

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

GABRIEL AMBRÓSIO VARGAS

**Análise dos aspectos energéticos de uma frota de ônibus elétricos: infraestrutura de recarga, modelagem de carga e contratação de energia**

Campinas,

2023

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL, ARQUITETURA E URBANISMO

GABRIEL AMBRÓSIO VARGAS

**Análise dos aspectos energéticos de uma frota de ônibus elétricos: infraestrutura de recarga, modelagem de carga e contratação de energia**

Trabalho Final de Curso apresentado como requisito parcial para obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Civil** à Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo da Universidade Estadual de Campinas.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Luiz Francato

Campinas,

2023

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Rose Meire da Silva - CRB 8/5974

V426a Vargas, Gabriel Ambrósio, 2000-  
Análise dos aspectos energéticos de uma frota de ônibus elétricos :  
infraestrutura de recarga, modelagem de carga e contratação de energia / Gabriel  
Ambrósio Vargas. – Campinas, SP : [s.n.], 2023.

Orientador: Alberto Luiz Francato.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Estadual de  
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo.

1. Ônibus elétricos. 2. Veículos elétricos - Abastecimento de Energia. 3.  
Carregamento (bateria). 4. Energia Elétrica - Custos. 5. Energia Elétrica- Custo  
Operacional. I. Francato, Alberto Luiz, 1969-. II. Universidade Estadual de  
Campinas. Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo. III. Título.

Informações adicionais, complementares

**Título em outro idioma:** Analysis of the energy aspects of an electric bus fleet:: charging  
infrastructure, load modeling and energy procurement

**Palavras-chave em inglês:**

Electric vehicles

Electric vehicles - Energy supply

Charging (battery)

Electrical energy - Costs

Electrical energy - Operational cost

**Área de concentração:** Recursos Hídricos, Energéticos e Ambientais

**Titulação:** Bacharel em Engenharia Civil

**Banca examinadora:**

Tiago Zenker Gireli

Vinícius de Carvalho Neiva Pinheiro

**Data de entrega do trabalho definitivo:** 26-06-2023

**Análise dos aspectos energéticos de uma frota de ônibus elétricos:  
infraestrutura de recarga, modelagem de carga e  
contratação de energia**

GABRIEL AMBRÓSIO VARGAS

BANCA EXAMINADORA

.....  
Prof. Dr. Alberto Luiz Francato  
Orientador

.....  
Prof. Dr. Tiago Zenker Gireli

.....  
Prof. Dr. Vinícius de Carvalho Neiva Pinheiro

Aprovado em: 26 de junho de 2023

## **Agradecimentos**

Primeiramente tenho que agradecer à minha família, pois simplesmente não seria nada do que sou sem eles. Em especial aos meus pais e irmã, Ricardo, Cecília e Ana Clara. Agradeço também àquela que tenho a sorte de ter ao meu lado sempre me apoiando, Júlia. E a todos os amigos que certamente tornaram o caminho