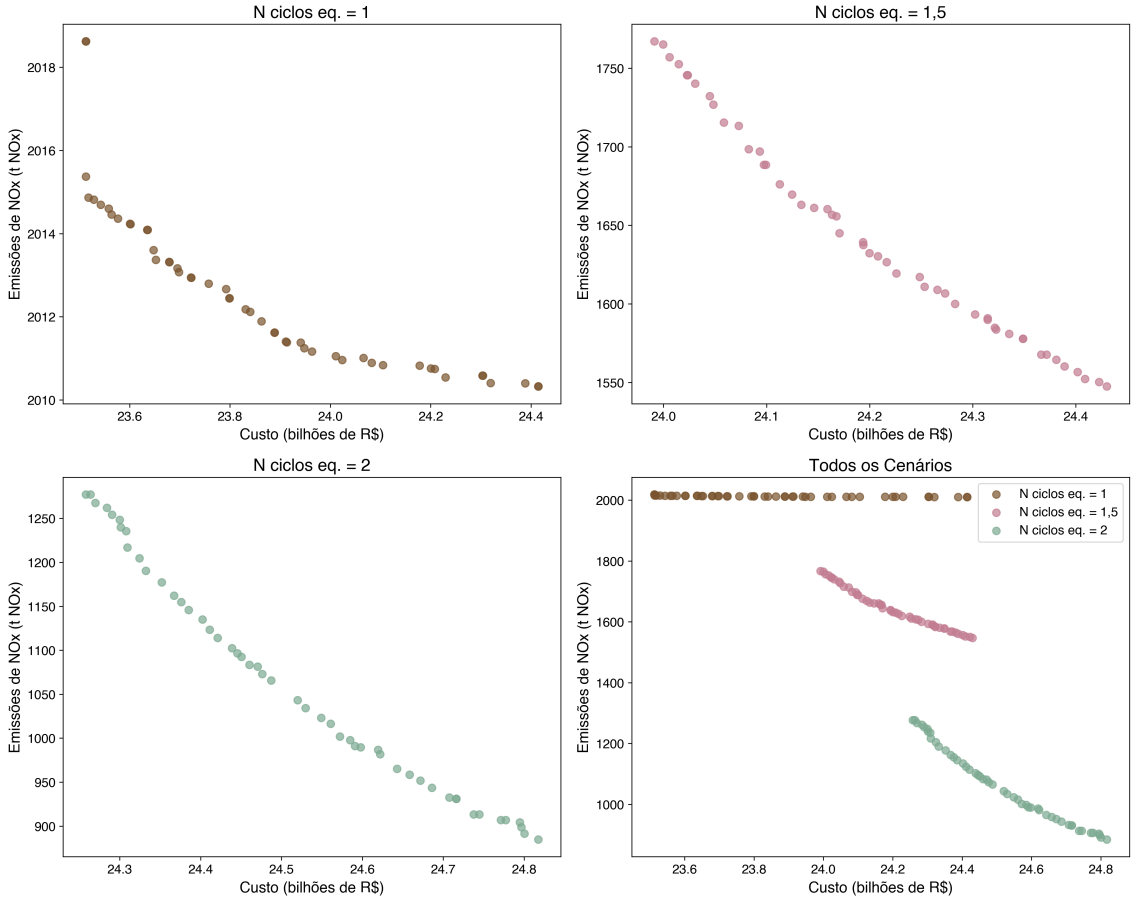
Um ponto de atenção para as emissões de MP é que algumas soluções das estratégias de recarga com $N_{ciclos\ eq.} = 1$ apresentam custos superiores a soluções das estratégias com $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$, ainda que as emissões destas últimas sejam inferiores. Embora as soluções de $N_{ciclos\ eq.} = 1$ sejam não dominadas dentro do seu próprio conjunto de soluções, alguns desses indivíduos passam a ser dominados por soluções de outras estratégias de recarga e, em termos de tomada de decisão, essas soluções não devem ser implementadas, uma vez que trazem benefícios ambientais menores com os mesmos patamares de gastos.

6.2.5.3 Emissões de NO_x no cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada

Assim como para os demais poluentes, os resultados obtidos para NO_x mostram que a estratégia de recarga com 2 ciclos equivalentes diários é a que produz os menores índices de emissão, mas também é a solução que apresenta os maiores custos, em torno de R$ 24,8 bilhões para as soluções com as menores emissões totais. As fronteiras de Pareto para NO_x são apresentadas na Figura 42. Salienta-se que, conforme apontado anteriormente, em virtude da não localização de parâmetros de emissão para NO_x, não foram consideradas emissões de construção para esse poluente e os valores apresentados correspondem a emissões de operação. Aponta-se que, assim como para MP, a análise das emissões de NO_x é feita a partir de valores anuais para um melhor efeito de comparação com os outros cenários, entretanto, os valores apresentados na Figura 42 correspondem aos valores no horizonte de projeto.

Para as soluções com $N_{ciclos\ eq.} = 1$, observa-se que a variabilidade de redução das emissões para essa configuração de recarga é bastante baixa, mesmo que os custos totais variem em mais de R$ 900 milhões no horizonte de projeto. Isso se reflete no gráfico conjunto da Figura 42, onde as soluções de $N_{ciclos\ eq.} = 1$ parecem estar localizados em cima de uma reta horizontal. Quando analisadas as soluções com dessa estratégia de recarga, observa-se que as emissões operacionais de NO_x correspondem a cerca de 21,6% das emissões do cenário base, ou seja, a redução de emissões é de aproximadamente 78,4%. Assim como para MP, as emissões de NO_x se beneficiam da renovação da frota, mesmo que esse processo ocorra com veículos a diesel, como no cenário de continuidade, mas a eletrificação da frota com estratégia de recarga noturna proporciona uma redução adicional de 4,5 a 4,9% das emissões de NO_x. Em relação ao cenário de infraestrutura, há uma redução adicional em torno de 2,0% e comparado ao cenário de eletrificação, ocorrem aumentos de 40,2 a 109,5%. Conforme já apontado nas discussões feitas para os outros poluentes, essa configuração de recarga não é atrativa tanto do ponto de vista ambiental quanto econômico, uma vez que as reduções de emissões não são significativas a ponto de justificar investimentos tão elevados.

Figura 42 – Relação entre custo e emissões de NO_x no horizonte de projeto para o cenário misto de acordo com a estratégia de recarga adotada.



Fonte: Autora (2025).

As soluções de $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ apresentam patamares de redução das emissões operacionais de cerca de 81,1 - 83,4% quando comparados com o cenário base, valores cerca de 2,7 - 5,1% maiores do que no cenário de $N_{ciclos\ eq.} = 1$. A estratégia de recarga com $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ é capaz de uma redução das emissões de NO_x entre 16,4 e 26,8% em relação ao cenário de continuidade e entre 14,2% e 24,7% em relação ao cenário de infraestrutura, a depender da solução escolhida. Comparado ao cenário de eletrificação, ocorrem aumentos entre 22,7 e 61,2%, dependendo da solução.

Ao adotar a estratégia de recarga com $N_{ciclos\ eq.} = 2$, é possível chegar a patamares de emissões de operação entre 88,5 e 127,7 tNO_x/ano, o que corresponde a cerca de 9,5 - 13,7% das emissões operacionais do cenário base e 41,9 - 60,4% do cenário de continuidade, respectivamente, demonstrando que a eletrificação da frota pode reduzir as emissões desse poluente entre 39,6 e 58,1% mesmo quando comparado com a renovação da frota a diesel. O cenário de infraestrutura assemelha-se ao de continuidade, e comparado com ele, o cenário com $N_{ciclos\ eq.} = 2$ é capaz de reduzir de 38 a 56,9% as emissões de NO_x. Por fim, comparado ao cenário de eletrificação, a estratégia de 2 ciclos equivalentes diários proporciona reduções que vão de 7,8 a 11,3%.

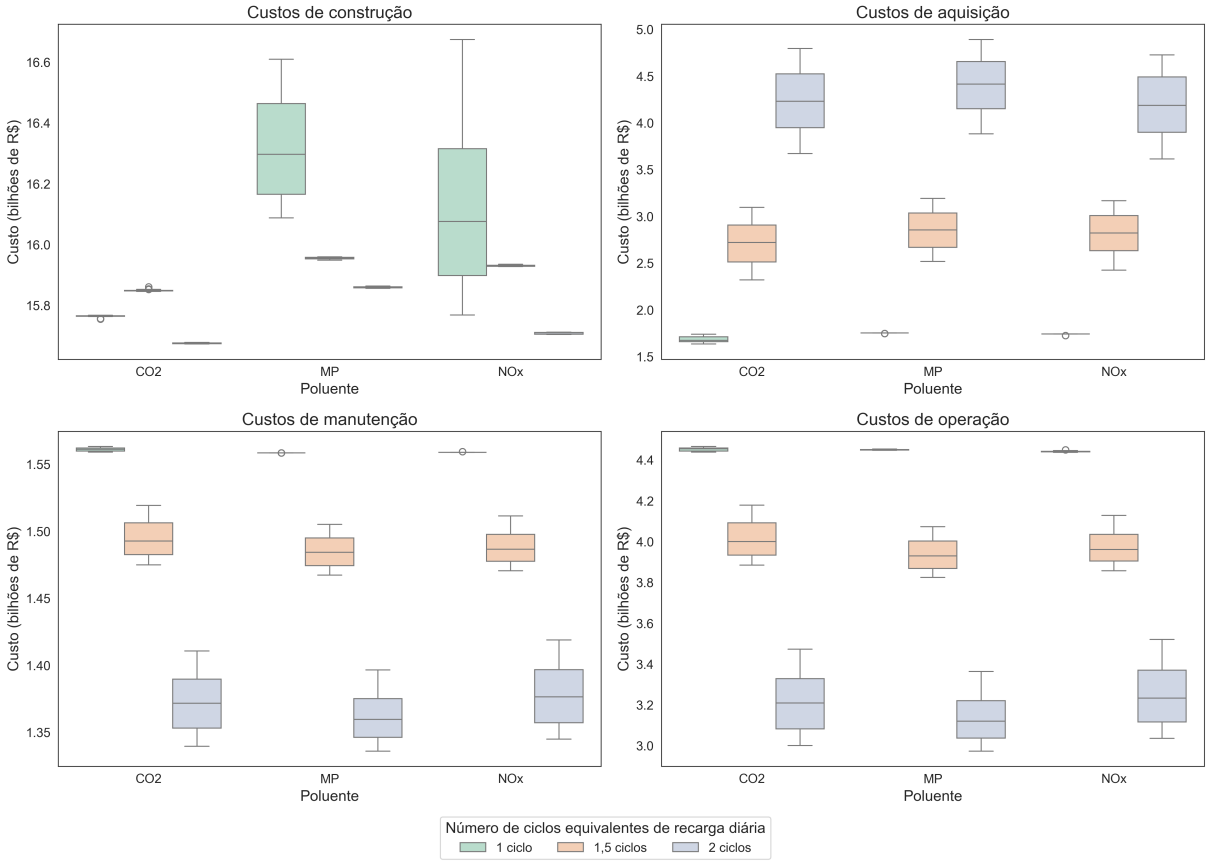
De modo similar ao que ocorreu nos modelos dos demais poluentes, para NO_x algumas soluções das estratégias de recarga com $N_{ciclos\ eq.} = 1$ e 1,5 apresentam custos superiores à solução mais barata da estratégia com $N_{ciclos\ eq.} = 2$, ainda que as emissões da última sejam inferiores às demais. Embora as soluções de $N_{ciclos\ eq.} = 1$ e 1,5 sejam não dominadas dentro dos seus próprios conjuntos de soluções, alguns desses indivíduos passam a ser dominados por soluções de outras estratégias de recarga e, em termos de tomada de decisão, essas soluções não devem ser implementadas, uma vez que trazem benefícios ambientais menores com os mesmos patamares de gastos.

6.2.5.4 Síntese do cenário

Nessa subseção, é apresentada uma síntese com comparação dos resultados dos modelos de acordo com aspectos pertinentes a esse cenário, como composição de custos, de frota, número de rotas eletrificadas, extensões de vias exclusivas e consumo de combustível. Neste cenário, todas as parcelas são passíveis de alteração e os gráficos apresentados estão segregados por estratégia de recarga e por poluente. Primeiramente, a Figura 43 apresenta a composição de custos do sistema. Assim como no cenário de infraestrutura, a parcela referente aos custos de construção é a que representa a maior fração dos custos totais. Em geral os valores orbitam entre R$ 15,6 e R$ 16,7 bilhões e representam de 63 a 68% dos custos totais, dependendo do poluente e do número de ciclos equivalentes. A estratégia de recarga com $N_{ciclos\ eq.} = 1$ se assemelha com o cenário de infraestrutura em termos de comportamento de todas as parcelas de custos, embora haja pequenas variações no valores mínimos e máximos. As estratégias de recarga com $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ e 2 representam uma combinação dos cenários de infraestrutura e eletrificação, sendo que exceto pela parcela dos custos de construção, o padrão de custos de $N_{ciclos\ eq.} = 2$ se assemelha ao cenário de eletrificação. Esse resultado é natural, uma vez que essa configuração de recarga também foi adotada no cenário de eletrificação. Os desdobramentos da composição são detalhados na sequência.

Para o modelo de CO_2, o maior custo de construção é o de $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$, em torno de R$ 15,85 bilhões. Por outro lado, para MP e NO_x, a variabilidade de custos dentro das soluções para $N_{ciclos\ eq.} = 1$ é de mais de R$ 520 milhões para MP e quase R$ 900 milhões para NO_x. Uma interpretação possível para essa variabilidade é que em geral são necessárias maiores extensões de vias exclusivas para compensar a baixa eletrificação da frota, uma vez que no cenário de infraestrutura, onde nenhuma rota era eletrificada, os custos máximos dessa parcela ultrapassaram R$ 17 bilhões para NO_x e R$ 17,5 bilhões para MP. Para os custos de $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ e 2, a variabilidade entre as soluções de todos os modelos é baixa. Outro ponto a se notar é que os custos de construção das soluções tende a diminuir conforme o $N_{ciclos\ eq.}$ aumenta, demonstrando que quando há uma menor eletrificação da frota, os modelos tendem a aumentar as extensões de vias exclusivas

Figura 43 – Distribuição das parcelas de custos para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada.



Fonte: Autora (2025).

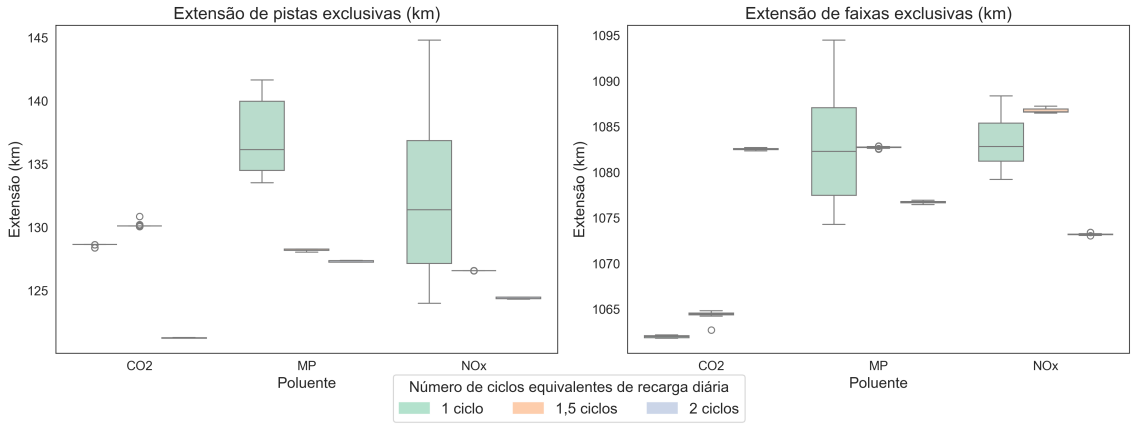
construídas para minimizar as emissões.

Os custos de construção são reflexo das extensões e da tipologia de cada solução, apresentadas na Figura 44. O modelo de CO_2 com $N_{ciclos\ eq.} = 1$ e 1,5 seleciona uma extensão maior de pistas exclusivas e menor de faixas exclusivas quando comparado com $N_{ciclos\ eq.} = 2$; essa variação é de até 9,6 km para pistas exclusivas e 20,8 km para faixas exclusivas. Para MP e NO_x com $N_{ciclos\ eq.} = 1$, observa-se o mesmo padrão que no gráfico de custos, isto é, uma variabilidade maior das soluções na seleção das extensões tanto de pistas quanto de faixas exclusivas. Assim como no cenário de infraestrutura, as soluções não diferem muito quantitativamente, por exemplo, uma variação de 20 km é cerca de 14,3% da extensão máxima de BRT ou então uma variação de 20 km em quase 1.100 km de faixas exclusivas implantadas representa um percentual de cerca de 1,83%, porém em virtude dos altos custos atrelados à implantação de infraestrutura, mesmo percentuais pequenos representam um impacto significativo no custo total. No exemplo citado, 20 km de pistas exclusivas representam um impacto de mais de R$ 800 milhões e a mesma extensão de faixas exclusivas custa R$ 200 milhões.

Em termos de valores máximos, na solução com maior extensão de pistas exclusivas

(NO_x com $N_{ciclos\ eq.} = 1$) tem-se 144,8 km, o que representa 47,2% dos segmentos candidatos. Para faixas exclusivas, a maior extensão é observada para MP com $N_{ciclos\ eq.} = 1$, com 1.094 km, o que representa cerca de 49,5% dos segmentos candidatos. Em termos da rede viária da cidade, isso representaria algo em torno de 13,9% da rede com novos esquemas de priorização para o sistema de transporte público. Os resultados desse cenário, assim como o de infraestrutura, mostram a dimensão do esforço que precisa ser realizado para que as melhorias das velocidades operacionais sejam capazes de reduzir as emissões.

Figura 44 – Extensão de vias exclusivas para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada.



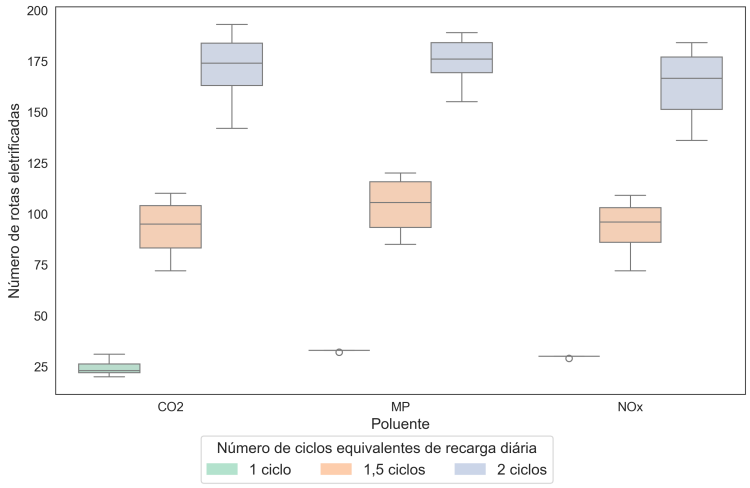
Fonte: Autora (2025).

Em relação aos custos de aquisição, com $N_{ciclos\ eq.} = 2$, as soluções apresentam limites superiores similares aos observados no cenário de eletrificação, porém os limites inferiores aqui são mais elevados, indicando que no cenário de eletrificação o modelo foi capaz de produzir soluções mais diversas, potencialmente em virtude da não existência dos custos de construção. Para os custos de operação, os limites inferiores são similares ao cenário de eletrificação, enquanto que os superiores são menores para todos os poluentes. Os custos de manutenção apresentam padrões similares em ambos os cenários. Por fim, a estratégia com $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ representa, em geral, soluções intermediárias entre os demais cenários. Para $N_{ciclos\ eq.} = 1$, os custos de aquisição, manutenção e operação obtidos nos modelos de todos os poluentes se assemelham ao cenário de infraestrutura.

A variação nos custos está atrelada ao número de rotas que são eletrificadas. A Figura 45 apresenta este dado para todos os poluentes e $N_{ciclos\ eq.}$. Em geral, há variabilidade no número de rotas eletrificadas de acordo com cada poluente, mas essa variabilidade é menor do que no cenário de eletrificação. Neste cenário, os valores máximos de rotas eletrificadas é 189, observada em uma solução de CO_2 com $N_{ciclos\ eq.} = 2$, o que representa 58,9% do total de rotas de Belo Horizonte e supera em 7 o valor máximo de rotas eletrificadas do cenário de eletrificação. Esse resultado indica que esse pode ser um limite máximo de eletrificação para a configuração atual da rede de transporte público, principalmente em virtude do fato de que já existem ônibus EURO VI (P8) em

operação no início do período de análise. Com $N_{ciclos\ eq.} = 1$, aproximadamente 30 rotas são eletrificadas e há pouca variabilidade entre os resultados de todos os poluentes. Os resultados de $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ representam um patamar intermediário entre os demais.

Figura 45 – Número de rotas eletrificadas para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada.

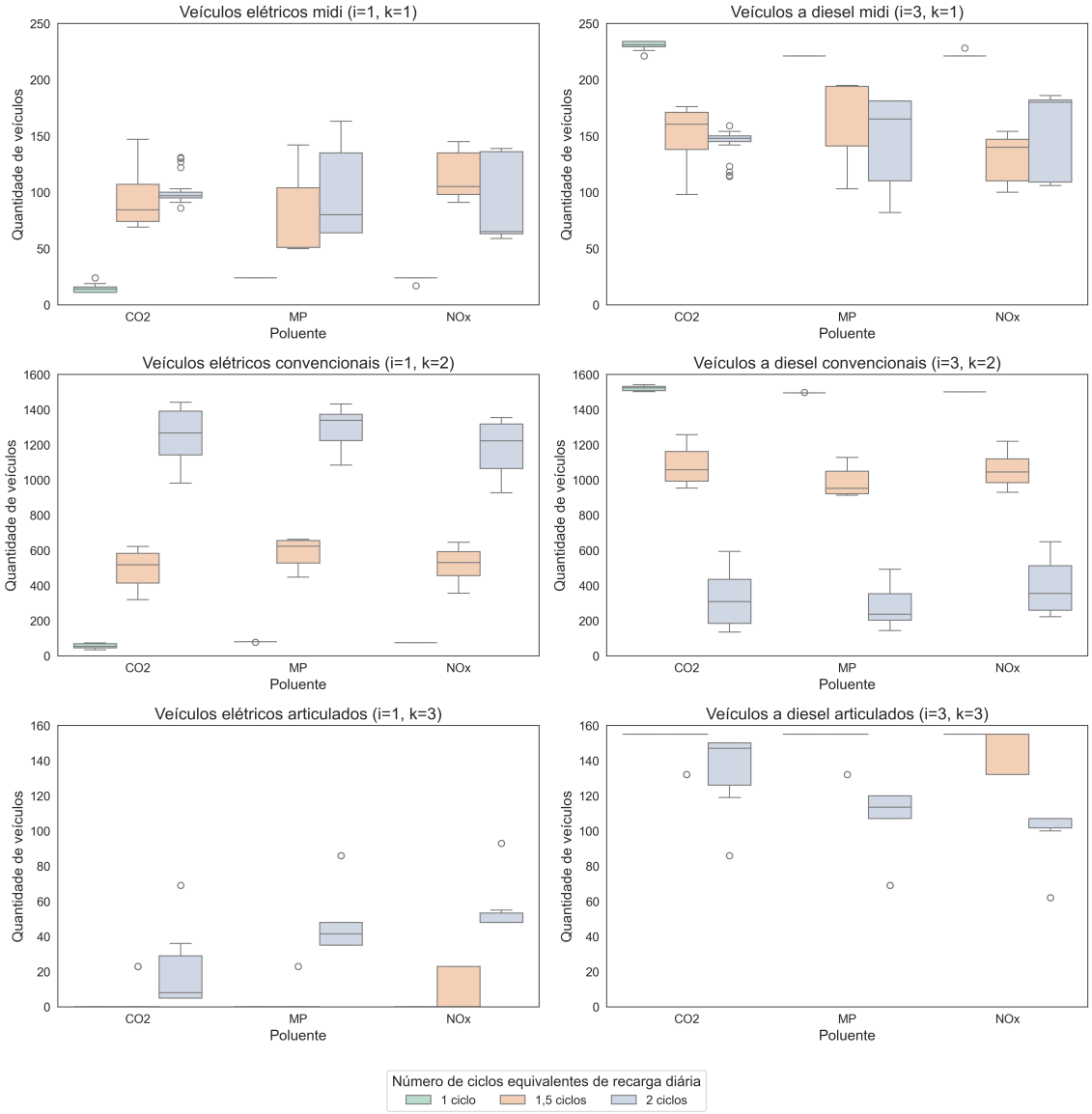


Fonte: Autora (2025).

O número de rotas eletrificadas influencia a composição da frota, cujo detalhamento é apresentado na Figura 46. Em geral, com $N_{ciclos\ eq.} = 1$, a grande maioria de veículos adquiridos para todas as categorias é a diesel. Para os demais valores de $N_{ciclos\ eq.}$, cada categoria de veículos apresenta um comportamento distinto. Para $k = 1$, em geral todos os modelos de poluentes apresentam um padrão de distribuição de veículos elétricos e a diesel no qual é possível que obter soluções com predominância de uma ou outra tecnologia. Para $k = 3$, a maioria dos veículos selecionados é a diesel, embora existam alguns *outliers* para $N_{ciclos\ eq.} = 2$ que destoem desse padrão. Finalmente, para $k = 2$ existe uma clara troca entre os padrões de $N_{ciclos\ eq.} = 1$, 1,5 e 2. À medida que o número de ciclos equivalentes aumenta, passa a ser inserido um maior percentual de veículos elétricos na frota, culminando com uma predominância desta tecnologia quando $N_{ciclos\ eq.} = 2$.

Por fim, a Figura 47 apresenta os padrões de consumo anual de diesel e energia de acordo com o número de ciclos equivalentes de recarga diária para cada modelo de poluente. Para $N_{ciclos\ eq.} = 1$ não há diferença expressiva no consumo de diesel em comparação com os cenários base e de continuidade, apesar de haver uma demanda em torno de 5GWh/ano de energia elétrica para todos os poluentes. Com $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$, há uma queda no consumo de diesel de cerca de 10,9 a 24,7%, a depender do poluente, que resulta por outro lado, no aumento da demanda de energia elétrica; para todos os poluentes, as soluções observadas resultam em consumos anuais de energia elétrica em torno de 30 a 60 GWh. Para $N_{ciclos\ eq.} = 2$, o consumo anual de diesel é reduzido de 39,1 a 57,8% para CO_2, de 43,3 a 58,8% para MP e de 37,2 a 56,4% para NO_x, em relação ao cenário

Figura 46 – Distribuição da frota por tecnologia e categoria para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada.

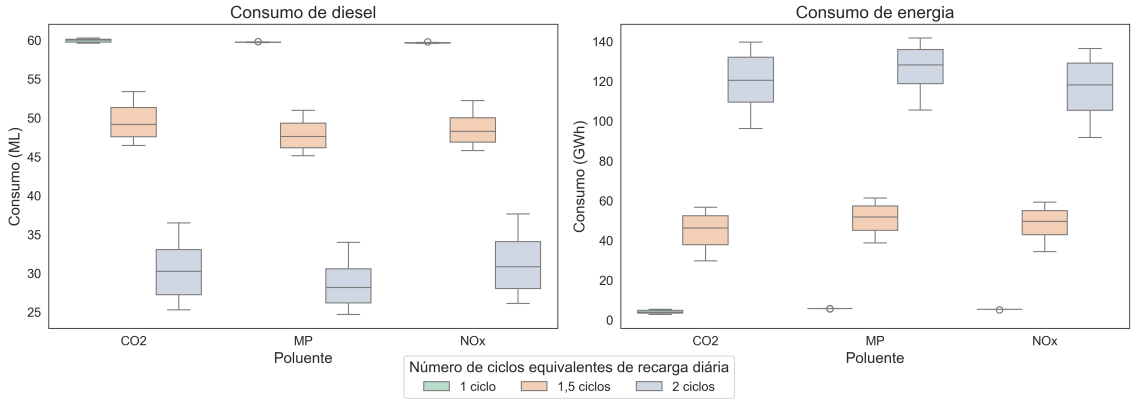


Fonte: Autora (2025).

base. A demanda anual de energia elétrica varia entre 96,2 e 139,6 GWh para CO_2, entre 105,4 e 141,6 GWh para MP e entre 91,6 e 136,3 GWh para NO_x e, em termos gerais, se assemelham ao cenário de eletrificação.

Uma síntese para esse cenário é de que em geral, se adotada apenas a estratégia de recarga noturna, as reduções de emissões não justificam os altos investimentos, em conclusões similares ao cenário de infraestrutura. A estratégia com $N_{ciclos\ eq.} = 1{,}5$ apresenta vantagens adicionais em relação ao caso anterior, mas ainda assim tem índices de emissões de CO_2 (considerando emissões de construção) superiores aos observados no cenário base, indicando, por exemplo, que as reduções de emissões provocadas pela eletrificação da frota e das melhorias das velocidades operacionais não são suficientes para mitigar os impactos das emissões de construção de vias exclusivas. Por outro lado, as reduções de percentuais

Figura 47 – Consumo anual de diesel para o cenário misto para cada modelo de poluente e cada estratégia de recarga adotada.



Fonte: Autora (2025).

das emissões dos outros poluentes em relação ao cenário de continuidade, tornam esse cenário pouco atrativo do ponto de vista econômico, pois há investimentos massivos com baixos potenciais de redução de emissões.

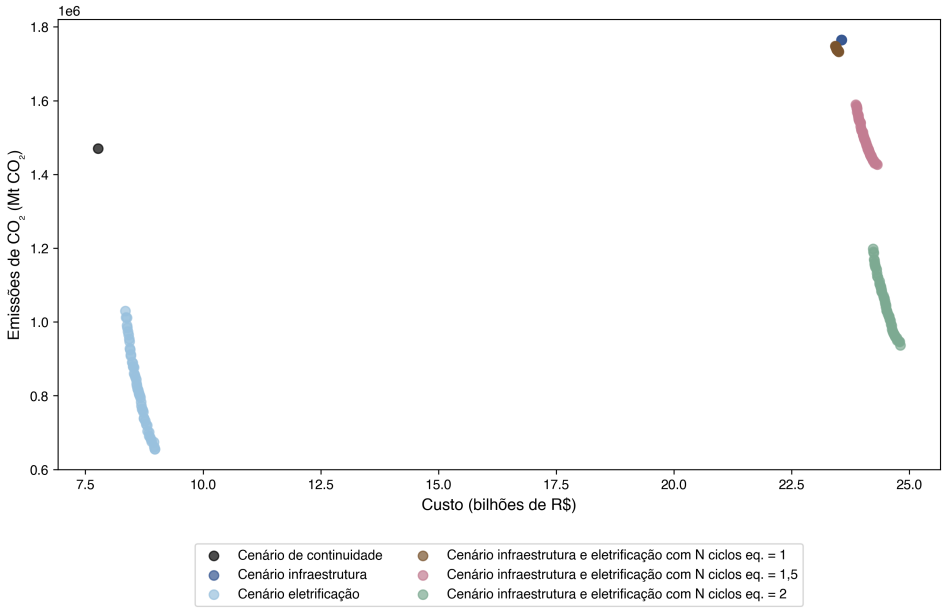
Por fim, a estratégia com $N_{ciclos\ eq.} = 2$ é a configuração que apresenta resultados tão bons quanto o cenário de eletrificação em termos de redução de emissões, porém mantendo os benefícios indiretos para passageiros que a implantação de infraestrutura pode trazer. Em termos gerais, as soluções com maiores índices de emissões apresentam valores similares ao cenário de continuidade, por exemplo, indicando que até mesmo as emissões de construção podem ser mitigadas através dessa configuração. É notadamente um cenário com custos elevados, mas que apresenta a combinação das melhorias de tecnologia e de priorização viária, capaz que apresentar soluções que buscam alterar estruturalmente os problemas atuais do transporte urbano de passageiros.

6.2.6 Síntese e comparação entre os cenários

Por fim, depois de detalhados todos os cenários analisados, esta seção apresenta graficamente a combinação dos cenários de continuidade, infraestrutura, eletrificação e a combinação de ambos analisando diferentes estratégias de recarga. A Figura 48 apresenta os resultados para CO_2, a Figura 49 os de MP e a Figura 50 os de NO_x. As figuras retratam que em geral, os cenários de infraestrutura e combinados com $N_{ciclos\ eq.} = 1$ apresentam custos elevados de implantação e também os valores mais elevados de emissões, para todos os poluentes, levando à decisão de que não são os mais indicados para adoção como política de reestruturação urbana e transição energética do sistema de transporte público de Belo Horizonte.

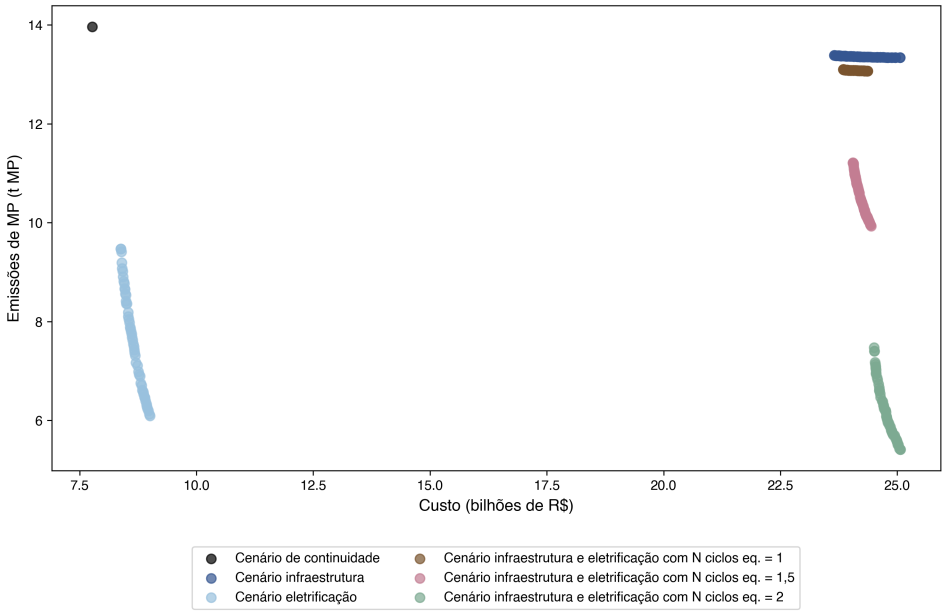
O cenário de eletrificação é o que apresenta os menores custos e, em geral, os menores índices de emissões entre os cenários de sustentabilidade, embora soluções do

Figura 48 – Relação entre custo e emissões de CO_2 no horizonte de projeto para todos os cenários.



Fonte: Autora (2025).

Figura 49 – Relação entre custo e emissões de MP no horizonte de projeto para todos os cenários.

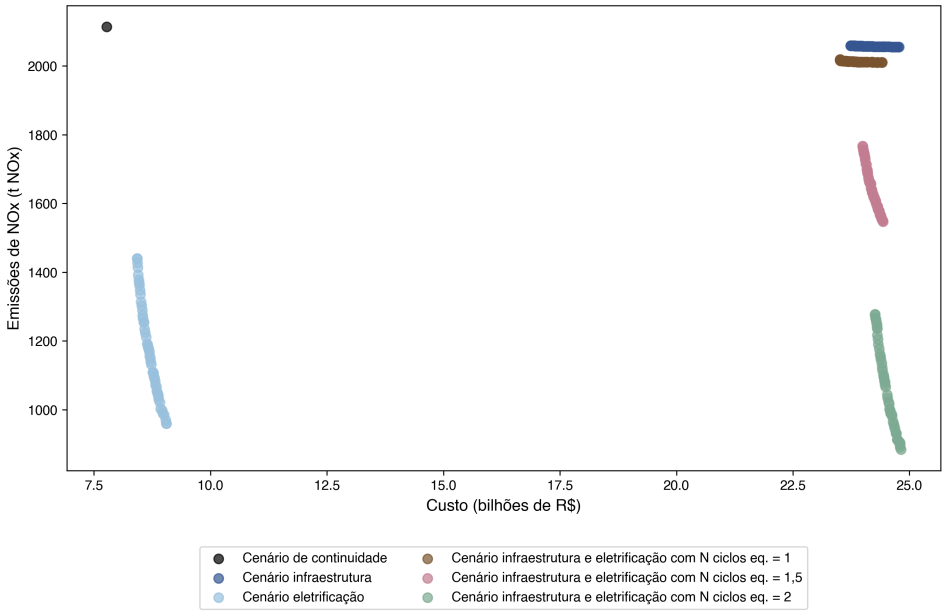


Fonte: Autora (2025).

cenário combinado com $N_{ciclos\ eq.} = 2$ possam apresentar índices de emissões similares. Entretanto, a aplicação exclusiva de medidas tecnológicas não é capaz de proporcionar mudanças mais radicais em termos de estruturação da rede viária, o que além de não apresentar benefícios para os passageiros também limita a atuação acerca de mudança de modo, por exemplo.

O cenário combinado de implantação de infraestrutura e eletrificação com $N_{ciclos\ eq.} =$ 1,5 apresenta, em geral, benefícios parciais em termos de redução de emissões, ao passo que

Figura 50 – Relação entre custo e emissões de NO_x no horizonte de projeto para todos os cenários.



Fonte: Autora (2025).

também é um cenário de altos custos devido à implantação de infraestrutura prioritária. O cenário combinado de implantação de infraestrutura e eletrificação com $N_{ciclos\ eq.} = 2$ é o que apresenta a melhor configuração para tomada de decisão. Apesar de ser um cenário com altos custos de implantação, várias soluções dele para CO_2 apresentam emissões alinhadas com o cenário de eletrificação e para os poluentes MP e NO_x, apresenta inclusive soluções com emissões menores. Salienta-se que esse resultado pode ter sido ocasionado pela não contabilização das emissões de construção para esses poluentes, devido à falta de dados primários para tal. Ou seja, é um cenário com altos investimentos, mas que é capaz de reduzir emissões e, ao mesmo tempo, redistribuir o espaço viário dando prioridade para o sistema de transporte público.

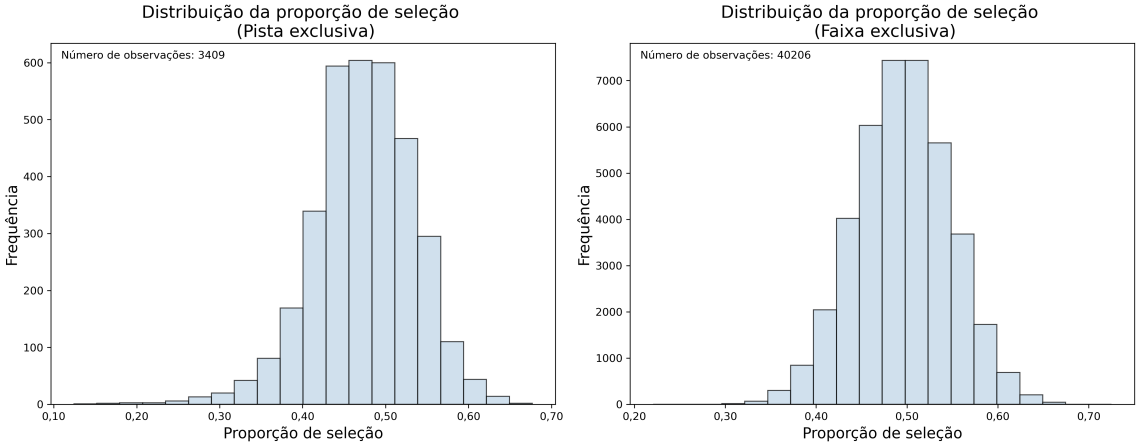
6.3 Mapas de proporção de seleção de vias prioritárias

Os resultados da proporção de seleção média de segmentos viários para implantação de esquemas de priorização para transporte público por ônibus são apresentados de acordo com a tipologia de infraestrutura, considerando os resultados obtidos nos testes de parâmetros para todos os modelos de poluentes. Ao todo, foram utilizadas 3.387 soluções para a elaboração do mapa, sendo 1.100 do modelo de CO_2, 1.155 do modelo de MP e 1.132 do modelo de NO_x.

A Figura 51 apresenta os histogramas de proporção de seleção de segmentos viários para as duas tipologias analisadas. Em ambos os casos, não existem segmentos com valores muito altos ou muito baixos de proporção de seleção, e as distribuições possuem médias

e medianas em torno de 50%. A seguir, os resultados serão apresentados espacialmente, mas em geral, é possível inferir que o modelo foi capaz de convergir para determinadas extensões, conforme apresentado na descrição dos cenários, apresentando uma ordem de grandeza da quantidade de infraestrutura prioritária necessária para que houvesse um impacto nas funções objetivo, mas o modelo em sua configuração atual não é capaz de diferenciar outros aspectos dos segmentos viários além de extensão e velocidade, tornando indiferente selecionar o segmento a ou b se eles tiverem o mesmo impacto no modelo.

Figura 51 – Distribuição da proporção seleção de segmentos viários para implantação de infraestrutura prioritária para transporte público por ônibus.



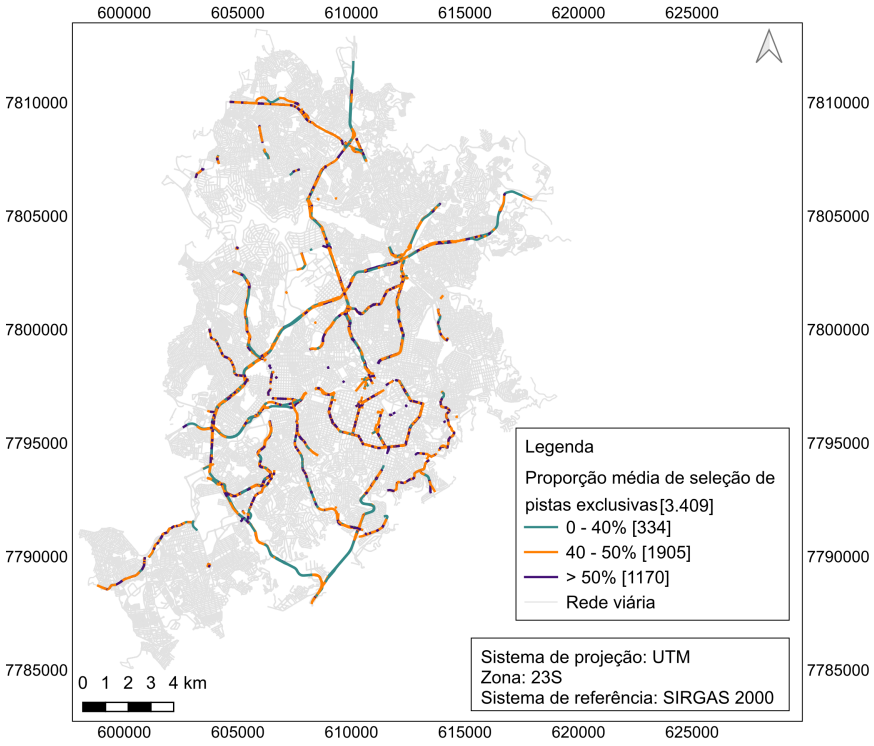
Fonte: Autora (2025).

A Figura 52 apresenta o mapa com a proporção para pistas exclusivas. Nela é possível observar que, embora numericamente haja uma distribuição uniforme da quantidade de segmentos para cada faixa de proporção (como apresentado na Figura 51), espacial e visualmente, há uma predominância de proporções menores, seja de 0 a 40% ou de 40 a 50%; segmentos com proporções maiores de seleção aparecem mais desconectados.

Por fim, a Figura 53 apresenta as proporções de seleção de segmentos viários para faixas exclusivas. O mapa demonstra que para essa tipologia há uma fragmentação significativa em termos de proporções de seleção, de modo que não é possível visualizar a formação de grandes trechos com uma única proporção. Dessa forma, tem-se que a formulação atual do problema não é capaz de diferenciar os segmentos em termos de localização para a implantação das vias exclusivas, tanto que em geral para a tipologia de faixas exclusivas, em praticamente toda a rede a proporção de seleção é dividida entre as duas proporções mais frequentes (40 a 50% e maior que 50%) e isso se configura como uma limitação da presente tese. Esse resultado leva à interpretação de que para a presente formulação, a extensão total de vias e consequente incremento geral de velocidades na rede é mais relevante do que a seleção de um grupo ou outro de segmentos. Além disso, em geral, segmentos localizados nas regiões periféricas tem proporções de seleção menores.

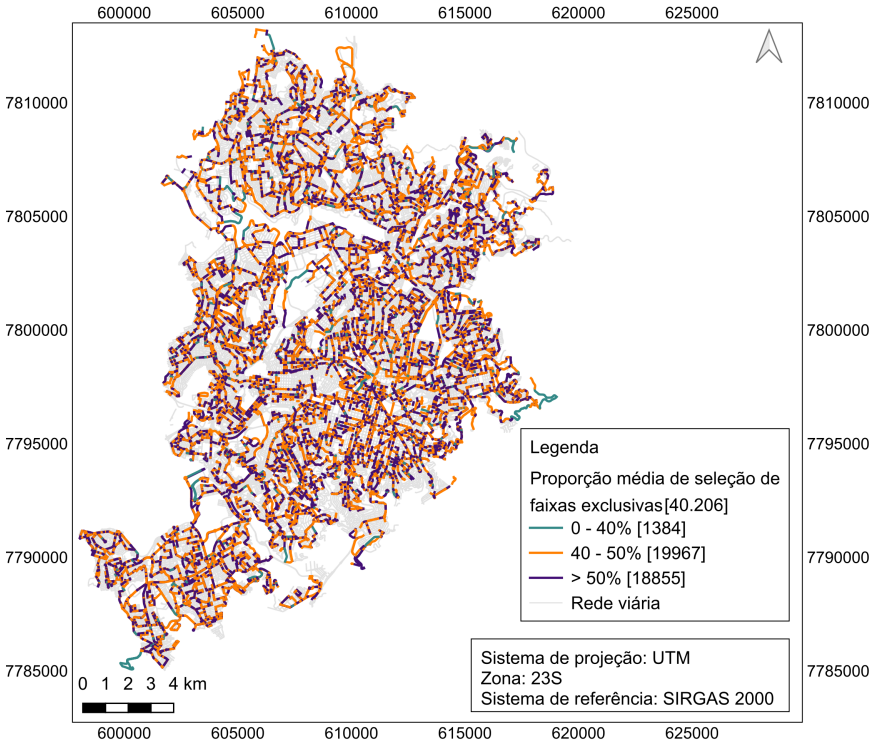
Portanto, a utilização de restrições de conectividade de rede em problemas que

Figura 52 – Proporção de seleção média de segmentos viários para implantação de pistas exclusivas para transporte público por ônibus.



Fonte: Autora (2025).

Figura 53 – Proporção de seleção média de segmentos viários para implantação de faixas exclusivas para transporte público por ônibus.



Fonte: Autora (2025).

incluem priorização viária permanece como uma lacuna de pesquisa para redes de grande porte. Estudos futuros podem modelar explicitamente os tempos de viagem de passageiros, permitindo uma maior precisão do processo de tomada de decisão. Ademais, podem ser incorporados outros indicadores além da velocidade, como o fluxo de tráfego nos segmentos ou a caracterização de inserção urbana de cada segmento. Uma direção de pesquisa possível é analisar a implementação de vias prioritárias associadas com eletrificação de frota em segmentos próximos a hospitais e demais equipamentos de saúde, incorporando outros benefícios ambientais e sociais como a redução da poluição sonora. Estratégias nesse sentido podem colaborar para delimitar melhor quais segmentos viários trazem os melhores benefícios, enquanto que o presente estudo foi capaz de apresentar a ordem de magnitude da quantidade de infraestrutura que precisa ter priorização viária para transporte público por ônibus.

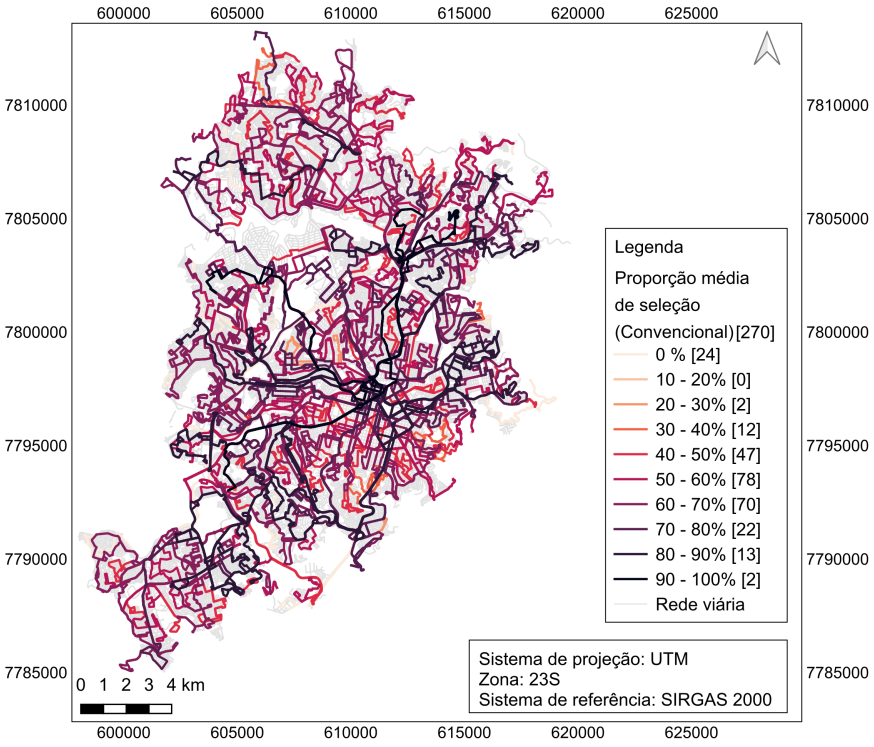
6.4 Mapas de proporção de seleção de rotas para eletrificação

Os resultados da proporção de seleção média de rotas para eletrificação do transporte público por ônibus são apresentados de acordo com o sistema de transporte, considerando os resultados obtidos nos testes de parâmetros para todos os modelos de poluentes. Ao todo, foram utilizadas 3.387 soluções para a elaboração do mapa, sendo 1.100 do modelo de CO_2, 1.155 do modelo de MP e 1.132 do modelo de NO_x. O detalhamento dos resultados para cada rota é apresentado no Apêndice B.

Os resultados mostram que 32 rotas não são selecionadas para eletrificação, essas rotas são as que não atendem à restrição de autonomia. Dessas, 24 são rotas do sistema convencional e 8 são rotas do sistema MOVE. Não foram encontrados valores significativos de correlação entre a extensão das rotas e a proporção de seleção nos modelos, indicando que apenas esse critério isoladamente não é suficiente para explicar quais rotas são selecionadas no modelo. O mesmo ocorreu quando analisada a extensão média diária percorrida pelos veículos de cada rota. Entretanto, quando analisados os sistemas de transporte (MOVE, convencional e suplementar), as rotas do sistema convencional tem uma maior proporção de seleção quando comparado com os demais sistemas. A proporção média de seleção para rotas que atendem a restrição de autonomia é de 0,58 para rotas do sistema convencional, 0,49 para o sistema MOVE e 0,41 para o sistema suplementar. Isso se relaciona com a composição de frota apresentada anteriormente. Quando utilizadas as configurações de $N_{ciclos\ eq.} = 2$ como estratégia de recarga, a categoria de veículos $k = 2$ era a que apresentava maior inserção de veículos elétricos e são esses os veículos utilizados no sistema convencional.

A Figura 54 apresenta o mapa com a proporção para o sistema convencional. Esse é o maior sistema da cidade, contendo 270 rotas. Dessas, 185 tem uma proporção de seleção maior do que 50%, indicando uma boa aptidão para eletrificação, sendo que duas rotas (3503A e 1502) são selecionadas em mais de 90% das soluções, representando as rotas com maior aptidão para eletrificação. Das 39 rotas com mais de 70% de proporção de seleção, uma é do sistema MOVE, uma do suplementar e as outras 37 são do sistema convencional. Dessas 37, duas tem extensão maior que 50 km, 12 tem mais de 40 km e 12 tem mais de 30 km, indicando que uma vez respeitada a restrição de autonomia, o modelo tende a selecionar rotas do sistema convencional com extensões elevadas com maior frequência.

Figura 54 – Proporção de seleção média de rotas do sistema convencional.

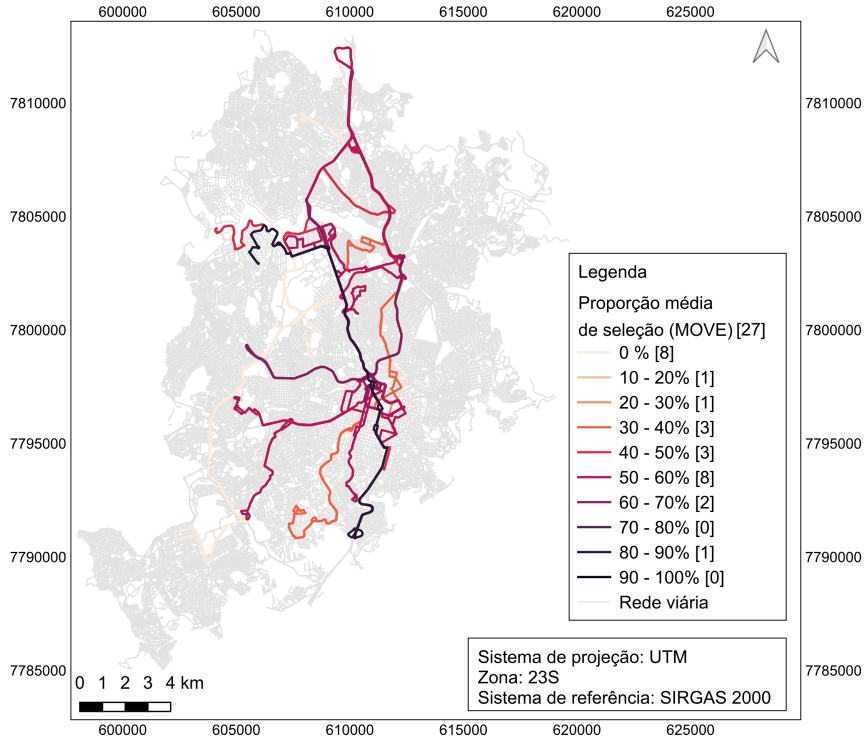


Fonte: Autora (2025).

O sistema MOVE é o sistema BRT de Belo Horizonte e o mapa de proporção de seleção de cada rota desse sistema é apresentado na Figura 55. Para o MOVE, a maioria das rotas tem uma proporção de seleção menor do que 50%, sendo que 8 das 27 rotas não atendem à restrição de autonomia e não podem ser eletrificadas. Os resultados mostram que para a eletrificação desse sistema, é necessária uma análise mais cuidadosa, já que apenas uma linha (5106) apresenta uma proporção de seleção acima de 80%, sendo recomendada sua eletrificação.

Por fim, a Figura 56 apresenta o mapa de proporção de seleção para o sistema suplementar. Esse sistema é o que possui as menores proporções de seleção, sendo que apenas uma rota (S10) possui um percentual de seleção maior do que 70%, podendo ser

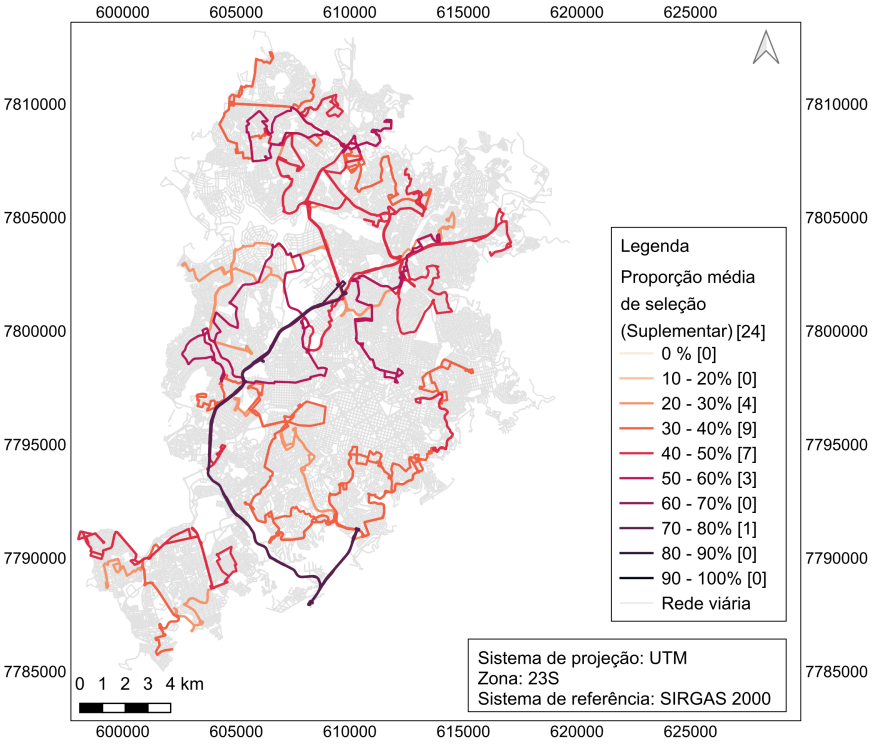
Figura 55 – Proporção de seleção média de rotas do sistema MOVE.



Fonte: Autora (2025).

recomendada sua eletrificação. Para as demais, assim como para o sistema MOVE, é necessária uma análise mais cautelosa para o processo de tomada de decisão.

Figura 56 – Proporção de seleção média de rotas do sistema suplementar.



Fonte: Autora (2025).

Naturalmente, a cada solução o modelo seleciona um conjunto de rotas para ser eletrificado, de modo que não necessariamente todas as rotas com altos índices de seleção estão presentes em todas as soluções, mas as taxas de proporção servem para dar um indicativo de quanto cada rota contribui para as funções objetivo do problema formulado. Por fim, salienta-se que apesar da premissa de implantação rápida do projeto, os resultados do modelo também podem ser utilizados em um processo de tomada de decisão para implementação escalonada. No caso de projetos de eletrificação, a recomendação a partir dos resultados obtidos é de iniciar a eletrificação a partir das rotas com os maiores percentuais de seleção.

6.5 Síntese do capítulo

Como síntese do capítulo, é possível afirmar que as estratégias de sustentabilidade propostas nesta tese são capazes de melhorar a qualidade dos sistemas de transporte público, diminuindo as emissões de CO_2, MP e NO_x. Os resultados dos testes de parâmetros mostram que o NSGA-II é capaz de produzir soluções adequadas para o problema e que no caso do modelo proposto é melhor manter uma maior diversidade inicial das soluções utilizando populações maiores do que apenas aumentar o número de gerações utilizando populações menores.

Em relação aos cenários apresentados, o cenário de continuidade representa em último grau a continuidade da deterioração dos sistemas de transporte público, mesmo apresentando melhorias nas emissões locais, as emissões de CO_2 aumentam no sistema a partir da substituição de veículos EURO V (P7) por veículos EURO VI (P8). Ao mesmo tempo, os cenários com medidas isoladas – seja implantação apenas de infraestrutura, seja apenas de eletrificação – produzem benefícios restritos ou até mesmo no caso do cenário de infraestrutura, um fardo adicional de emissões que não podem ser mitigadas sem eletrificação da frota. Desse modo, conclui-se que a aplicação de medidas combinadas, com um esforço para eletrificação do maior percentual possível de rotas, oferece uma gama maior de benefícios pois isso reduz as emissões ao mesmo tempo que reestruturam a divisão do espaço viário. Ainda assim, é importante notar que a priorização viária traz benefícios para os passageiros, mas também tem impactos ambientais significativos. De forma alguma, entretanto, esses impactos devem ser utilizados como argumento para a não implantação dessa medida, uma vez que a produção de espaço viário – seja para ônibus, seja para transporte motorizado individual – apresenta esses impactos, entretanto a priorização de transporte público apresenta benefícios sociais que a produção de vias para transporte motorizado individual não é capaz de apresentar.

Também foram apresentados os mapas com as proporções de seleção de segmentos

viários para infraestrutura prioritária de ônibus e de rotas para eletrificação. Os resultados para a rede viária são mais dispersos, não sendo possível determinar localizações preferenciais de implantação, apesar de que nas análises de cenários foi possível estabelecer a ordem de grandeza da infraestrutura prioritária necessária. Com isso, conclui-se que a restrição de continuidade de implantação de infraestrutura prioritária em segmentos viários precisa ser abordada em estudos futuros, principalmente para implementação em redes de grande porte, permanecendo uma lacuna de pesquisa. Já para as rotas, foi possível elencar mais claramente rotas com maior aptidão para eletrificação, sendo que em geral o sistema convencional de Belo Horizonte apresenta rotas mais favoráveis à eletrificação.

Por fim, de maneira tangencial ao que foi discutido até agora, aponta-se que talvez seja necessário reavaliar a estrutura do sistema de transporte por ônibus na cidade de Belo Horizonte, verificando se outras configurações de trajetos são mais aptas à eletrificação das rotas, especialmente em termos de extensões percorridas. Conforme apontado por Arbex (2020), rotas muito extensas tendem a ter uma menor confiabilidade de cumprimento das tabelas horárias, em virtude de interferências de tráfego, do elevado número de paradas e da presença de cruzamentos semaforizados sem prioridade para o transporte público ao longo da rota. Essa variabilidade dos tempos de viagem pode prejudicar também os cronogramas de recarga de oportunidade. Além disso, por mais que seja possível eletrificar a maioria das rotas na configuração atual do sistema, isso requer um grande esforço de planejamento operacional das recargas, em especial as de oportunidade. Disso decorre também que, para além de reestruturar o sistema de ônibus, talvez seja necessário expandir os sistemas sobre trilhos na cidade, já que a configuração urbana exige que deslocamentos tão extensos sejam realizados.

Capítulo 7

Conclusões

O contexto de emergência climática no qual o mundo todo está inserido demanda a articulação de estudos e políticas para delimitar planos de ações capazes de mitigar os efeitos do aquecimento global e das emissões excessivas de GEE. Dentro deste contexto, as cidades desempenham um papel central como espaço de articulação, tanto no sentido de promoverem ações de mitigação quanto no de serem os espaços que sofrerão os maiores impactos das mudanças climáticas.

Ao longo do século XX, o desenvolvimento urbano e os estudos de engenharia de tráfego foram orientados para uma maior circulação de veículos individuais, em detrimento da circulação de transporte público e modos ativos. Já no final do século passado, surge o paradigma da sustentabilidade e, a partir dele, o da mobilidade sustentável. No meio científico, começaram a emergir pesquisas que culminaram no consenso de que o planejamento urbano e o de transportes devem estar interligados e, a partir deste paradigma, deveria haver uma inversão da prioridade dos modos de transporte, com um maior uso de transporte público, bicicletas e caminhada e uma diminuição de carros e motocicletas. Contribuíram para este consenso, os altos índices de congestionamento, os acidentes de trânsito e mais recentemente, os altos índices de poluição atmosférica e sonora, além de toda uma discussão relacionada ao direito à cidade, uma vez que a não propriedade de veículos privados pode resultar em exclusão social. No contexto brasileiro, este paradigma emerge na legislação nacional a partir da criação da PNMU em 2012.

É necessário planejar e construir a cidade do século XXI, na qual a prioridade viária de modos sustentáveis seja premissa básica, assim como o direcionamento de inovações tecnológicas a estes modos. Nesta tese, esse planejamento foi abordado através do problema do projeto de rede de transporte urbano (PRTPU / UTNDP), que é um problema que engloba dois subproblemas clássicos: o projeto de rede de transporte e o problema de projeto e programação da rede de transporte público. Estão incluídos no PRTPU todos os processos de tomada de decisão no planejamento de transportes, o que inclui planejamento

estratégico, decisões táticas e operacionais. Diferentes subproblemas nessa área vem sendo investigados desde a década de 1960, mas a área tem recebido mais atenção nos últimos 20 anos, principalmente de pesquisadores relacionados a engenharia, planejamento de transportes e computação. Ainda mais recentes são as pesquisas utilizando variáveis ambientais e inserção de combustíveis alternativos nas frotas de transporte público urbano, em especial a energia elétrica.

Foram identificadas como lacunas de pesquisa a troca existente entre complexidade matemática – e consequentemente computacional – e complexidade na aplicação em estudos de caso, refletidas nos tamanhos das redes de estudo, isto é, modelos matemáticos mais complexos geralmente são aplicados em redes menores e mais simples, enquanto que em redes maiores, tendem a ser aplicados modelos matemáticos menos complexos. Essa lacuna é mais evidente nos estudos que envolvem variáveis ambientais ou algum tipo de inserção tecnológica nos sistemas, como por exemplo, a implementação de ônibus elétricos. Uma das premissas adotadas na tese é que a persistência dessa lacuna se deve à complexidade computacional para solucionar tais problemas, mas também à ausência de dados de entrada que permitam a complexificação dos problemas. A partir disso, foi adicionada uma abordagem de investigação qualitativa acerca do contexto de maturidade de iniciativas de dados abertos no Brasil, no intuito de maximizar a reprodução do modelo. Outra lacuna identificada, desta vez no contexto nacional, foi a ausência de uma metodologia consolidada de planejamento no nível da rede de transporte, tanto para definição de vias prioritárias para transporte público quanto para definição de rotas de ônibus a serem eletrificadas. Além disso, as metodologias comumente encontradas tendem a focar nos aspectos econômicos da implementação de tais projetos, utilizando a perspectiva ambiental apenas de maneira retórica.

Para preencher as lacunas encontradas na literatura, aplicou-se uma abordagem de modelagem que considera as perspectivas de passageiros, operadores e da comunidade geral dentro do processo de planejamento de sistemas de transporte, ao mesmo tempo que abordava também aspectos de sustentabilidade ambiental, econômica e social. Foi elaborado um modelo matemático multiobjetivo de otimização para o problema PRTPU / UTNDP, cujas variáveis de decisão eram a implantação de vias exclusivas para transporte público e a eletrificação das frotas de ônibus. As funções objetivo buscavam minimizar os custos de construção, aquisição, manutenção e operação e as emissões de construção e operação de um sistema de transporte público por ônibus. Para a formulação do modelo de emissões, foi utilizado o modelo da Agência Europeia do Ambiente, que leva em consideração a tecnologia e categoria dos veículos e a velocidade na qual eles operam. Na presente tese, a velocidade foi o parâmetro de ligação entre as duas variáveis de decisão do modelo. Foram consideradas emissões de CO_2, em uma perspectiva mais global de combate às emissões de GEE e de soluções que visam diminuir os impactos de aquecimento global e mudanças

climáticas e de MP e NO_{x}, considerando impactos ambientais e sociais de poluição em um contexto local. O problema foi solucionado através do NSGA-II. O modelo buscou superar a lacuna de complexidade matemática em relação à complexidade de aplicação, formulando um problema tão complexo quanto a disponibilidade de dados abertos no cenário brasileiro permitiu e aplicando esse modelo em uma rede com 63.602 segmentos viários e 321 rotas de ônibus.

Para a definição do estudo de caso para aplicação do modelo, foram consideradas como cidades candidatas todas as capitais estaduais brasileiras. Nesta etapa preliminar, foram feitos levantamentos de dados dos respectivos sistemas de transporte público disponibilizados de modo público e aberto. A partir desses levantamentos, foi possível apresentar uma análise qualitativa acerca da disponibilidade de dados abertos no Brasil, com foco em dados de transporte, inclusive com apontamentos de qual o grau de maturidade das iniciativas de transparência governamental, quais princípios de dados abertos são atendidos, quais dados são disponibilizados e quais precisam ser produzidos e/ou publicizados para um melhor planejamento de sistemas de transporte em um contexto de emergência climática. A investigação de quais dados estão disponíveis também tinha como objetivo elaborar um modelo que pudesse ser aplicado em diversas cidades, ampliando seu impacto. A cidade de Belo Horizonte - MG foi selecionada para estudo de caso, mas apontou-se que Curitiba, Rio de Janeiro e São Paulo também possuem os dados necessários para aplicação do modelo. Nesses levantamentos também foi possível verificar o grau de maturidade das medidas de transporte sustentáveis propostas nessa tese. Em geral, políticas de priorização viária estão mais consolidadas no Brasil, enquanto que as políticas de eletrificação de frotas são bem recentes, com um impulso mais significativo desde 2023 com o programa Refrota do Novo PAC.

Para apresentação dos resultados, foram feitos testes para definição dos parâmetros do NSGA-II, da qual foi possível concluir que para o problema proposto as melhores configurações do algoritmo são as que tem uma diversidade inicial maior, ou seja, as configurações que possuem população com maior número de indivíduos dominam as soluções com populações menores, mesmo que as últimas tenham um maior número de gerações. Ainda assim, a utilização de gerações maiores tende a produzir resultados mais refinados, independente da decisão acerca do tamanho da população. Esses resultados estão de acordo com a literatura da área.

Em seguida, para verificação dos benefícios que as estratégias de transporte sustentável podem produzir, foram investigados cenários onde nenhuma medida era implementada, apenas uma das medidas era implementada isoladamente e onde ambas as medidas eram aplicadas conjuntamente, também incluindo nesse último a investigação acerca de diferentes estratégias de recarga dos ônibus elétricos. Os resultados obtidos apontam que o cenário no qual as medidas são aplicadas conjuntamente, com utilização de recarga

noturna e de oportunidade durante o dia, é o que apresenta os custos mais elevados, mas é também o que traz os maiores benefícios, tratando da reestruturação viária e da redução das emissões via eletrificação simultaneamente, produzindo benefícios ambientais e sociais para passageiros e para a comunidade em geral.

Esta tese buscou lançar luz ao tamanho do esforço necessário para realmente realizar a transição energética nos sistemas de transporte público urbano, bem como a reestruturação da infraestrutura viária com priorização para os sistemas de transporte público, apresentando uma metodologia capaz de analisar redes complexas sob diferentes perspectivas e aspectos de sustentabilidade. O contexto de emergência climática cada vez mais preocupante impõe uma urgência de ação por muitas vezes negligenciada e esta tese é um pequeno grão de areia, mas é um grão de areia que busca fazer florescer a esperança de que é possível construir a cidade que o século XXI demanda.

7.1 Limitações do estudo e trabalhos futuros

Apesar dos esforços envidados nesta tese, persistem diversas limitações tanto do processamento de dados de entrada quanto da modelagem. Além disso, são apresentadas também possibilidades de expansão de estudos correlatos a esta tese.

Em relação aos dados de entrada, são necessários dados primários mais precisos para emissões de construção, inclusive com dados para outros poluentes além de CO_2 ou $CO_{2\ eq.}$. Esse é um dado bastante sensível no modelo e para sua aplicação foi feita uma adaptação de fator de emissão de um estudo de rodovias localizado na literatura nacional. Não foram localizados estudos para vias urbanas, mas mesmo em um contexto de literatura internacional, estudos de emissões de construção de pavimentos são bastante recentes.

Outro dado fundamental para a aplicação de um modelo de emissões mais complexo como o da EEA é a velocidade nos segmentos viários, dado esse que é bastante difícil de ser encontrado de maneira pública em portais de dados abertos ou mesmo obtido a partir de outros dados existentes. Entretanto, o nível tecnológico atual permite que essa informação seja derivada a partir de dados de GPS, mas isso requer que esses dados sejam públicos. Em relação às limitações desse parâmetro na tese, ressalta-se que o intervalo de tempo cujas informações de velocidade foram coletadas e processadas pode não ser representativo e/ou conter imprecisões. De toda forma, os dados obtidos são condizentes com perfis de velocidades urbanas, mas para estudos futuros recomenda-se que sejam coletados e processados intervalos mais longos e que sejam analisados diferentes métodos de imputação de dados faltantes, de modo a desenvolver uma metodologia consolidada para aferição desse parâmetro.

Ainda relacionado aos dados de entrada, outra limitação – dessa vez em termos de

processamento – foi a criação do conjunto de segmentos que pertencem à cada rota. Devido ao grau de precisão necessário para a tese, o ajuste foi realizado manualmente para todas as rotas do estudo de caso. Uma ferramenta que realiza essa tarefa é disponibilizada no software proprietário ArcGIS. Porém, em termos de pacotes ou ferramentas abertas foram localizadas apenas iniciativas em estágios embrionários de desenvolvimento, sendo uma direção de pesquisa futura. Essa segmentação também pode ser utilizada para tratamento de dados de transporte público em redes multimodais, especialmente em estudos que envolvam mudanças de infraestrutura e analisem consequências derivadas disso.

Em relação às limitações do modelo, ao desconsiderar *interlinning*, o modelo pode gerar imprecisões acerca de custos e emissões. Uma solução para isso, é o tratamento de rotas através de grupos ou blocos de rotas, e utilizar esse nível de decisão no modelo, ou seja, a variável de decisão passa a ser por grupo e não mais para cada rota individualmente. Entretanto, ao tentar preparar os dados dessa maneira para Belo Horizonte o encadeamento de rotas foi tal que foram formados apenas quatro grupos. Esse é um outro indicativo de que a operação do sistema de transporte público da cidade não é racionalizado, mas para outros estudos de caso, essa solução pode funcionar, restando apenas a complexidade de implementação computacional de tal formulação. Outra forma de tratar isso é modificar a formulação do problema para tratar também do problema de atribuição de veículos. Essa solução implica em um aumento da complexidade computacional do modelo conforme o tamanho da frota, pois além de todo o processamento já existente, precisariam ser criadas novas restrições para gerenciar a alocação dos veículos no tempo e as sequências de viagens realizadas.

A limitação da não inserção de uma restrição de conectividade da rede de priorização viária foi discutida anteriormente, mas em geral aponta-se que nem mesmo na literatura foram encontrados estudos que lidam com essa restrição para redes de porte considerável. A implementação computacional dessa restrição não é trivial e permanece como uma lacuna de pesquisa para redes de grande porte.

Para uma melhor análise em relação à autonomia das baterias dos ônibus elétricos, uma expansão possível dos estudos é desenvolver modelos para programação das recargas e modelar os ciclos de decaimento das baterias de acordo com as estratégias de recarga adotadas. Também é possível realizar análises de sensibilidade do modelo de acordo com diferentes tamanhos de baterias para cada categoria de veículos.

Para a parte de emissões do modelo, apesar de algumas limitações, as decisões em relação à parametrização foram realizadas a partir de outros estudos e aplicações em casos de estudo no Brasil e na literatura internacional. Em estudos futuros, é possível incluir outras parcelas de emissões além de emissões de escapamento, como emissões do ciclo a frio, emissões do ciclo de produção de combustível e emissões de fabricação dos veículos. Também é possível averiguar – para além de estudos de otimização – a adaptação do modelo

da EEA para o contexto brasileiro, onde geralmente há uso elevado de ar-condicionado. Com isso, seria possível tornar mais complexos os modelos mais utilizados atualmente no contexto nacional. Além disso, os efeitos da declividade foram desconsiderados no modelo e podem ser melhor explorados no futuro. O mesmo se aplica às parcelas referentes a custos. Em ambos os casos, poderiam ser aplicadas análises do ciclo de vida das infraestruturas e tecnologias implementadas.

Ao modelar o problema nesta tese, os interesses de passageiros foram incluídos apenas de maneira indireta, através do entendimento de que a implantação de vias exclusivas para o transporte público vai melhorar os tempos de viagem dentro dos veículos e a confiabilidade do sistema de modo geral. Entretanto, em estudos futuros, essa modelagem pode ser realizada de maneira direta. Nos estudos encontrados na literatura, modelos similares são formulados em níveis, sendo que a decisão acerca da implementação de infraestrutura prioritária ocorre no nível inferior com a otimização dos tempos de viagem na rede e geralmente são formulados modelos de escolha de modo e de alocação de viagens. Os resultados são então transferidos para o nível superior, onde são otimizadas funções similares às propostas nesta tese. Essa nova abordagem de modelagem também poderia incluir outros modos de transporte, com a modelagem explícita de variáveis de decisão relacionadas à implantação de ciclovias na rede.

Outra possibilidade de contribuição em estudos futuros diz respeito à integração do planejamento de transporte e energia, por exemplo sobre o impacto que os sistemas de transporte eletrificados terão sobre as redes de energia e se é tecnicamente viável implantar esses projetos do ponto de vista energético. Em geral, na literatura internacional já existem estudos de otimização para implantação de estações de recarga e de sistemas de abastecimento, mas a literatura nacional ainda é escassa. Os impactos das mudanças climáticas, como cenários possíveis de crise hídrica no Brasil, podem ser incorporadas nas análises de planejamento energético. De forma análoga, diferentes cenários para produção energética podem ser incorporados no modelo a partir de análises de sensibilidade de parâmetros como preço do óleo diesel e de energia. Apenas índices de inflação como os aplicados nesta tese podem não ser capazes de prever, por exemplo, variações significativas no preço internacional do petróleo ou na energia em caso de eventos extremos de baixas precipitações e podem ser formulados cenários específicos para analisar o comportamento do modelo nessas circunstancias. Por fim, existem oportunidades de pesquisa na investigação de outras metaheurísticas para solução do problema proposto.

Trabalhos publicados pela autora durante o doutorado

Trabalhos publicados em periódicos nacionais e internacionais:

1) BORCHERS, T.; WITTOWSKY, D.; FERNANDES, R. A. S. A Comprehensive Survey and Future Directions on Optimising Sustainable Urban Mobility. IEEE Access, [s. l.], p. 63023-63048, 2024.
2) FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; BORCHERS, T.; RIBEIRO, R. A.; FERNANDES, R. A. S. Citizens' perception analysis of public transport and smart technologies in the Brazilian capitals during the SARS-CoV-2 pandemic. Acta Scientiarum. Technology, [s. l.], v. 45, p. e61329, 2023.
3) BORCHERS, T.; RIBEIRO, R. A.. A framework for selecting bus priority system locations in medium-sized cities: Case study in Araraquara, Brazil. Case Studies on Transport Policy, [s. l.], v. 10, n. 4, p. 2053–2063, 2022. (artigo resultante da dissertação de mestrado da autora)
4) BORCHERS, T.; FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G. Neoliberalism and the emptying of the State in public transportation in Araraquara, state of São Paulo, Brazil. Cadernos Metrópole, [s. l.], v. 24, n. 54, p. 28, 2022.
5) BORCHERS, T.; FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; FERNANDES, R. A. S. Smart mobility and sustainability: a bibliometric analysis. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, [s. l.], v. 10, n. 80, 2022.
6) FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; BORCHERS, T.; FERNANDES, R. A. S. Smart Cities: The Loss of the "Aura" and Post-Panoptics in the Age of Digital Control. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, [s. l.], v. 10, n. 80, 2022.
7) BORCHERS, T.; FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; FERNANDES, R. A. S. Fragments of green infrastructure: the case of the Tijuco Preto stream in São Carlos, São Paulo, Brazil. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, [s. l.], v. 10, n. 76, 2022.
8) FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; BORCHERS, T.; FERNANDES, R. A. S. Ecological Urbanism: metabolic rift and phantasmagoria. Revista Nacional de Gerenciamento de Cidades, [s. l.], v. 10, n. 77, 2022.
9) FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; BORCHERS, T.; FERNANDES, R. A. S. Sustainable and Smart Cities: Nodes of confluence and research tendencies. Revista Nacional de

Gerenciamento de Cidades, [s. l.], v. 9, n. 74, 2021.

10) BORCHERS, T.; FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; FERNANDES, R. A. S. Proposals for the redevelopment of deactivated landfill areas. Periódico Eletrônico Fórum Ambiental da Alta Paulista, [s. l.], v. 17, n. 3, 2021.

Trabalhos publicados em anais de eventos:

1) BORCHERS, T.; FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; FERNANDES, R. A. S. Fragmentos de infraestrutura verde: o caso do córrego Tijuco Preto. In: II Simpósio Brasileiro de Cidade, Paisagem e a Natureza, 2021. Anais do Simpósio Brasileiro de Cidade, Paisagem e a Natureza. Tupã-SP: ANAP, 2021. v. 2a ed.. p. 230-242.
2) FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; BORCHERS, T.; FERNANDES, R. A. S. Urbanismo ecológico: ruptura metabólica e fantasmagoria. In: II Simpósio Brasileiro de Cidade, Paisagem e a Natureza, 2021. Anais do Simpósio Brasileiro de Cidade, Paisagem e a Natureza. Tupã-SP: ANAP, 2021. v. 2a ed.. p. 291-299.
3) BORCHERS, T.; FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; FERNANDES, R. A. S. Análise multicritério para a definição de áreas prioritárias à implantação de ciclovias em Araraquara-SP. In: 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes da ANPET, 2021. Anais do 35º Congresso de Pesquisa e Ensino em Transportes, 2021. v. 1a ed.. p. 1922-1933.
4) BORCHERS, T.; FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; FERNANDES, R. A. S. Privacy concerns on the mobility of smart cities. In: Brazilian Technology Symposium 2021, 2021, Campinas. Proceedings BTSym'21. Campinas - SP: LCV ? Laboratory of Visual Communications, 2021. v. 1. p. 1-5.
5) BORCHERS, T.; FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; FERNANDES, R. A. S. Propostas de redesenvolvimento de áreas de aterros sanitários desativados. In: XVII Fórum Ambiental Alta Paulista, 2021. Anais do Fórum Ambiental Alta Paulista. Tupã-SP: ANAP, 2021. v. 17a ed. p. 738-749.
6) FIGUEIRÔA-FERREIRA, V. G.; BORCHERS, T.; FERNANDES, R. A. S. Cidades sustentáveis e cidades inteligentes: pontos de confluência e tendências de pesquisa. In: XVII Fórum Ambiental Alta Paulista, 2021. Anais do Fórum Ambiental Alta Paulista. Tupã-SP: ANAP, 2021. v. 17a ed. p. 750-761.

Apresentação em eventos sem publicação de anais:

1) BORCHERS, T.; WITTOWSKY, D.; FERNANDES, R. A. S. Open data platforms for smart mobility planning: the case of Brazilian Capitals. In: MOBIL.TUM 2024 – THE FUTURE OF MOBILITY AND URBAN SPACE, 2024, Munique, Alemanha. Munique, Alemanha: [s. n.], 2024.
2) BORCHERS, T.; WITTOWSKY, D.; FERNANDES, R. A. S. Optimising urban mobility systems: an intersection of smart cities and sustainability (Poster session). In: MOBILE TARTU 2024 PHD SCHOOL AND CONFERENCE, 2024, Tartu, Estonia. Tartu, Estonia: [s. n.], 2024.

Referências

ABDELWAHED, A. et al. Evaluating and Optimizing Opportunity Fast-Charging Schedules in Transit Battery Electric Bus Networks. **Transportation Science**, v. 54, n. 6, p. 1601–1615, nov. 2020. ISSN 0041-1655, 1526-5447.

AGATZ, N.; HEWITT, M.; THOMAS, B. W. "Make no little plans": Impactful research to solve the next generation of transportation problems. **Networks. An International Journal**, v. 77, n. 2, p. 269–286, mar. 2021. ISSN 0028-3045, 1097-0037.

AGUIAR, T. F. R. de. Vastos subúrbios da nova capital: formação do espaço urbano na primeira periferia de Belo Horizonte. Universidade Federal de Minas Gerais, ago. 2006.

Al-Hussaeni, K. et al. SafePath: Differentially-private publishing of passenger trajectories in transportation systems. **Computer Networks**, Elsevier BV, v. 143, p. 126–139, out. 2018. ISSN 1389-1286.

ALESSIO, H. M. et al. Climate change, air pollution, and physical inactivity: Is active transportation part of the solution? **Medicine & Science in Sports & Exercise**, v. 53, n. 6, p. 1170–1178, jun. 2021. ISSN 1530-0315, 0195-9131.

ALMASI, M. H. et al. Urban transit network optimization under variable demand with single and multi-objective approaches using metaheuristics: The case of Daejeon, Korea. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 15, n. 5, p. 386–406, mar. 2021. ISSN 1556-8318, 1556-8334.

AMINZADEGAN, S. et al. Factors affecting the emission of pollutants in different types of transportation: A literature review. **Energy Reports**, v. 8, p. 2508–2529, nov. 2022. ISSN 23524847.

AMIRGHOLY, M.; SHAHABI, M.; GAO, H. O. Optimal design of sustainable transit systems in congested urban networks: A macroscopic approach. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, Elsevier, v. 103, p. 261–285, 2017.

ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA ANEEL Nº 1.000, DE 7 DE DEZEMBRO DE 2021**. [*S.l.*], 2021.

_____. **Base de Dados Das Tarifas Das Distribuidoras de Energia Elétrica**. [*S.l.*], 2024.

_____. **Bandeira Tarifária - Acionamento**. [*S.l.*], 2025.

ANP. **Preços de Distribuição de Combustíveis**. [*S.l.*], 2024.

ANTP. **Custos Dos Serviços de Transporte Público Por Ônibus: Método de Cálculo**. São Paulo, 2017.

_____. **Custos Dos Serviços de Transporte Público Por Ônibus Elétrico: Metodologia de Cálculo e Parâmetros**. São Paulo, 2023.

ARACAJU. Prefeitura Municipal, **Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito (SMTT) de Aracaju**. 2023. Http://www.smttaju.com.br/.

ARASAN, V. T.; VEDAGIRI, P. Microsimulation Study of the Effect of Exclusive Bus Lanes on Heterogeneous Traffic Flow. **Journal of Urban Planning and Development**, v. 136, n. 1, p. 50–58, mar. 2010. ISSN 0733-9488, 1943-5444.

ARBEX, R. O. **Projeto de Redes Estruturais Otimizadas de Transporte Público Coletivo Urbano Por Ônibus.** 2020. Tese (Tese de Doutorado) — Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 2020.

ARBEX, R. O.; CUNHA, C. B. D. Avaliação das mudanças nas velocidades das linhas de ônibus da cidade de São Paulo após a implantação de faixas exclusivas através da análise de dados de GPS. **TRANSPORTES**, v. 24, n. 4, p. 21, dez. 2016. ISSN 2237-1346.

ARBEX, R. O.; da Cunha, C. B. Efficient transit network design and frequencies setting multi-objective optimization by alternating objective genetic algorithm. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 81, p. 355–376, 2015.

AYDIN, N.; SEKER, S.; DEVECI, M. Multi-Objective Optimization of Car Sharing Points Under Uncertainty for Sustainable Transportation. **IEEE Transactions on Engineering Management**, p. 1–10, 2022. ISSN 0018-9391, 1558-0040.

BAAJ, M. H.; MAHMASSANI, H. S. An AI-based approach for transit route system planning and design. **Journal of advanced transportation**, v. 25, n. 2, p. 187–209, 1991.

BALOGUN, A.-L. et al. Assessing the Potentials of Digitalization as a Tool for Climate Change Adaptation and Sustainable Development in Urban Centres. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, p. 101888, fev. 2020. ISSN 22106707.

Banco Central do Brasil. **Histórico: Meta de Inflação vs. Inflação Efetiva**. 2025. Https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/historicometas.

BANISTER, D. **Unsustainable Transport: City Transport in the New Century**. [*S.l.: s.n.*]: Routledge, 2005.

_____. The sustainable mobility paradigm. **Transport Policy**, v. 15, n. 2, p. 73–80, mar. 2008. ISSN 0967070X.

BATTY, M. et al. Smart cities of the future. **The European Physical Journal Special Topics**, Springer, v. 214, n. 1, p. 481–518, 2012.

BELÉM. Prefeitura Municipal, **Superintendência Executiva de Mobilidade Urbana de Belém (SeMOB)**. 2023. Https://semob.belem.pa.gov.br/.

Belo Horizonte. Prefeitura Municipal, **Plano de Mobilidade de Belo Horizonte**. 2016. Https://www.mobilidadebh.org/.

_____. **PBH Participa de Treinamento Para Implementação de Ônibus Elétrico**. 2022. Https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/pbh-participa-de-treinamento-para-implementacao-de-onibus-eletrico.

_____. **6º Inventário Municipal de Emissões de GEE. RELATÓRIO TÉCNICO DE ATUALIZAÇÃO E EXTRAÇÃO DOS DADOS PERÍODO: 2009-2021**. Belo Horizonte, 2023.

_____. Prefeitura Municipal, **BHGEO - Dados Geoespaciais Da Prefeitura de Belo Horizonte**. 2023. Https://prefeitura.pbh.gov.br/bhgeo.

_____. **Decreto Nº 18.370, de 7 de Julho de 2023.** 2023.

_____. **Dados Mensais Do Sistema de Transporte Por Ônibus Convencional e MOVE**. [*S.l.*], 2024.

_____. **Informação Técnica SUMOB N°016/2024 - Projeção Dos Custos Do Sistema de Transporte Coletivo Convencional e Suplementar Para o Exercício de 2025**. Belo Horizonte, 2024.

_____. Prefeitura Municipal, **PBH Reestrutura Atendimento de Linhas de Ônibus Na Região Do Alto Havaí e Havaí**. 2024. Https://prefeitura.pbh.gov.br/noticias/pbh-reestrutura-atendimento-de-linhas-de-onibus-na-regiao-do-alto-havai-e-havai?___goc_wbp___=193097002Tm8LIMdOVqNaFNWAhQWkC6nT8ek.

_____. Prefeitura Municipal., **REDE DE TRANSPORTE POR ÔNIBUS**. 2024. Https://prefeitura.pbh.gov.br/bhtrans/informacoes/transportes/onibus/rede-de-transporte.

_____. Prefeitura Municipal, **Portal de Dados Abertos Da Prefeitura de Belo Horizonte**. 2025. Https://dados.pbh.gov.br/.

BELTRAN, B. et al. Transit network design with allocation of green vehicles: A genetic algorithm approach. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 17, n. 5, p. 475–483, out. 2009. ISSN 0968090X.

BENEVOLO, C.; DAMERI, R. P.; D'AURIA, B. Smart Mobility in Smart City: Action Taxonomy, ICT Intensity and Public Benefits. *In*: TORRE, T.; BRACCINI, A. M.; SPINELLI, R. (ed.). **Empowering Organizations**. Cham: Springer International Publishing, 2016. v. 11, p. 13–28. ISBN 978-3-319-23783-1 978-3-319-23784-8.

BI, Z.; KEOLEIAN, G. A.; ERSAL, T. Wireless charger deployment for an electric bus network: A multi-objective life cycle optimization. **Applied Energy**, v. 225, p. 1090–1101, set. 2018. ISSN 03062619.

BIBRI, S. E.; KROGSTIE, J. Smart sustainable cities of the future: An extensive interdisciplinary literature review. **Sustainable cities and society**, Elsevier, v. 31, p. 183–212, 2017.

BLANC, B.; CARRAHER, M. **Transit Network Segmentation Using GTFS and OSM**. 2022.

Boa Vista. Prefeitura Municipal, **Empresa de Desenvolvimento Urbano e Habitacional**. 2023. Https://boavista.rr.gov.br/prefeitura/secretarias-e-orgaos-municipais/empresa-de-desenvolvimento-urbano-e-habitacional.

BORCHERS, T. **Priorização Otimizada de Redes de Transporte Público Por Ônibus Através de Análise Multicritério e Algoritmo Genético Em Araraquara - SP**. 2021. Tese (Dissertação (Mestrado Em Engenharia Urbana)) — Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2021.

BORCHERS, T.; Figueirôa-Ferreira, V. G.; FERNANDES, R. A. S. Privacy concerns on the mobility of smart cities. *In*: **Proceedings BTSym'21**. Campinas: [*S.l.: s.n.*], 2021.

BORCHERS, T.; RIBEIRO, R. A. A framework for selecting bus priority system locations in medium-sized cities: Case study in Araraquara, Brazil. **Case Studies on Transport Policy**, v. 10, n. 4, p. 2053–2063, dez. 2022. ISSN 2213624X.

BORCHERS, T.; WITTOWSKY, D.; FERNANDES, R. A. S. A Comprehensive Survey and Future Directions on Optimising Sustainable Urban Mobility. **IEEE Access**, v. 12, p. 63023–63048, 2024. ISSN 2169-3536.

BRASIL. **Presidência Da República. Constituição Da República Federativa Do Brasil**. 1988.

Brasil (ed.). **Brasil. Lei No 12.527, de 18 de Novembro de 2011. Regula o Acesso a Informações Previsto No Inciso XXXIII Do Art. 5º , No Inciso II Do § 3º Do Art. 37 e No § 2º Do Art. 216 Da Constituição Federal; Altera a Lei Nº 8.112, de 11 de Dezembro de 1990; Revoga a Lei Nº 11.111, de 5 de Maio de 2005, e Dispositivos Da Lei Nº 8.159, de 8 de Janeiro de 1991; e Dá Outras Providências.** 2011. 1 p.

BRASIL. **Presidência Da República. Lei No 12.587, de 3 de Janeiro de 2012. Institui as Diretrizes Da Política Nacional de Mobilidade Urbana**. 2012.

_____. **Presidência Da República. Lei No 13.709, de 14 de Agosto de 2018. Lei Geral de Proteção de Dados Pessoais (LGPD)**. 2018.

BRASIL. **Pesquisa Nacional de Mobilidade Urbana 2021 (Pemob 2021)**. 2021.

_____. **Caderno Técnico de Referência Para Eletromobilidade Nas Cidades Brasileiras Vol. I**. Brasília, DF, 2022. 204 p.

_____. **Caderno Técnico de Referência Para Eletromobilidade Nas Cidades Brasileiras Vol. II**. Brasília, DF, 2022. 204 p.

_____. **BRAZIL'S NATIONAL INVENTORY REPORT OF ANTHROPOGENIC EMISSIONS BY SOURCES AND REMOVALS BY SINKS OF GREENHOUSE GASES**. [*S.l.*], 2024.

_____. **Pesquisa Nacional de Mobilidade Urbana 2024 (Pemob 2024)**. 2024.

_____. **Novo PAC. Cidades Sustentáveis e Resilientes. Mobilidade Urbana Sustentável.** 2025. Https://www.gov.br/casacivil/pt-br/novopac/cidades-sustentaveis-e-resilientes/mobilidade-urbana-sustentavel.

_____. **Transferegov.Br**. 2025. Https://portal.transferegov.sistema.gov.br/portal/home.

BRASÍLIA. Governo Do Distrito Federal, **Plano Diretor de Transporte Urbano e Mobilidade Do Distrito Federal – PDTU/DF**. 2011. Https://semob.df.gov.br/pdtu/.

_____. Governo Do Distrito Federal, **Plano de Dados Abertos DF**. 2023. Http://dados.df.gov.br/.

_____. **Catálogo de Mapas Do IPEDF Codeplan**. 2025. Https://catalogo.ipe.df.gov.br/.

_____. **CONCORRÊNCIA ELETRÔNICA Nº 90018/2025 - UASG: 926120**. [*S.l.*], 2025.

_____. **GeoServer Web Service SEMOB-DF**. 2025. Https://geoserver.semob.df.gov.br/geoserver/web/?1.

BRAVO, M. A. et al. Air pollution and mortality in São Paulo, Brazil: Effects of multiple pollutants and analysis of susceptible populations. **Journal of Exposure Science & Environmental Epidemiology**, v. 26, n. 2, p. 150–161, mar. 2016. ISSN 1559-0631, 1559-064X.

BROZYNSKI, M. T.; LEIBOWICZ, B. D. Decarbonizing power and transportation at the urban scale: An analysis of the Austin, Texas Community Climate Plan. **Sustainable Cities and Society**, v. 43, p. 41–54, nov. 2018. ISSN 22106707.

BUTTS, K.; CULBERTSON, B.; GERTIN, T. **Peartree: A Library for Converting Transit Data into a Directed Graph for Sketch Network Analysis.** 2021.

CAI, Y. et al. The Integration of Multimodal Networks: The Generalized Modal Split and Collaborative Optimization of Transportation Hubs. **Journal of Advanced Transportation**, v. 2022, p. 1–32, dez. 2022. ISSN 2042-3195, 0197-6729.

CALLEGARI, C. et al. Battery electric buses in emerging markets and developing economies: A pathway for a just energy transition. **Energy for Sustainable Development**, v. 85, p. 101678, abr. 2025. ISSN 09730826.

Campo Grande. Prefeitura Municipal, **Prefeitura Discute Com a População Revisão Do Plano Diretor de Transporte e Mobilidade Urbana**. 2022. Https://www.campogrande.ms.gov.br/cgnoticias/noticias/prefeitura-discute-com-a-populacao-revisao-do-plano-diretor-de-transporte-e-mobilidade-urbana/.

_____. Prefeitura Municipal, **SISGRAN - Sistema Municipal de Indicadores de Campo Grande – MS | PMCG**. 2023. Https://sisgranmaps.campogrande.ms.gov.br/.

CANZLER, W.; WITTOWSKY, D. The impact of Germany's Energiewende on the transport sector – Unsolved problems and conflicts. **Utilities Policy**, v. 41, p. 246–251, ago. 2016. ISSN 09571787.

CARNEIRO, R. et al. TRANSPORTE COLETIVO E MOVIMENTO TARIFA-ZERO-BH: Repertórios de ação e incidência na política local. **Revista de Políticas Públicas**, v. 26, n. 1, p. 442–460, ago. 2022. ISSN 2178-2865.

CEDER, A. Urban mobility and public transport: Future perspectives and review. **International Journal of Urban Sciences**, Taylor & Francis, v. 25, n. 4, p. 455–479, 2021.

CEDER, A.; WILSON, N. H. Bus network design. **Transportation Research Part B: Methodological**, Elsevier, v. 20, n. 4, p. 331–344, 1986.

CEDER, A. A.; BUTCHER, M.; WANG, L. Optimization of bus stop placement for routes on uneven topography. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 74, p. 40–61, abr. 2015. ISSN 01912615.

CERVERO, R. Transit-based housing in California: Evidence on ridership impacts. **Transport Policy**, v. 1, n. 3, p. 174–183, jun. 1994. ISSN 0967070X.

CERVERO, R. (ed.). **The Transit Metropolis: A Global Inquiry**. Washington, D.C: Island Press, 1999. ISBN 978-1-55963-591-2 978-1-59726-931-5.

CERVERO, R.; DAI, D. BRT TOD: Leveraging transit oriented development with bus rapid transit investments. **Transport Policy**, Elsevier, v. 36, p. 127–138, 2014.

CETESB. **Emissões Veiculares No Estado de São Paulo**. São Paulo, SP, 2019.

_____. **Emissões Veiculares No Estado de São Paulo**. São Paulo, SP, 2022.

CHAPMAN, L. Transport and climate change: A review. **Journal of Transport Geography**, v. 15, n. 5, p. 354–367, set. 2007. ISSN 09666923.

COELLO, C. A. C.; LAMONT, G. B.; VELDHUIZEN, D. A. V. **Evolutionary Algorithms for Solving Multi-Objective Problems**. 2nd ed. ed. New York: Springer, 2007. (Genetic and Evolutionary Computation Series). ISBN 978-0-387-33254-3.

CONAMA. **RESOLUÇÃO Nº 490, DE 16 DE NOVEMBRO DE 2018**. 2018.

CONSOLI, S. et al. Producing Linked Data for Smart Cities: The Case of Catania. **Big Data Research**, v. 7, p. 1–15, mar. 2017. ISSN 22145796.

COONEY, G.; HAWKINS, T. R.; MARRIOTT, J. Life Cycle Assessment of Diesel and Electric Public Transportation Buses. **Journal of Industrial Ecology**, v. 17, n. 5, p. 689–699, out. 2013. ISSN 1088-1980, 1530-9290.

CUI, Y.; MISHRA, S.; WELCH, T. F. Land use effects on bicycle ridership: A framework for state planning agencies. **Journal of Transport Geography**, v. 41, p. 220–228, dez. 2014. ISSN 09666923.

CUIABÁ. Prefeitura Municipal, **Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana**. 2023. Https://www.cuiaba.mt.gov.br/secretarias/mobilidade-urbana/.

CURITIBA. Prefeitura Municipal, **Planos Setoriais 2021**. 2021. Https://ippuc.org.br/planos-setoriais.

_____. Prefeitura Municipal, **Base Cartográfica - Prefeitura Municipal de Curitiba**. 2023. Https://geocuritiba.ippuc.org.br/basecartografica/.

_____. **URBS Desenvolvimento - Webservices**. 2025. Transporteservico.urbs.curitiba.pr.gov.br/.

DADASHZADEH, N.; ERGUN, M. Spatial bus priority schemes, implementation challenges and needs: An overview and directions for future studies. **Public Transport**, v. 10, n. 3, p. 545–570, dez. 2018. ISSN 1866-749X, 1613-7159.

DATASUS. **Óbitos Por Causas Externas - Brasil**. 2023. Http://tabnet.datasus.gov.br/cgi/tabcgi.exe?sim/cnv/ext10uf.def.

DAVISON, L. J.; KNOWLES, R. D. Bus quality partnerships, modal shift and traffic decongestion. **Journal of Transport Geography**, Elsevier, v. 14, n. 3, p. 177–194, 2006.

DEB, K. et al. A fast and elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. **IEEE Transactions on Evolutionary Computation**, v. 6, n. 2, p. 182–197, abr. 2002. ISSN 1089778X.

DINKO, A.; JACKIVA, I. Y.; BUDILOVIČA, E. B. Data Sources Analysis for Sustainable Trip Planner Development for Riga City. **Transport and Telecommunication Journal**, v. 22, n. 3, p. 321–331, jun. 2021. ISSN 1407-6179.

DOCHERTY, I.; MARSDEN, G.; ANABLE, J. The governance of smart mobility. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 115, p. 114–125, set. 2018. ISSN 09658564.

DOMINGUES, L. B. et al. Disputas discursivas no âmbito da mobilidade urbana: o caso da "tarifa zero" em Belo Horizonte. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 17, p. e20240014, 2025. ISSN 2175-3369.

DOORLEY, R. et al. Designing cycle networks to maximize health, environmental, and travel time impacts: An optimization-based approach. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 14, n. 5, p. 361–374, maio 2020. ISSN 1556-8318, 1556-8334.

DOUGLAS, M. J. et al. Are cars the new tobacco? **Journal of Public Health**, Oxford University Press, v. 33, n. 2, p. 160–169, 2011.

DURAN, J.; PRADENAS, L.; PARADA, V. Transit network design with pollution minimization. **Public Transport**, v. 11, n. 1, p. 189–210, jun. 2019. ISSN 1866-749X, 1613-7159.

ECKHOFF, D.; SOMMER, C. Driving for Big Data? Privacy Concerns in Vehicular Networking. **IEEE Security & Privacy**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 12, n. 1, p. 77–79, jan. 2014. ISSN 1540-7993.

ELECTRA. Tecnologia de Tração Elétrica, **Electra - Notícias**. 2023. Https://www.eletrabus.com.br/.

ELKAMEL, M. et al. Stochastic optimization for price-based unit commitment in renewable energy-based personal rapid transit systems in sustainable smart cities. **Sustainable Cities and Society**, v. 65, p. 102618, fev. 2021. ISSN 22106707.

ELLIOT, C. **E-Bike City Project**. 2025. Https://ebikecity.baug.ethz.ch/en/.

EMAMI, B. D.; SONG, Y.; KHANI, A. Prioritizing Bus Routes for Electrification: GIS-Based Multi-Criteria Analysis Considering Operational, Environmental, and Social Benefits and Costs. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2676, n. 8, p. 10–23, ago. 2022. ISSN 0361-1981, 2169-4052.

EMEP/EEA. **EMEP/EEA Air Pollutant Emission Inventory Guidebook**. [*S.l.*], 2023.

EPE. **Avaliação Técnico-Econômica de Ônibus Elétrico No Brasil**. [*S.l.*], 2020.

_____. **Balanço Energético Nacional 2024: Ano Base 2023**. Rio de Janeiro, 2024.

ERCAN, T. et al. Optimization of transit bus fleet's life cycle assessment impacts with alternative fuel options. **Energy**, v. 93, p. 323–334, dez. 2015. ISSN 03605442.

FAÇANHA, C. et al. **Deficiências No Programa PROCONVE P-7 Brasileiro e o Caso Para Normas P-8**. [*S.l.*], 2016.

FANG, L. et al. Mobile Privacy: Scalable Ensemble Matching for User Identification Attacks. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 8, p. 97243–97257, 2020. ISSN 2169-3536.

FARAHANI, R. Z. et al. A review of urban transportation network design problems. **European Journal of Operational Research**, Elsevier, v. 229, n. 2, p. 281–302, 2013.

FENG, T.; ZHANG, J.; FUJIWARA, A. AN INTEGRATED MODELING FRAMEWORK FOR ENVIRONMENTALLY EFFICIENT CAR OWNERSHIP AND TRIP BALANCE. **IATSS Research**, v. 32, n. 2, p. 95–108, 2008. ISSN 03861112.

Figueirôa-Ferreira, V. G. et al. Citizens' perception analysis of public transport and smart technologies in the Brazilian capitals during the SARS-CoV-2 pandemic. **Acta Scientiarum. Technology**, v. 45, p. e61329, abr. 2023. ISSN 1806-2563, 1807-8664.

FINK, C. et al. **R5py: Rapid Realistic Routing with R5 in Python**. 2022. Zenodo.

FIORE, S. et al. An Integrated Big and Fast Data Analytics Platform for Smart Urban Transportation Management. **IEEE Access**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), v. 7, p. 117652–117677, 2019. ISSN 2169-3536.

FLORIANÓPOLIS. Prefeitura Municipal, **Plano de Mobilidade Urbana Sustentável Da Grande Florianópolis (PLAMUS)**. 2015. Https://observatoriodamobilidadeurbana.ufsc.br/.

_____. Prefeitura Municipal, **Prefeitura de Florianópolis - Geoportal**. 2023. Https://geoportal.pmf.sc.gov.br/map.

FONZONE, A.; SALEH, W.; RYE, T. **Smart Urban Mobility–Escaping the Technological Sirens**. [*S.l.: s.n.*]: Elsevier, 2018. 1–3 p.

FORTALEZA. Prefeitura Municipal, **Canal Mobilidade - Prefeitura de Fortaleza**. 2023. Https://mobilidade.fortaleza.ce.gov.br/home.html.

_____. Prefeitura Municipal, **Dados Abertos Fortaleza**. 2023. Https://dados.fortaleza.ce.gov.br/.

GAIROLA, P.; NEZAMUDDIN, N. Determining Battery and Fast Charger Configurations to Maximize E-Mileage of Electric Buses under Budget. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 148, n. 11, p. 04022100, nov. 2022. ISSN 2473-2907, 2473-2893.

GAO, Q. et al. Two-Way Cooperative Priority Control of Bus Transit with Stop Capacity Constraint. **Sustainability**, v. 12, n. 4, p. 1405, fev. 2020. ISSN 2071-1050.

GHATE, A. T.; QAMAR, S. Carbon footprint of urban public transport systems in Indian cities. **Case Studies on Transport Policy**, v. 8, n. 1, p. 245–251, mar. 2020. ISSN 2213624X.

GIFFINGER, R.; GUDRUN, H. Smart cities ranking: An effective instrument for the positioning of the cities? **ACE: architecture, city and environment**, Centre de Política del Sòl i Valoracions-Universitat Politècnica de Catalunya, v. 4, n. 12, p. 7–26, 2010.

GIORGI, L. Sustainable mobility. Challenges, opportunities and conflicts - a social science perspective. **International Social Science Journal**, v. 55, n. 176, p. 179–183, jun. 2003. ISSN 0020-8701, 1468-2451.

GIORIA, R. et al. Regulated and unregulated emissions from Euro VI Diesel and CNG heavy-duty vehicles. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 134, p. 104349, set. 2024. ISSN 13619209.

GOIÂNIA. Prefeitura Municipal, **Boletim Do Transporte – Licitação de Ônibus Elétricos Tem Valor Estimado de R$ 1,5 Bilhão**. 2023. Https://www.rmtcgoiania.com.br/blog/2023/02/10/boletim-do-transporte-licitacao-de-onibus-eletricos-tem-valor-estimado-de-r-15-bilhao/.

_____. Prefeitura Municipal, **Planmob Dinâmico**. 2023. Https://www.goiania.go.gov.br/planmob/faq/.

_____. Prefeitura Municipal, **SIGGO - Sistema de Informações Geográficas de Goiânia**. 2023. Https://portalmapa.goiania.go.gov.br/mapafacil/.

GOMEZ, A. et al. Multiobjective genetic algorithm strategies for electricity production from generation IV nuclear technology. **Energy Conversion and Management**, v. 51, n. 4, p. 859–871, abr. 2010. ISSN 01968904.

GOROFF, D.; POLONETSKY, J.; TENE, O. Privacy Protective Research: Facilitating Ethically Responsible Access to Administrative Data. **The ANNALS of the American Academy of Political and Social Science**, SAGE Publications, v. 675, n. 1, p. 46–66, jan. 2018. ISSN 0002-7162, 1552-3349.

GOUGE, B.; DOWLATABADI, H.; RIES, F. J. Minimizing the Health and Climate Impacts of Emissions from Heavy-Duty Public Transportation Bus Fleets through Operational Optimization. **Environmental Science & Technology**, v. 47, n. 8, p. 3734–3742, abr. 2013. ISSN 0013-936X, 1520-5851.

GOUVEIA, N. et al. Poluição do ar e hospitalizações na maior metrópole brasileira. **Revista de Saúde Pública**, v. 51, p. 117, dez. 2017. ISSN 1518-8787, 0034-8910.

_____. Effects of air pollution on infant and children respiratory mortality in four large Latin-American cities. **Environmental Pollution**, v. 232, p. 385–391, jan. 2018. ISSN 02697491.

_____. Ambient fine particulate matter in Latin American cities: Levels, population exposure, and associated urban factors. **Science of The Total Environment**, v. 772, p. 145035, jun. 2021. ISSN 00489697.

GRASER, A.; DRAGASCHNIG, M. Trajectools Demo: Towards No-Code Solutions for Movement Data Analytics. *In*: **2024 25th IEEE International Conference on Mobile Data Management (MDM)**. Brussels, Belgium: IEEE, 2024. p. 235–238. ISBN 979-8-3503-7455-1.

GRIGORATOS, T. et al. Real world emissions performance of heavy-duty Euro VI diesel vehicles. **Atmospheric Environment**, v. 201, p. 348–359, mar. 2019. ISSN 13522310.

GRISWOLD, J. B. et al. Unintended greenhouse gas consequences of lowering level of service in urban transit systems. **Environmental Research Letters**, v. 9, n. 12, p. 124001, dez. 2014. ISSN 1748-9326.

GUIHAIRE, V.; HAO, J.-K. Transit network design and scheduling: A global review. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier, v. 42, n. 10, p. 1251–1273, 2008.

HABIBZADEH, H. et al. A survey on cybersecurity, data privacy, and policy issues in cyber-physical system deployments in smart cities. **Sustainable Cities and Society**, Elsevier BV, v. 50, p. 101660, out. 2019. ISSN 2210-6707.

HADDAD, E. A. et al. The underground economy: Tracking the higher-order economic impacts of the São Paulo subway system. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier, v. 73, p. 18–30, 2015.

HAITAO, H. et al. Providing public transport priority in the perimeter of urban networks: A bimodal strategy. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 107, p. 171–192, out. 2019. ISSN 0968090X.

HAMURCU, M.; EREN, T. Electric Bus Selection with Multicriteria Decision Analysis for Green Transportation. **Sustainability**, v. 12, n. 7, p. 2777, abr. 2020. ISSN 2071-1050.

HARRIS, C. R. et al. Array programming with NumPy. **Nature**, v. 585, n. 7825, p. 357–362, set. 2020. ISSN 0028-0836, 1476-4687.

HARVEY, D. The Right to the City. **New Left Review**, n. 53, p. 23–40, 2008.

HU, T. et al. Building an Open Resources Repository for COVID-19 Research. **Data and Information Management**, v. 4, n. 3, p. 130–147, set. 2020. ISSN 25439251.

HUNTER, J. D. Matplotlib: A 2D Graphics Environment. **Computing in Science & Engineering**, v. 9, n. 3, p. 90–95, 2007. ISSN 1521-9615.

IBAMA. **Programa de Controle Da Poluição Do Ar Por Veículos Automotores**. [*S.l.*], 2011.

IBGE. **Censo Demográfico 2022**. [*S.l.*], 2022.

ICASIANO, C. D. A.; TAEIHAGH, A. Governance of the Risks of Ridesharing in Southeast Asia: An In-Depth Analysis. **Sustainability**, MDPI AG, v. 13, n. 11, p. 6474, jun. 2021. ISSN 2071-1050.

ICCT. **Análise Operacional de Ônibus Elétricos a Bateria Em São Paulo**. São Paulo, SP, 2022.

IEMA. **Inventário de Emissões Atmosféricas Do Transporte Rodoviário de Passageiros No Município de São Paulo - Nota Metodológica**. São Paulo, SP, 2017.

IFAEI, P. et al. Techno-econo-environmental feasibility of retrofitting urban transportation system with optimal solar panels for climate change mitigation – A case study. **Journal of Cleaner Production**, v. 251, p. 119639, abr. 2020. ISSN 09596526.

ILIOPOULOU, C. et al. Electric Transit Route Network Design Problem: Model and Application. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2673, n. 8, p. 264–274, ago. 2019. ISSN 0361-1981, 2169-4052.

Transport. *In*: IPCC (ed.). **Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change**. 1. ed. [*S.l.: s.n.*]: Intergovernmental Panel On Climate Change. Cambridge University Press, 2023. p. 1049–1160. ISBN 978-1-009-15792-6.

IPCC, I. P. o. C. C. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories, Prepared by the National Green-House Gas Inventories Programme**. [*S.l.*], 2006.

ITDP. **Ciclo de Capacitação Para Descarbonização Das Frotas de Ônibus Das Cidades Brasileiras**. ReDUS. Rede para Desenvolvimento Urbano Sustentável., 2024.

JÁNOŠÍKOVÁ, L. et al. Optimization of the urban line network using a mathematical programming approach. **International Journal of Sustainable Development and Planning**, v. 7, n. 3, p. 288–301, set. 2012. ISSN 1743-7601, 1743-761X.

JANSSEN, M.; MATHEUS, R.; ZUIDERWIJK, A. Big and Open Linked Data (BOLD) to Create Smart Cities and Citizens: Insights from Smart Energy and Mobility Cases. *In*: TAMBOURIS, E. et al. (ed.). **Electronic Government**. Cham: Springer International Publishing, 2015. v. 9248, p. 79–90. ISBN 978-3-319-22478-7 978-3-319-22479-4.

JIANG, Y. Reliability-based equitable transit frequency design. **Transportmetrica A: Transport Science**, v. 18, n. 3, p. 879–909, dez. 2022. ISSN 2324-9935, 2324-9943.

JIMÉNEZ, F.; ROMÁN, A. Urban bus fleet-to-route assignment for pollutant emissions minimization. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 85, p. 120–131, jan. 2016. ISSN 13665545.

João Pessoa. Prefeitura Municipal, **Plano Diretor de Mobilidade Urbana (PDMU)**. 2020. Http://www.planmob.joaopessoa.pb.gov.br/.

JORDAHL, K. et al. **Geopandas/Geopandas: V0.8.1**. 2020. Zenodo.

KAWASAKI, S. The challenges of transportation/traffic statistics in Japan and directions for the future. **IATSS Research**, Elsevier BV, v. 39, n. 1, p. 1–8, jul. 2015. ISSN 0386-1112.

KENWORTHY, J. R. The eco-city: Ten key transport and planning dimensions for sustainable city development. **Environment and urbanization**, Sage Publications Sage UK: London, England, v. 18, n. 1, p. 67–85, 2006.

KEPAPTSOGLOU, K.; KARLAFTIS, M. Transit route network design problem: Review. **Journal of Transportation Engineering**, v. 135, n. 8, p. 491–505, ago. 2009. ISSN 0733-947X, 1943-5436.

KHAN, Z.; PERVEZ, Z.; ABBASI, A. G. Towards a secure service provisioning framework in a Smart city environment. **Future Generation Computer Systems**, Elsevier BV, v. 77, p. 112–135, dez. 2017. ISSN 0167-739X.

KHATHAWATCHARAKUN; LIMSAWASD, C. Eco-conscious decision-support model for optimizing stopping patterns in the mass transit system. **Engineering and Applied Science Research**, Faculty of Engineering, Khon Kaen University, v. 49, p. 117, 2022.

KHOO, H. L.; TEOH, L. E.; MENG, Q. A bi-objective optimization approach for exclusive bus lane selection and scheduling design. **Engineering Optimization**, Taylor & Francis, v. 46, n. 7, p. 987–1007, 2014.

KOLAK, O. I.; FEYZIOĞLU, O.; NOYAN, N. Bi-level multi-objective traffic network optimisation with sustainability perspective. **Expert Systems with Applications**, v. 104, p. 294–306, ago. 2018. ISSN 09574174.

KRAUS, L.; PROFF, H. Sustainable Urban Transportation Criteria and Measurement—A Systematic Literature Review. **Sustainability**, v. 13, n. 13, p. 7113, jun. 2021. ISSN 2071-1050.

LAJUNEN, A. Lifecycle costs and charging requirements of electric buses with different charging methods. **Journal of Cleaner Production**, v. 172, p. 56–67, jan. 2018. ISSN 09596526.

LAJUNEN, A.; LIPMAN, T. Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses. **Energy**, v. 106, p. 329–342, jul. 2016. ISSN 03605442.

LEBLANC, L. J.; MORLOK, E. K.; PIERSKALLA, W. P. An efficient approach to solving the road network equilibrium traffic assignment problem. **Transportation Research**, v. 9, n. 5, p. 309–318, out. 1975. ISSN 00411647.

LEFEBVRE, H. **O Direito À Cidade**. [*S.l.: s.n.*]: Centauro Editora, 2008. ISBN 978-85-88208-97-1.

LEITÃO, N. B. M. A.; Ferreira Jr, S.; COSTA, B. L. D. Políticas de Transporte Coletivo em Belo Horizonte/MG: Uma análise à luz da sustentabilidade e da equidade. **urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana**, v. 16, p. e20230262, 2024. ISSN 2175-3369.

LI, Y.; LU, S. Study on the optimization of urban passenger traffic structure based on multi-objective linear programming—a case study of Beijing. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 28, n. 8, p. 10192–10206, fev. 2021. ISSN 0944-1344, 1614-7499.

LI, Z.-C. et al. Simultaneous optimization of fuel surcharges and transit service runs in a multimodal transport network: A time-dependent activity-based approach. **Transportation Letters**, v. 8, n. 1, p. 35–46, jan. 2016. ISSN 1942-7867, 1942-7875.

LIM, H. S. M.; TAEIHAGH, A. Autonomous Vehicles for Smart and Sustainable Cities: An In-Depth Exploration of Privacy and Cybersecurity Implications. **Energies**, MDPI AG, v. 11, n. 5, p. 1062, abr. 2018. ISSN 1996-1073.

LIU, B. et al. VTDP: Privately Sanitizing Fine-grained Vehicle Trajectory Data with Boosted Utility. **IEEE Transactions on Dependable and Secure Computing**, Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), p. 1–1, 2021. ISSN 1545-5971, 1941-0018, 2160-9209.

LIU, C. et al. Ambient Particulate Air Pollution and Daily Mortality in 652 Cities. **New England Journal of Medicine**, v. 381, n. 8, p. 705–715, ago. 2019. ISSN 0028-4793, 1533-4406.

LIU, H.; SZETO, W.; LONG, J. Bike network design problem with a path-size logit-based equilibrium constraint: Formulation, global optimization, and matheuristic. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 127, p. 284–307, jul. 2019. ISSN 13665545.

LIU, Y. et al. Intelligent bus routing with heterogeneous human mobility patterns. **Knowledge and Information Systems**, v. 50, n. 2, p. 383–415, fev. 2017. ISSN 0219-1377, 0219-3116.

LIU, Z.; SONG, Z. Robust planning of dynamic wireless charging infrastructure for battery electric buses. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 83, p. 77–103, out. 2017. ISSN 0968090X.

LYONS, G. Getting smart about urban mobility–aligning the paradigms of smart and sustainable. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, Elsevier, v. 115, p. 4–14, 2018.

MA, X.; JIN, J.; LEI, W. Multi-criteria analysis of optimal signal plans using microscopic traffic models. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 32, p. 1–14, out. 2014. ISSN 13619209.

MA, Y.; LI, J.; HAN, C.-P. A planning tool for maximising transit services. **Transportmetrica B: Transport Dynamics**, v. 4, n. 1, p. 1–22, jan. 2016. ISSN 2168-0566, 2168-0582.

MACAPÁ. Prefeitura Municipal, **CTMAC – Companhia De Trânsito E Transporte De Macapá**. 2023. Https://macapa.ap.gov.br/unidade-administrativa/ctmac/.

MACEIÓ. Prefeitura Municipal, **Superintendência Municipal de Transportes e Trânsito**. 2023. Https://maceio.al.gov.br/secretarias-e-orgaos/smtt.

MAHREZ, Z. et al. Smart Urban Mobility: When Mobility Systems Meet Smart Data. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 23, n. 7, p. 6222–6239, jul. 2022. ISSN 1524-9050, 1558-0016.

MANAUS. Prefeitura Municipal, **Plano de Mobilidade Urbana de Manaus**. 2015. Https://www2.manaus.am.gov.br/docs/portal/secretarias/smtu/PlanMobManaus.pdf.

_____. Prefeitura Municipal, **Sistema de Transporte Coletivo de Manaus Contará Com Ônibus Elétrico**. 2022. Https://www.sinetram.com.br/noticia/sistema-de-transporte-coletivo-de-manaus-contara-com-onibus-eletrico.

MANDL, C. E. **Applied Network Optimization**. London ; New York: Academic Press, 1979. ISBN 978-0-12-468350-1.

MANZOLLI, J. A.; TROVÃO, J. P. F.; ANTUNES, C. H. Electric bus coordinated charging strategy considering V2G and battery degradation. **Energy**, v. 254, p. 124252, set. 2022. ISSN 03605442.

MARSEGLIA, G. et al. Optimal Alignments for Designing Urban Transport Systems: Application to Seville. **Sustainability**, v. 11, n. 18, p. 5058, set. 2019. ISSN 2071-1050.

MEHRIAR, M.; MASOUMI, H.; Nosal-Hoy, K. Correlations of urban sprawl with transport patterns and socioeconomics of university students in cracow, Poland. **Zeszyty Naukowe. Transport/Politechnika Śląska**, 2020.

MENG, M. et al. Multimodal traffic assignment with traffic emission effects. **Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Engineering Sustainability**, v. 169, n. 3, p. 114–122, jun. 2016. ISSN 1478-4629, 1751-7680.

MESBAH, M.; SARVI, M.; CURRIE, G. New Methodology for Optimizing Transit Priority at the Network Level. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2089, n. 1, p. 93–100, jan. 2008. ISSN 0361-1981, 2169-4052.

MESBAH, M.; THOMPSON, R.; MORIDPOUR, S. Bilevel Optimization Approach to Design of Network of Bike Lanes. **Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board**, v. 2284, n. 1, p. 21–28, jan. 2012. ISSN 0361-1981, 2169-4052.

MILLER, P. et al. Public transportation and sustainability: A review. **KSCE Journal of Civil Engineering**, v. 20, n. 3, p. 1076–1083, abr. 2016. ISSN 1226-7988, 1976-3808.

Minas Gerais. Secretaria de Estado de Fazenda de Minas Gerais., **Cadastrar Locadora de Veículos Sem Atividade Exclusiva de Locadora Para Alíquota Reduzida de IPVA**. 2025. Https://www.fazenda.mg.gov.br/servicos/cidadao/veiculos/cadastrar-locadora-de-veiculos-com-aliquota-reduzida-de-ipva/.

Ministério do Meio Ambiente (MMA). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas Por Veículos Automotores Rodoviários 2013**. [*S.l.*], 2013.

MOON, J. et al. Locating Battery Swapping Stations for a Smart e-Bus System. **Sustainability**, v. 12, n. 3, p. 1142, fev. 2020. ISSN 2071-1050.

MORENO, C. La ville du quart d'heure : Pour un nouveau chrono-urbanisme. out. 2016.

Morishita-Steffen, N. et al. Smarter Together: Progressing Smart Data Platforms in Lyon, Munich, and Vienna. **Energies**, v. 14, n. 4, p. 1075, fev. 2021. ISSN 1996-1073.

MUMFORD, C. L. New heuristic and evolutionary operators for the multi-objective urban transit routing problem. *In*: **2013 IEEE Congress on Evolutionary Computation**. Cancun, Mexico: IEEE, 2013. p. 939–946. ISBN 978-1-4799-0454-9 978-1-4799-0453-2 978-1-4799-0451-8 978-1-4799-0452-5.

Muren et al. Balanced maximal covering location problem and its application in bike-sharing. **International Journal of Production Economics**, v. 223, p. 107513, maio 2020. ISSN 09255273.

NAKAMURA, K.; HAYASHI, Y. Strategies and instruments for low-carbon urban transport: An international review on trends and effects. **Transport Policy**, v. 29, p. 264–274, set. 2013. ISSN 0967070X.

NATAL. Prefeitura Municipal, **Portal Da Transparência Da Mobilidade Urbana de Natal**. 2023. Http://dados.natal.br/group/mobilidade-urbana.

_____. Prefeitura Municipal, **STTU – Secretaria Municipal de Mobilidade Urbana**. 2023. Https://www.natal.rn.gov.br/sttu.

NECHYBA, T. J.; WALSH, R. P. Urban sprawl. **Journal of economic perspectives**, v. 18, n. 4, p. 177–200, 2004.

NEWMAN, P. W.; KENWORTHY, J. R. The land use—transport connection: An overview. **Land use policy**, Elsevier, v. 13, n. 1, p. 1–22, 1996.

NGUYEN, T.-H.; JUNG, J. J. Swarm intelligence-based green optimization framework for sustainable transportation. **Sustainable Cities and Society**, v. 71, p. 102947, ago. 2021. ISSN 22106707.

NOY, K.; GIVONI, M. Is 'smart mobility'sustainable? Examining the views and beliefs of transport's technological entrepreneurs. **Sustainability**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 10, n. 2, p. 422, 2018.

NTU. **Faixas Exclusivas de Ônibus Urbanos - Experiências de Sucesso**. Brasília, DF, 2013.

_____. **Prioridade Ao Transporte Público Por Ônibus - Panorama Dos Projetos e Investimentos**. Brasília, DF, 2015.

Observatório do Clima. **Análise Das Emissões de Gases de Efeito Estufa e Suas Implocaçãoes Para as Metas Climáticas Do Brasil (1970-2023)**. [*S.l.*], 2024.

_____. **Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)**. 2024. Https://plataforma.seeg.eco.br/.

OLIVEIRA, V. D. **Risco Moral, Subsídio Público e Política Tarifária: Uma Análise Microeconômica Para o Transporte Público a Partir Do Modelo de Belo Horizonte**. 2024. Tese (Dissertação (Mestrado)) — Universidade Federal de Minas Gerais, Centro de Desenvolvimento e Planejamento Regional., 2024.

Open Government Working Group. **Open Government Data Principles**. 2007. Https://public.resource.org/8_principles.html.

ORTÚZAR, J. d. D.; WILLUMSEN, L. G. **Modelling Transport**. 4. ed. ed. Chichester: Wiley, 2011. ISBN 978-0-470-76039-0.

PADDEU, D. et al. Practitioner views on transport planning's evolution – A Sisyphean task still ahead? **Transport Policy**, v. 156, p. 89–100, set. 2024. ISSN 0967070X.

PADEIRO, M.; LOURO, A.; COSTA, N. M. D. Transit-oriented development and gentrification: A systematic review. **Transport Reviews**, v. 39, n. 6, p. 733–754, nov. 2019. ISSN 0144-1647, 1464-5327.

PALMAS. Prefeitura Municipal, **Secretaria Municipal de Segurança e Mobilidade Urbana**. 2023. Https://www.palmas.to.gov.br/portal/orgaos/secretaria-municipal-de-seguranca-e-mobilidade-urbana/10/.

PARYCEK, P.; HÖCHTL, J.; GINNER, M. Open Government Data Implementation Evaluation. **Journal of theoretical and applied electronic commerce research**, v. 9, n. 2, p. 13–14, ago. 2014. ISSN 0718-1876.

PEDREGOSA, F. et al. Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, v. 12, n. 85, p. 2825–2830, 2011. ISSN 1533-7928.

PIAZZA, G. et al. Optimal design of electric mobility services for a Local Energy Community. **Sustainable Energy, Grids and Networks**, v. 26, p. 100440, jun. 2021. ISSN 23524677.

Porto Alegre. Prefeitura Municipal, **Plano de Mobilidade Urbana de Porto Alegre**. 2019. Https://prefeitura.poa.br/smim/projetos/plano-de-mobilidade-urbana.

_____. Prefeitura Municipal, **Observatório de Mobilidade**. 2023. Https://eptctransparente.com.br/observamobilidade.

Porto Velho. Prefeitura Municipal, **SEMTRAN - Secretaria Municipal de Trânsito, Mobilidade e Transportes**. 2023. Https://semtran.portovelho.ro.gov.br/.

QGIS. **QGIS 3.42. Geographic Information System.** 2025. QGIS Association.

QIANG, Y. et al. Energy-Efficiency Models of Sustainable Urban Transportation Structure Optimization. **IEEE Access**, v. 6, p. 18192–18199, 2018. ISSN 2169-3536.

RECIFE. Prefeitura Municipal, **Dados Abertos Da Prefeitura de Recife**. 2023. Http://dados.recife.pe.gov.br/id/.

_____. Prefeitura Municipal, **Plano de Mobilidade Urbana Do Recife**. 2023. Http://planodemobilidade.recife.pe.gov.br/node/9.

RIBAU, J. P.; SILVA, C. M.; SOUSA, J. M. Efficiency, cost and life cycle CO2 optimization of fuel cell hybrid and plug-in hybrid urban buses. **Applied Energy**, v. 129, p. 320–335, set. 2014. ISSN 03062619.

RIBAU, J. P.; VIEIRA, S. M.; SILVA, C. M. Selecting sustainable electric bus powertrains using multipreference evolutionary algorithms. **International Journal of Sustainable Transportation**, v. 12, n. 8, p. 592–612, set. 2018. ISSN 1556-8318, 1556-8334.

Rio Branco. Prefeitura Municipal, **Plano Diretor de Transportes e Trânsito**. 2009. Http://portalcgm.riobranco.ac.gov.br/portal/legislacao/plano-diretor-transportes-transito/.

_____. Prefeitura Municipal, **Prefeito de Rio Branco Visita Indústria e Garante Ônibus Elétrico Até o Início Do Ano Que Vem, Na Capital Acreana**. 2022. Http://www.riobranco.ac.gov.br/2022/03/23/prefeito-de-rio-branco-visita-industria-e-garante-onibus-eletrico-ate-o-inicio-do-ano-que-vem-na-capital-acreana/.

Rio de Janeiro. Prefeitura Municipal, **Plano de Mobilidade Urbana Sustentável Do Rio de Janeiro**. 2016. Https://www.rio.rj.gov.br/web/pmus/documentos/-/document_library_display/7QYh/view/7289166.

_____. Prefeitura Municipal, **Data.Rio**. 2023. Https://www.data.rio/.

ROCKSTRÖM, J. et al. A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 472–475, set. 2009. ISSN 0028-0836, 1476-4687.

Rojas-Rueda, D.; NORBERCIAK, M.; Morales-Zamora, E. Advancing Health Equity through 15-min Cities and Chrono-urbanism. **Journal of Urban Health**, v. 101, n. 3, p. 483–496, jun. 2024. ISSN 1099-3460, 1468-2869.

Ruiz-Padillo, A. et al. Multi-criteria tool for cycle-lane safety-level inspection: A Brazilian case study. **Case Studies on Transport Policy**, v. 9, n. 4, p. 1696–1706, dez. 2021. ISSN 2213624X.

RYBARCZYK, G.; WU, C. Bicycle facility planning using GIS and multi-criteria decision analysis. **Applied Geography**, v. 30, n. 2, p. 282–293, abr. 2010. ISSN 01436228.

São Luís. Prefeitura Municipal, **Secretaria Municipal de Trânsito e Transportes**. 2023. Https://saoluis.ma.gov.br/smtt.

São Paulo. **Lei Nº 15.831, de 15 de Junho de 2015.** 2015.

_____. Prefeitura Municipal, **Plano de Mobilidade Urbana Do Município de São Paulo - 2015**. 2015. Https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/mobilidade/planmob/index.php?p=189299.

_____. **EDITAL DE CONCORRÊNCIA Nº055/2022/ SPOBRAS**. São Paulo, SP, 2023.

_____. Prefeitura Municipal, **Portal de Dados Abertos Da Prefeitura de São Paulo**. 2023. Http://dados.prefeitura.sp.gov.br/pt_PT/.

SADEGHI, M.; AGHAYAN, I.; GHAZNAVI, M. A cuckoo search based approach to design sustainable transit network. **Transportation Letters**, v. 13, n. 9, p. 635–648, out. 2021. ISSN 1942-7867, 1942-7875.

SAINIO, J.; WESTERHOLM, J.; OKSANEN, J. Generating Heat Maps of Popular Routes Online from Massive Mobile Sports Tracking Application Data in Milliseconds While Respecting Privacy. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, MDPI AG, v. 4, n. 4, p. 1813–1826, set. 2015. ISSN 2220-9964.

SALDIVA, P. H. N. et al. Lung Inflammation Induced by Concentrated Ambient Air Particles Is Related to Particle Composition. **American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine**, v. 165, n. 12, p. 1610–1617, jun. 2002. ISSN 1073-449X, 1535-4970.

SALVADOR. Prefeitura Municipal, **Secretaria de Mobilidade de Salvador (SEMOB)**. 2023. Http://www.mobilidade.salvador.ba.gov.br/index.php.

SANTOS, G.; BEHRENDT, H.; TEYTELBOYM, A. Part II: Policy instruments for sustainable road transport. **Research in transportation economics**, Elsevier, v. 28, n. 1, p. 46–91, 2010.

SANTOS, M. **A Urbanizacao Brasileira**. [*S.l.: s.n.*]: Hucitec Editora, 1993. ISBN 978-85-271-0230-8.

SARIGIANNIS, DA. et al. Benefits on public health from transport-related greenhouse gas mitigation policies in Southeastern European cities. **Science of the Total Environment**, Elsevier, v. 579, p. 1427–1438, 2017.

SDOUKOPOULOS, A. et al. Measuring progress towards transport sustainability through indicators: Analysis and metrics of the main indicator initiatives. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 67, p. 316–333, fev. 2019. ISSN 13619209.

SEBASTIANI, M. T.; LUDERS, R.; FONSECA, K. V. O. Evaluating electric bus operation for a real-world BRT public transportation using simulation optimization. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 17, n. 10, p. 2777–2786, out. 2016. ISSN 1524-9050, 1558-0016.

SHAPIRO, R. J.; HASSETT, K. A.; ARNOLD, F. S. **Conserving Energy and Preserving the Environment: The Role of Public Transportation**. [*S.l.: s.n.*]: American Public Transportation Association, 2016.

SHARMA, S.; MATHEW, T. V. Multiobjective Network Design for Emission and Travel-Time Trade-off for a Sustainable Large Urban Transportation Network. **Environment and Planning B: Planning and Design**, v. 38, n. 3, p. 520–538, jun. 2011. ISSN 0265-8135, 1472-3417.

SHEFFI, Y. **Urban Transportation Networks: Equilibrium Analysis with Mathematical Programming Methods**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice-Hall, 1985. v. 6.

SI, B. et al. Modeling the congestion cost and vehicle emission within multimodal traffic network under the condition of equilibrium. **Journal of Systems Science and Systems Engineering**, v. 21, n. 4, p. 385–402, dez. 2012. ISSN 1004-3756, 1861-9576.

SILVA, D. R. R.; SUEMOTO, C. K.; GOUVEIA, N. Poluentes do ar como fator de risco para o desempenho cognitivo e demência. **Cadernos de Saúde Pública**, v. 35, n. 8, p. e00085919, 2019. ISSN 1678-4464, 0102-311X.

SIQUEIRA, E. D. L.; ARANTES, A. E. PRIORIZAÇÃO DE ROTAS DE ÔNIBUS PARA ELETRIFICAÇÃO NO MUNICÍPIO DE FORTALEZA BASEADO EM ANÁLISE

MULTICRITÉRIO E SIG. **GEOGRAFIA**, v. 48, n. 1, p. 1–30, maio 2023. ISSN 1983-8700, 0100-7912.

SLOCAT. **Transport and Climate Change Global Status Report 2018**. [*S.l.*], 2018.

_____. **Transport and Climate Change Global Status Report**. [*S.l.*], 2021. 365 p.

SOOKHAK, M. et al. Security and Privacy of Smart Cities: A Survey, Research Issues and Challenges. **IEEE Communications Surveys & Tutorials**, v. 21, n. 2, p. 1718–1743, 2019. ISSN 1553-877X, 2373-745X.

SORIGUERA, F.; Jiménez-Meroño, E. A continuous approximation model for the optimal design of public bike-sharing systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101826, jan. 2020. ISSN 22106707.

SPTRANS. **Eletrificação Da Frota - Preços de Veículos Elétricos Informados Pelos Fornecedores**. 2024.

_____. **Relatório Técnico – Aspectos Econômico-financeiros Do Sistema de Transporte Coletivo Público Do Município de São Paulo**. São Paulo, 2024.

SUN, B.; APLAND, J. Operational planning of public transit with economic and environmental goals: Application to the Minneapolis–St. Paul bus system. **Public Transport**, v. 11, n. 2, p. 237–267, ago. 2019. ISSN 1866-749X, 1613-7159.

TALBI, E.-G. **Metaheuristics: From Design to Implementation**. [*S.l.: s.n.*]: John Wiley & Sons, 2009. v. 74.

TELES, A. A. et al. Método para cálculo do consumo energético e da emissão de CO2 dos serviços de infraestrutura de transportes do SICRO: Análise comparativa entre pavimentos asfáltico e de concreto de cimento Portland. **TRANSPORTES**, v. 32, n. 2, maio 2024. ISSN 2237-1346.

TEOH, L. E. et al. Scenario-based electric bus operation: A case study of Putrajaya, Malaysia. **International Journal of Transportation Science and Technology**, v. 7, n. 1, p. 10–25, mar. 2018. ISSN 20460430.

TERESINA. Prefeitura Municipal, **Plano Diretor de Mobilidade Urbana Sustentável de Teresina – PDMUS**. 2021. Http://www.pdmus.pmt.pi.gov.br/?page_id=53.

The pandas development team. **Pandas-Dev/Pandas: Pandas**. 2025. Zenodo.

TOMASZEWSKA, E. J.; FLOREA, A. Urban smart mobility in the scientific literature — bibliometric analysis. **Engineering Management in Production and Services**, v. 10, n. 2, p. 41–56, jun. 2018. ISSN 2543-912X.

TOSO, S. A.; OJA, R. **Gtfs_functions**. 2024.

UFPA. Universidade Federal Do Pará, **Projeto de Mobilidade Elétrica Iniciado Na UFPA Completa Um Ano**. 2020. Https://www.ufpa.br/index.php/ultimas-noticias2/12205-projeto-de-mobilidade-eletrica-iniciado-na-ufpa-completa-um-ano.

United Nations. **Report of the World Commission on Environment and Development - Our Common Future**. [*S.l.*], 1987.

_____. **Agenda 21**. [*S.l.*], 1992.

_____. **Transforming Our World: The 2030 Agenda for Sustainable Development**. [*S.l.*], 2015.

_____. **World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities**. Nairobi, Kenya, 2022.

URBS. **Relatório Técnico Dos Testes Operacionais Do Chamamento Público Para a Demonstração de Ônibus Elétricos Em Curitiba. Edital 001/2022.** [*S.l.*], 2022.

_____. **Preço Dos Insumos e Salários.** Curitiba, 2024.

VELJKOVIĆ, N.; Bogdanović-Dinić, S.; STOIMENOV, L. Benchmarking open government: An open data perspective. **Government Information Quarterly**, v. 31, n. 2, p. 278–290, abr. 2014. ISSN 0740624X.

VIEIRA, J. P. B.; PEREIRA, R. H.; ANDRADE, P. R. Estimating public transport emissions from General Transit Feed Specification data. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 119, p. 103757, jun. 2023. ISSN 13619209.

VITÓRIA. Prefeitura Municipal, **Eixo Urbano-Ambiental - Mobilidade Urbana**. 2008. Https://m.vitoria.es.gov.br/download.php?tipo=1&id=507.

_____. Prefeitura Municipal, **GeoWeb Vitória**. 2023. Https://geoweb.vitoria.es.gov.br/.

WANG, R. et al. A Matching Model for Door-to-Door Multimodal Transit by Integrating Taxi-Sharing and Subways. **ISPRS International Journal of Geo-Information**, v. 10, n. 7, p. 469, jul. 2021. ISSN 2220-9964.

WANG, Y.; LIAO, F.; LU, C. Integrated optimization of charger deployment and fleet scheduling for battery electric buses. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 109, p. 103382, ago. 2022. ISSN 13619209.

WANG, Y. et al. Lifecycle Cost Optimization for Electric Bus Systems With Different Charging Methods: Collaborative Optimization of Infrastructure Procurement and Fleet Scheduling. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, p. 1–20, 2022. ISSN 1524-9050, 1558-0016.

WANG, Z. et al. A Heuristic Method for Bus Rapid Transit Planning Based on the Maximum Trip Service. **Sustainability**, v. 13, n. 11, p. 6325, jun. 2021. ISSN 2071-1050.

WASKOM, M. Seaborn: Statistical data visualization. **Journal of Open Source Software**, v. 6, n. 60, p. 3021, abr. 2021. ISSN 2475-9066.

WEI, D. et al. Dataflow Management in the Internet of Things: Sensing, Control, and Security. **Tsinghua Science and Technology**, Tsinghua University Press, v. 26, n. 6, p. 918–930, dez. 2021. ISSN 1007-0214.

WEI, R. et al. Optimizing the spatio-temporal deployment of battery electric bus system. **Journal of Transport Geography**, v. 68, p. 160–168, abr. 2018. ISSN 09666923.

WEN, Y. et al. Mapping dynamic road emissions for a megacity by using open-access traffic congestion index data. **Applied Energy**, v. 260, p. 114357, fev. 2020. ISSN 03062619.

WOODCOCK, J. et al. Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions: Urban land transport. **The Lancet**, v. 374, n. 9705, p. 1930–1943, dez. 2009. ISSN 01406736.

World Health Organization. **Global Status Report on Road Safety 2023**. 1st ed. ed. Geneva: World Health Organization, 2023. ISBN 978-92-4-008651-7.

XYLIA, M. et al. Impact of bus electrification on carbon emissions: The case of Stockholm. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 74–87, fev. 2019. ISSN 09596526.

_____. Locating charging infrastructure for electric buses in Stockholm. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 78, p. 183–200, maio 2017. ISSN 0968090X.

YAMIN, M. et al. An Innovative Method for Preserving Privacy in Internet of Things. **Sensors**, MDPI AG, v. 19, n. 15, p. 3355, jul. 2019. ISSN 1424-8220.

YANG, M. et al. Performance of the Priority Control Strategies for Bus Rapid Transit: Comparative Study from Scenario Microsimulation Using VISSIM. **Discrete Dynamics in Nature and Society**, v. 2013, p. 1–9, 2013. ISSN 1026-0226, 1607-887X.

YANG, Y. et al. Joint optimization of bimodal transit networks in a heterogeneous environment considering vehicle emissions. **Journal of Cleaner Production**, v. 373, p. 133859, nov. 2022. ISSN 09596526.

YAO, E. et al. Optimization of electric vehicle scheduling with multiple vehicle types in public transport. **Sustainable Cities and Society**, v. 52, p. 101862, jan. 2020. ISSN 22106707.

YE, J. et al. Joint optimisation of transfer location and capacity for a capacitated multimodal transport network with elastic demand: A bi-level programming model and paradoxes. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 156, p. 102540, dez. 2021. ISSN 13665545.

YE, Z. et al. Decarbonizing regional multi-model transportation system with shared electric charging hubs. **Transportation Research Part C: Emerging Technologies**, v. 144, p. 103881, nov. 2022. ISSN 0968090X.

ZANETI, L. A. et al. Sustainable charging schedule of electric buses in a University Campus: A rolling horizon approach. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 161, p. 112276, jun. 2022. ISSN 13640321.

ZHANG, H. et al. Mobile phone GPS data in urban bicycle-sharing: Layout optimization and emissions reduction analysis. **Applied Energy**, v. 242, p. 138–147, maio 2019. ISSN 03062619.

ZHANG, K. et al. Electric-bus charging stations multi-objective optimization planning on coupled power and traffic networks. **IET Intelligent Transport Systems**, p. itr2.12215, nov. 2022. ISSN 1751-956X, 1751-9578.

ZHANG, S.; CEDER, A. A.; CAO, Z. Integrated optimization for feeder bus timetabling and procurement scheme with consideration of environmental impact. **Computers & Industrial Engineering**, v. 145, p. 106501, jul. 2020. ISSN 03608352.

ZHOU, Y. et al. Bi-Objective Optimization for Battery Electric Bus Deployment Considering Cost and Environmental Equity. **IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems**, v. 22, n. 4, p. 2487–2497, abr. 2021. ISSN 1524-9050, 1558-0016.

ZIEGELDORF, J. H.; MORCHON, O. G.; WEHRLE, K. Privacy in the Internet of Things: Threats and challenges. **Security and Communication Networks**, Wiley, v. 7, n. 12, p. 2728–2742, dez. 2014. ISSN 1939-0114, 1939-0122.

ZUO, T.; WEI, H. Bikeway prioritization to increase bicycle network connectivity and bicycle-transit connection: A multi-criteria decision analysis approach. **Transportation Research Part A: Policy and Practice**, v. 129, p. 52–71, nov. 2019. ISSN 09658564.

A Apêndice A - Dados da revisão sistemática

Tabela A.1 – Estudos de otimização para planejamento e políticas de transporte sustentável, em ordem cronológica.

Referência	Modo de transporte	Variáveis de decisão	Funções objetivo	Restrições	Método de solução
Beltran et al. (2009)	Multimodal	Projeto de rede (rotas), definição de frequências, fluxos na rede multimodal	Minimizar os custos de operadores, de passageiros e externos	Equilíbrio de usuário na rede, capacidade dos ônibus, comprimento das rotas e a frequência de ônibus, tamanho da frota de veículos verdes e alocação de segmentos viários de alta qualidade ambiental somente para veículos verdes	Algoritmo heurístico de geração de rotas e algoritmo genético
Sharma e Mathew (2011)	Multimodal	Projeto de rede (implantação de segmento viário)	Minimiza os tempos de viagem e as emissões totais	Orçamento, volume de tráfego, conservação do fluxo	Uma versão melhorada do NSGA-II
Si et al. (2012)	Multimodal	Variáveis de políticas públicas	Minimizar os custos sociais (congestionamento e poluição ambiental) e os custos de viagem generalizados dos usuários	-	Diagonalização, técnicas de linearização e simplex
Khoo, Teoh e Meng (2014)	Multimodal	Projeto de rede (localização de corredores)	Minimizar o tempo médio de viagem	Número de faixas de rodagem, volume de tráfego, tempo	Simulação microscópica de tráfego e NSGA-II
Griswold et al. (2014)	Multimodal	Projeto de rede (localização de estações e rotas), definição de frequências	Minimizar custos de usuários e agências	Emissões	Métodos de aproximação
Meng et al. (2016)	Multimodal	Atribuição de tráfego multimodal	Minimizar custos generalizados de viagem (tempo de viagem, perda de conforto, tratamento da poluição e consumo de combustível)	Demanda de tráfego para cada modo, capacidade do link, emissão máxima de tráfego por pessoa, restrições de não negatividade	Otimização por enxame de partículas

(continua na próxima página)

Tabela A.1 – *(continuação)*

Referência	Modo de transporte	Variáveis de decisão	Funções objetivo	Restrições	Método de solução
Brozynski e Leibowicz (2018)	Multimodal	Tecnologia de redes de energia	Minimizar os custos	Capacidade da bateria, dinâmica de descarga/recarga	CPLEX
Qiang et al. (2018)	Multimodal	Estrutura de tráfego urbano de passageiros	Minimizar o consumo de energia	Emissões, eficiência do tráfego	Algoritmo de enxame de peixes artificiais (AFSA)
Haitao et al. (2019)	Multimodal	Projeto de rede (localização de corredores)	Maximizar o fluxo médio de passageiros	Demanda, conservação do fluxo, equilíbrio da frota, taxa de conclusão da viagem, área de serviço, capacidade dos veículos	Controladores Proporcional-Integral-Derivativos (PID)
Marseglia et al. (2019)	Multimodal	Projeto de rede (localização de corredores)	Maximizar a demanda atendida	Orçamento, demanda	Heurística GreCon (inserção construtiva gananciosa de bordas)
Doorley et al. (2020)	Multimodal	Projeto de rede (localização de ciclovias)	Maximizar o benefício social (uma função dos custos de viagem, custos de infraestrutura, impactos na saúde, colisões no trânsito e impactos ambientais)	Restrições de fluxo nos segmentos da rede e de equilíbrio do usuário	Algoritmo genético
Gao et al. (2020)	Multimodal	Gestão de tráfego	Minimizar o atraso na interseção	Prioridade do sistema de ônibus	Otimização restrita e simulação microscópica
Piazza et al. (2021)	Multimodal	Dimensionamento de rede de energia (potência e capacidade)	Maximizar o lucro anual	Interação com a rede de distribuição, tecnologia de painéis solares, capacidade de carga e energia da instalação, capacidade da bateria, dinâmica de descarga/recarga, demanda	Gurobi

(continua na próxima página)

Tabela A.1 – *(continuação)*

Referência	Modo de transporte	Variáveis de decisão	Funções objetivo	Restrições	Método de solução
Li e Lu (2021)	Multimodal	Estrutura de tráfego urbano de passageiros	Maximizar a utilidade do transporte, e minimizar o impacto ecológico e o custo generalizado	Demanda, energia, volume de tráfego, capacidade ambiental	Método de ponto ideal, método de ponderação linear e método de sequência em camadas
Ye et al. (2021)	Multimodal	Projeto de rede (localização e capacidade da estação)	Maximizar o número total de viagens geradas, minimizar as funções de equilíbrio do usuário estocástico	Orçamento, número de viagens geradas, capacidade da estação, conservação do fluxo, fluxo de ligação e fluxo do caminho	Programação linear sucessiva (SLP)
Almasi et al. (2021)	Multimodal	Projeto de rede (rotas), definição de frequências e aspectos operacionais (tempo de permanência)	Minimizar os custos de passageiros, custos de operador e custos de demanda não atendida	Comprimento da rota, fator de carga, frequência, tamanho da frota, número de rotas	Algoritmo genético e NSGA-II
Wang et al. (2021)	Multimodal	Projeto de rede (localização de estações)	Maximizar a economia de quilometragem dos veículos	Atribuição de passageiros	Gurobi
Ye et al. (2022)	Multimodal	Projeto de rede (localização da instalação de recarga)	Minimiza as emissões de GEE	Capacidade de operação / autonomia da bateria, estado da carga, número de carregadores em uma instalação, potência de recarga da instalação, orçamento	Gurobi
Yang et al. (2022)	Multimodal	Projeto de rede (localização de estações e rotas), definição de frequências	Minimizar o custo generalizado por hora (custos de usuário, operador e emissão)	Capacidade do veículo	Abordagem sucessiva de soluções de substituição
Jánošíková et al. (2012)	Ônibus	Projeto de rede (rotas), definição de frequências	Minimizar tempos de viagem, quilometragem percorrida por todos os veículos e o total de emissões	Capacidade e número de veículos, satisfação da demanda, conservação do fluxo, frequência máxima das linhas	Escalarização de norma de Tchebycheff

(continua na próxima página)

Tabela A.1 – *(continuação)*

Referência	Modo de transporte	Variáveis de decisão	Funções objetivo	Restrições	Método de solução
Gouge, Dowlatabadi e Ries (2013)	Ônibus	Programação do cronograma dos ônibus e alocação da frota	Minimizar o consumo total de PM2.5, o comprometimento de aquecimento global ou o total de emissões	Número máximo de ônibus, restrições de rota	CPLEX
Ribau, Silva e Sousa (2014)	Ônibus	Projeto de veículo	Minimizar o custo do veículo, o consumo de combustível e as emissões de CO2 do ciclo de vida	Aspectos operacionais (aceleração, velocidade), capacidade de operação / autonomia da bateria	Algoritmo genético e NSGA-II
Ercan et al. (2015)	Ônibus	Composição da frota de ônibus	Minimizar os custos do ciclo de vida, as emissões de CO2 e outros custos de danos à saúde e ao meio ambiente relacionados às emissões de poluentes atmosféricos	Frota	Simplex
Ceder, Butcher e Wang (2015)	Ônibus	Projeto de rede (localização de estações)	Minimizar os custos de operação e de acesso do usuário	Cobertura de pontos de demanda, atribuição de pares de parada a pares de demanda	Algoritmo evolutivo e CPLEX
Jiménez e Román (2016)	Ônibus	Alocação da frota	Minimizar a emissão de poluentes	Número total de veículos, veículos atribuídos por tipo e por rota	CPLEX
Sebastiani, Luders e Fonseca (2016)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga)	Minimizar o número de estações de recarga e o tempo médio de parada extra	Estado da carga, número de ônibus e paradas de ônibus autorizadas a ter uma estação de carga	NSGA-II
Liu e Song (2017)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de carga), projeto de veículo	Minimiza o custo total das baterias e das instalações de recarga	Capacidade e potência de recarga da instalação, taxa de consumo de energia	CPLEX
Xylia et al. (2017)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga e rotas)	Minimizar os custos totais, o consumo total de energia da rede de ônibus e o total de emissões anuais	Capacidade de operação / autonomia da bateria	CPLEX

(continua na próxima página)

Tabela A.1 – *(continuação)*

Referência	Modo de transporte	Variáveis de decisão	Funções objetivo	Restrições	Método de solução
Bi, Keoleian e Ersal (2018)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga)	Minimizar os custos do ciclo de vida e as emissões de GEE; minimizar os custos do ciclo de vida e o consumo de energia	Estado da carga, número de carregadores em uma instalação, capacidade da bateria, demanda de energia e taxa de consumo	Algoritmo genético
Wei et al. (2018)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga)	Minimizar os custos de compra de veículos e de construção das estações de recarga	Capacidade de operação / autonomia da bateria, dinâmica de descarga/recarga	Gurobi
Ribau, Vieira e Silva (2018)	Ônibus	Projeto de veículo	Minimizar as emissões de CO2 do ciclo de vida e maximizar os aspectos financeiros	Aspectos operacionais (aceleração, velocidade), capacidade de operação / autonomia da bateria	NSGA-II e algoritmo de evolução diferencial multiobjetivo de poda esférica (spMODE-II)
Sun e Apland (2019)	Ônibus	Programação do cronograma dos ônibus	Minimizar os custos operacionais, os critérios de desempenho específicos de tempo e área e os níveis de emissão	Restrições de recursos de ônibus, capacidade operacional, restrições de atributos de serviço, critérios gerais de desempenho, critérios de desempenho específicos de tempo e área	OSICPLEX
Xylia et al. (2019)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga)	Minimizar os custos totais, o consumo total de energia da rede de ônibus e o total de emissões anuais	Capacidade de operação / autonomia da bateria	CPLEX
Duran, Pradenas e Parada (2019)	Ônibus	Projeto de rede (rotas), definição de frequências	Minimizar o tempo total de viagem e as emissões de CO2	Capacidade da rede, número de veículos, frequência, demanda, tempos de espera	Algoritmo Genético Multi-objetivo (MGA)

(continua na próxima página)

Tabela A.1 – *(continuação)*

Referência	Modo de transporte	Variáveis de decisão	Funções objetivo	Restrições	Método de solução
Iliopoulou et al. (2019)	Ônibus	Projeto de rede (rotas, localização da instalação de recarga)	Minimizar os custos do usuário (tempo médio de viagem e satisfação da demanda dos passageiros) (nível superior) e o número de carregadores rápidos (nível inferior)	Número mínimo e máximo de nós por rota, número máximo de rotas (nível superior), tempo de carregamento, carga inicial da bateria, balanço de energia, carga de energia (nível inferior)	Otimização por enxame de partículas (multi-objetivo)
Abdelwahed et al. (2020)	Ônibus	Cronograma de recarga	Minimizar os custos de recarga	Estado da carga, potência e capacidade de carga da instalação	CPLEX
Zhang, Ceder e Cao (2020)	Ônibus	Esquema de aquisição de veículos, dimensionamento da frota, determinação de frequências, programação do cronograma dos ônibus e alocação da frota	Minimizar o custo do operador (custo operacional e penalidades por poluição emitida) e o custo do tempo de espera dos usuários	Orçamento, satisfação da demanda, limite máximo de frequência, tamanho da frota e capacidade do veículo	Algoritmo genético
Yao et al. (2020)	Ônibus	Programação do cronograma dos ônibus	Minimizar os custos totais anuais de programação dos ônibus (incluindo o custo de compra de EBs, o custo operacional de viagens programadas e deslocamentos até as garagens)	Capacidade de operação / autonomia da bateria, alocação das recargas entre viagens programadas, capacidade das instalações de recarga	Algoritmo genético
Moon et al. (2020)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga)	Minimizar o número de instalações de recarga	Número de instalações de recarga, rota	Técnicas de geração de colunas
Ifaei et al. (2020)	Ônibus	Tecnologia de redes de energia	Minimizar o custo anual total dos painéis solares e da potência específica do veículo	Ângulo de ataque dos painéis solares, aceleração, massa, coeficiente de atrito, grau de estrada, velocidade do vento de proa, velocidade média, albedo terrestre, transmitância solar	NSGA-II

(continua na próxima página)

Tabela A.1 – *(continuação)*

Referência	Modo de transporte	Variáveis de decisão	Funções objetivo	Restrições	Método de solução
Elkamel et al. (2021)	Ônibus	Cronograma de geração de energia	Maximizar o lucro	Capacidade de carga e energia da instalação, modelagem de sistemas de trânsito pessoal	Decomposição de Benders e técnicas de relaxação linear
Nguyen e Jung (2021)	Ônibus	Gestão de tráfego	Minimizar o consumo de combustível	-	Algoritmo baseado na inteligência do enxame de formigas
Zhou et al. (2021)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga)	Maximizar a equidade ambiental	Capacidade de operação / autonomia da bateria, número de carregadores em uma instalação, orçamento	Gurobi
Wang et al. (2021)	Ônibus	Projeto de rede (localização de estações e rotas)	Maximizar a demanda atendida	Distância entre as estações, orçamento	Método heurístico
Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021)	Ônibus	Projeto de rede (rotas), definição de frequências	Minimizar os custos operacionais e externos	Frequência, capacidade do veículo, número de estações de carga, número de rotas, orçamento, capacidade de operação / autonomia da bateria, dinâmica de descarga/recarga	Algoritmo de busca de cucos
Manzolli, Trovão e Antunes (2022)	Ônibus	Cronograma de recarga	Minimizar os custos diários de operação	Rota, capacidade da bateria	CPLEX
Zaneti et al. (2022)	Ônibus	Cronograma de recarga	Minimizar os custos de operação	Capacidade e energia de recarga da instalação, atribuição de recarga da instalação, restrições da rede, estado da carga, dinâmica de descarga/carga, tamanho e capacidade da bateria	Abordagem dinâmica baseada em um método de horizonte rolante
Zhang et al. (2022)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga)	Maximizar o fluxo de tráfego e minimizar o custo total; minimizar as perdas na rede e o desvio de tensão	Poder de carga da instalação, número de instalações de recarga, fator de congestionamento	NSGA-II

(continua na próxima página)

Tabela A.1 – *(continuação)*

Referência	Modo de transporte	Variáveis de decisão	Funções objetivo	Restrições	Método de solução
Wang, Liao e Lu (2022)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga), programação de ônibus	Minimizar os custos anuais	Capacidade da bateria, demanda e taxa de consumo de energia, estado de carga, programação da frota	Gurobi
Wang et al. (2022)	Ônibus	Projeto de rede (localização da instalação de recarga), programação de ônibus	Minimizar os custos de ciclo de vida	Tarifação da instalação, número de veículos, energia	Híbrido TS-IGA (pesquisa tabu - algoritmo genético imune)
Gairola e Nezamuddin (2022)	Ônibus	Projeto de rede (rotas, localização e capacidade das instalações de recarga), dimensionamento da frota, projeto de veículo	Maximizar a quilometragem de veículos eletrificados	Orçamento, tamanho da bateria e carregadores rápidos, capacidade da bateria, número de carregadores em uma instalação	CPLEX

Fonte: Autora (2025).

Tabela A.2 – Tipos de dados de entrada utilizados em estudos de otimização para planejamento de transporte sustentável.

Tipo de parâmetros	Referências
Demanda	Almasi et al. (2021), Brozynski e Leibowicz (2018), Duran, Pradenas e Parada (2019), Griswold et al. (2014), Haitao et al. (2019), Ifaei et al. (2020), Li e Lu (2021), Marseglia et al. (2019), Nguyen e Jung (2021), Piazza et al. (2021), Qiang et al. (2018), Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021), Sharma e Mathew (2011), Wang et al. (2021), Wang, Liao e Lu (2022), Wang et al. (2022), Ye et al. (2021)
Rede de transporte (estações)	Moon et al. (2020), Zhou et al. (2021)
Rede de transporte (rotas, corredores de ônibus, ciclovias)	Gao et al. (2020), Ifaei et al. (2020), Khoo, Teoh e Meng (2014), Liu e Song (2017), Marseglia et al. (2019), Moon et al. (2020), Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021), Si et al. (2012), Wang et al. (2021), Wang et al. (2021), Wang et al. (2022), Wei et al. (2018), Yang et al. (2022), Zhou et al. (2021)
Frota / dados de operação	Almasi et al. (2021), Brozynski e Leibowicz (2018), Elkamel et al. (2021), Ifaei et al. (2020), Khoo, Teoh e Meng (2014), Li e Lu (2021), Liu e Song (2017), Manzolli, Trovão e Antunes (2022), Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021), Wang et al. (2021), Wang, Liao e Lu (2022), Wang et al. (2022), Yang et al. (2022), Zaneti et al. (2022)
Rede viária	Duran, Pradenas e Parada (2019), Haitao et al. (2019), Khoo, Teoh e Meng (2014), Liu e Song (2017), Marseglia et al. (2019), Nguyen e Jung (2021), Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021), Sharma e Mathew (2011), Si et al. (2012), Wang et al. (2021), Wang et al. (2021), Yang et al. (2022), Ye et al. (2021), Zhang et al. (2022), Zhou et al. (2021)
Rede de energia (locais de recarga, etc)	Abdelwahed et al. (2020), Bi, Keoleian e Ersal (2018), Brozynski e Leibowicz (2018), Elkamel et al. (2021), Ifaei et al. (2020), Liu e Song (2017), Piazza et al. (2021), Ribau, Silva e Sousa (2014), Ribau, Vieira e Silva (2018), Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021), Wang, Liao e Lu (2022), Wang et al. (2022), Wei et al. (2018), Zaneti et al. (2022), Zhang et al. (2022), Zhou et al. (2021)
Dados de uso do solo	Griswold et al. (2014), Li e Lu (2021), Moon et al. (2020), Qiang et al. (2018), Wang et al. (2021), Zhou et al. (2021)
Dados de veículos	Abdelwahed et al. (2020), Almasi et al. (2021), Bi, Keoleian e Ersal (2018), Brozynski e Leibowicz (2018), Elkamel et al. (2021), Gairola e Nezamuddin (2022), Gao et al. (2020), Griswold et al. (2014), Ifaei et al. (2020), Liu e Song (2017), Manzolli, Trovão e Antunes (2022), Moon et al. (2020), Piazza et al. (2021), Qiang et al. (2018), Ribau, Silva e Sousa (2014), Ribau, Vieira e Silva (2018), Sadeghi, Aghayan e Ghaznavi (2021), Wang et al. (2021), Wang, Liao e Lu (2022), Wang et al. (2022), Wei et al. (2018), Ye et al. (2022), Zaneti et al. (2022), Zhou et al. (2021)
Custos / orçamento	Bi, Keoleian e Ersal (2018), Brozynski e Leibowicz (2018), Elkamel et al. (2021), Gairola e Nezamuddin (2022), Griswold et al. (2014), Manzolli, Trovão e Antunes (2022), Ribau, Silva e Sousa (2014), Sharma e Mathew (2011), Si et al. (2012), Wang et al. (2021), Wang, Liao e Lu (2022), Wang et al. (2022), Wei et al. (2018), Ye et al. (2021), Ye et al. (2022), Zhou et al. (2021)
Ambientais	Brozynski e Leibowicz (2018), Griswold et al. (2014), Li e Lu (2021), Liu e Song (2017), Nguyen e Jung (2021), Qiang et al. (2018), Ribau, Vieira e Silva (2018), Sharma e Mathew (2011), Si et al. (2012), Yang et al. (2022), Ye et al. (2022)

Fonte: Autora (2025).

B Apêndice B - Proporção média de seleção de rotas no modelo de otimização

Tabela B.1 – Proporção média de seleção de rotas

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
1	719	Convencional	20,49	0,61
2	4111	Convencional	33,85	0,48
3	4110	Convencional	44,97	0,62
4	S19	Suplementar	9,88	0,41
5	4113	Convencional	29,89	0,28
6	8350	Convencional	41,63	0,00
7	813	Convencional	16,95	0,71
8	9101	Convencional	25,41	0,61
9	812	Convencional	8,91	0,51
10	710	Convencional	6,47	0,41
11	811	Convencional	16,19	0,51
12	810	Convencional	11,92	0,47
13	9106	Convencional	26,65	0,66
14	2103	Convencional	21,78	0,55
15	9105	Convencional	28,11	0,37
16	2102	Convencional	21,92	0,59
17	9104	Convencional	21,20	0,64
18	2101	Convencional	25,90	0,64
19	815	Convencional	21,69	0,84
20	9103	Convencional	16,36	0,47
21	814	Convencional	17,12	0,66
22	S10	Suplementar	47,64	0,75
23	2104	Convencional	46,06	0,78
24	9410	Convencional	27,46	0,44
25	5102	Convencional	29,29	0,62
26	9414	Convencional	38,89	0,66
27	5106	MOVE	45,83	0,86
28	9412	Convencional	37,21	0,79
29	9411	Convencional	40,55	0,82
30	5104	Convencional	30,69	0,49
31	8101	MOVE	24,25	0,53
32	3503A	Convencional	53,90	0,93
33	9415	Convencional	25,42	0,55

(continua na próxima página)

Tabela B.1 – *(continuação)*

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
34	5107	MOVE	27,00	0,41
35	1145	Convencional	33,08	0,58
36	8103	Convencional	26,13	0,47
37	8102	Convencional	21,97	0,73
38	9034	Convencional	17,64	0,58
39	8108	Convencional	20,86	0,53
40	1505R	Convencional	29,38	0,74
41	8107	Convencional	19,26	0,62
42	8106	Convencional	41,10	0,79
43	5201	MOVE	46,19	0,36
44	5203	Convencional	60,30	0,65
45	83D	MOVE	16,32	0,16
46	9403	Convencional	25,80	0,71
47	9402	Convencional	27,34	0,62
48	8203	Convencional	42,83	0,68
49	9407	Convencional	34,31	0,65
50	9405	Convencional	23,80	0,59
51	8208	Convencional	35,78	0,59
52	9404	Convencional	22,97	0,48
53	9032	Convencional	24,33	0,63
54	8207	Convencional	47,05	0,76
55	9030	Convencional	28,93	0,00
56	8205	Convencional	41,06	0,60
57	9408	Convencional	25,79	0,67
58	83P	MOVE	16,38	0,63
59	8551	MOVE	14,00	0,53
60	5503A	Convencional	25,65	0,00
61	8001A	Convencional	37,11	0,64
62	8550	MOVE	39,06	0,50
63	4405	Convencional	28,78	0,65
64	832	Convencional	23,85	0,56
65	838	Convencional	11,83	0,54
66	837	Convencional	20,10	0,00
67	836	Convencional	16,91	0,00
68	5503B	Convencional	28,07	0,60
69	5502C	Convencional	32,71	0,68
70	4802A	Convencional	44,85	0,00
71	901	Convencional	32,54	0,80

(continua na próxima página)

Tabela B.1 – *(continuação)*

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
72	903	Convencional	11,30	0,48
73	902	Convencional	4,87	0,49
74	4201	Convencional	34,94	0,72
75	4205	Convencional	32,48	0,43
76	4801A	Convencional	43,43	0,63
77	S70	Suplementar	41,55	0,45
78	5401	MOVE	42,74	0,52
79	82	MOVE	20,66	0,24
80	806	Convencional	18,67	0,63
81	85	MOVE	18,06	0,35
82	809	Convencional	19,09	0,66
83	4103	Convencional	28,87	0,60
84	808	Convencional	22,68	0,67
85	4102	Convencional	23,80	0,61
86	807	Convencional	23,14	0,58
87	4108	Convencional	24,88	0,52
88	4107	Convencional	25,78	0,29
89	3301B	Convencional	30,85	0,65
90	4106	Convencional	17,59	0,44
91	3301A	Convencional	34,96	0,76
92	9550	Convencional	47,02	0,67
93	S61	Suplementar	22,04	0,36
94	S60	Suplementar	25,92	0,50
95	S65	Suplementar	29,47	0,44
96	S64	Suplementar	23,47	0,36
97	S63	Suplementar	24,06	0,32
98	S66	Suplementar	34,98	0,34
99	4501	Convencional	44,83	0,65
100	SC02A	Convencional	11,03	0,33
101	5550	MOVE	30,71	0,69
102	535	Convencional	27,44	0,70
103	SC01R	Convencional	11,13	0,39
104	S92	Suplementar	46,95	0,36
105	8401	Convencional	32,82	0,64
106	3501A	Convencional	41,44	0,82
107	8405	Convencional	30,21	0,51
108	3501B	Convencional	39,62	0,65
109	SC01B	Convencional	12,20	0,43

(continua na próxima página)

Tabela B.1 – *(continuação)*

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
110	SC01A	Convencional	13,66	0,51
111	533	Convencional	24,55	0,56
112	3502	Convencional	43,44	0,67
113	3030	Convencional	33,09	0,00
114	S80	Suplementar	46,35	0,45
115	S85	Suplementar	13,41	0,40
116	S84	Suplementar	29,30	0,52
117	342	Convencional	21,24	0,61
118	341	Convencional	31,59	0,81
119	340	Convencional	17,84	0,64
120	9502	Convencional	42,38	0,73
121	9501	Convencional	31,57	0,75
122	626	Convencional	15,20	0,39
123	625	Convencional	9,91	0,50
124	3150	Convencional	45,84	0,00
125	624	Convencional	9,64	0,51
126	338	Convencional	23,64	0,47
127	623	Convencional	10,28	0,66
128	337	Convencional	11,76	0,51
129	9503	Convencional	42,78	0,83
130	627	Convencional	11,65	0,45
131	107	Convencional	4,46	0,40
132	3302D	Convencional	39,95	0,00
133	3302B	Convencional	36,37	0,70
134	3302A	Convencional	37,51	0,73
135	8151	Convencional	55,88	0,00
136	8150	Convencional	24,59	0,52
137	332	Convencional	20,80	0,81
138	331	Convencional	8,95	0,63
139	330	Convencional	17,92	0,78
140	1510	Convencional	43,55	0,53
141	622	Convencional	9,40	0,41
142	3029	Convencional	49,86	0,70
143	621	Convencional	10,84	0,60
144	336	Convencional	10,19	0,53
145	1505	Convencional	44,03	0,74
146	101	Convencional	11,16	0,40
147	620	Convencional	11,74	0,48

(continua na próxima página)

Tabela B.1 – *(continuação)*

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
148	335	Convencional	14,50	0,61
149	615	Convencional	18,45	0,00
150	614	Convencional	14,71	0,55
151	105	Convencional	5,32	0,36
152	1509	Convencional	47,93	0,66
153	104	Convencional	8,62	0,35
154	103	Convencional	7,46	0,40
155	619	Convencional	15,44	0,66
156	102	Convencional	9,46	0,44
157	618	Convencional	15,70	0,53
158	617	Convencional	20,11	0,50
159	616	Convencional	18,44	0,57
160	3052	Convencional	27,83	0,60
161	3051	Convencional	45,95	0,84
162	3050	Convencional	41,79	0,00
163	740	Convencional	5,92	0,50
164	736	Convencional	6,81	0,43
165	735	Convencional	7,37	0,54
166	3055	Convencional	41,43	0,00
167	734	Convencional	8,60	0,44
168	3054	Convencional	32,20	0,76
169	3053	Convencional	33,24	0,00
170	504	Convencional	23,43	0,53
171	739	Convencional	14,24	0,50
172	503	Convencional	21,61	0,62
173	738	Convencional	14,42	0,51
174	1502	Convencional	42,90	0,91
175	737	Convencional	11,79	0,51
176	506	Convencional	21,87	0,46
177	1170	Convencional	16,80	0,49
178	30	Convencional	31,72	0,00
179	646	Convencional	27,95	0,50
180	645	Convencional	11,01	0,54
181	35	Convencional	33,04	0,00
182	33	Convencional	31,76	0,00
183	32	Convencional	27,54	0,00
184	732	Convencional	12,18	0,60
185	9250	Convencional	58,33	0,85

(continua na próxima página)

Tabela B.1 – *(continuação)*

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
186	S32	Suplementar	31,87	0,28
187	S31	Suplementar	22,13	0,36
188	640	Convencional	13,38	0,64
189	6031	MOVE	37,75	0,56
190	6030	MOVE	45,34	0,56
191	S33	Suplementar	31,87	0,50
192	644	Convencional	16,64	0,63
193	8501	Convencional	50,77	0,00
194	643	Convencional	12,61	0,51
195	642	Convencional	19,89	0,61
196	641	Convencional	11,26	0,38
197	637	Convencional	15,66	0,67
198	64	MOVE	41,10	0,00
199	636	Convencional	12,22	0,42
200	635	Convencional	12,57	0,55
201	63	MOVE	30,33	0,00
202	634	Convencional	15,66	0,56
203	62	MOVE	38,68	0,00
204	305	Convencional	9,79	0,60
205	61	MOVE	32,12	0,00
206	304	Convencional	7,33	0,48
207	406	Convencional	19,64	0,60
208	68	MOVE	26,22	0,58
209	639	Convencional	30,66	0,70
210	67	MOVE	36,38	0,00
211	638	Convencional	9,68	0,68
212	309	Convencional	12,29	0,53
213	66	MOVE	34,40	0,43
214	65	MOVE	28,19	0,00
215	308	Convencional	10,89	0,47
216	5036	Convencional	27,68	0,58
217	5035	Convencional	32,39	0,00
218	5034	Convencional	28,49	0,70
219	3350	Convencional	11,36	0,53
220	5033	Convencional	30,99	0,52
221	1404A	Convencional	51,00	0,00
222	S21	Suplementar	27,22	0,30
223	S20	Suplementar	31,36	0,36

(continua na próxima página)

Tabela B.1 – *(continuação)*

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
224	1404C	Convencional	48,30	0,84
225	9801	Convencional	32,95	0,59
226	4150	Convencional	37,12	0,64
227	S22	Suplementar	22,68	0,34
228	633	Convencional	11,21	0,48
229	303	Convencional	5,63	0,51
230	631	Convencional	12,55	0,51
231	9805	Convencional	23,47	0,60
232	302	Convencional	8,15	0,48
233	301	Convencional	7,30	0,54
234	402	Convencional	4,81	0,47
235	401	Convencional	7,00	0,56
236	52	MOVE	18,37	0,36
237	51	MOVE	25,66	0,54
238	50	MOVE	20,65	0,00
239	208	Convencional	19,39	0,58
240	206	Convencional	16,82	0,60
241	205	Convencional	15,59	0,56
242	2033	Convencional	19,67	0,53
243	703	Convencional	9,72	0,53
244	3250	Convencional	22,43	0,66
245	5250	MOVE	37,73	0,55
246	702	Convencional	13,55	0,58
247	S54	Suplementar	32,50	0,55
248	S53	Suplementar	46,58	0,23
249	707	Convencional	12,17	0,51
250	209	Convencional	5,58	0,53
251	706	Convencional	9,65	0,54
252	2036	Convencional	21,18	0,57
253	705	Convencional	11,56	0,46
254	2035	Convencional	27,12	0,58
255	2034	Convencional	20,37	0,49
256	513	Convencional	20,44	0,50
257	S56	Suplementar	46,83	0,29
258	S55	Suplementar	37,10	0,48
259	709	Convencional	12,32	0,51
260	708	Convencional	13,20	0,61
261	329	Convencional	13,42	0,61

(continua na próxima página)

Tabela B.1 – *(continuação)*

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
262	328	Convencional	17,56	0,47
263	327	Convencional	12,09	0,64
264	326	Convencional	12,87	0,58
265	204	Convencional	5,78	0,48
266	203	Convencional	7,41	0,42
267	202	Convencional	10,73	0,47
268	201	Convencional	9,15	0,47
269	4031	Convencional	40,81	0,85
270	511	Convencional	7,47	0,56
271	4034	Convencional	35,23	0,67
272	510	Convencional	20,52	0,60
273	4033	Convencional	29,92	0,56
274	4032	Convencional	23,52	0,58
275	S41	Suplementar	24,70	0,37
276	4037	Convencional	23,78	0,64
277	321	Convencional	5,43	0,53
278	325	Convencional	11,16	0,64
279	6350	MOVE	55,85	0,00
280	9211	Convencional	36,40	0,80
281	9210	Convencional	18,24	0,45
282	318	Convencional	19,91	0,65
283	315	Convencional	6,08	0,56
284	608	Convencional	33,76	0,83
285	SC04B	Convencional	10,97	0,46
286	607	Convencional	20,00	0,71
287	SC04A	Convencional	7,89	0,52
288	319	Convencional	5,23	0,48
289	609	Convencional	24,88	0,62
290	310	Convencional	12,13	0,64
291	314	Convencional	14,45	0,65
292	9201	Convencional	29,00	0,58
293	313	Convencional	5,44	0,57
294	311	Convencional	14,77	0,66
295	9205	Convencional	36,51	0,73
296	9204	Convencional	31,65	0,43
297	9202	Convencional	35,30	0,88
298	SC03A	Convencional	11,71	0,54
299	9209	Convencional	17,06	0,59

(continua na próxima página)

Tabela B.1 – ***(continuação)***

ID rota	Rota	Sistema de transporte	Extensão da rota [km]	Proporção média de seleção
300	9208	Convencional	29,86	0,52
301	2150	Convencional	17,73	0,41
302	9206	Convencional	41,74	0,69
303	823	Convencional	19,74	0,84
304	2152	Convencional	23,48	0,50
305	822	Convencional	21,99	0,72
306	721	Convencional	19,35	0,00
307	2151	Convencional	28,13	0,34
308	821	Convencional	11,19	0,52
309	720	Convencional	13,66	0,55
310	714	Convencional	16,31	0,00
311	826	Convencional	2,03	0,50
312	713	Convencional	11,35	0,46
313	1030	Convencional	10,02	0,33
314	825	Convencional	18,42	0,66
315	712	Convencional	11,03	0,54
316	711	Convencional	16,02	0,46
317	718	Convencional	13,88	0,52
318	717	Convencional	15,14	0,52
319	716	Convencional	10,67	0,53
320	5506A	Convencional	32,96	0,62
321	715	Convencional	17,61	0,00

Fonte: Autora (2025).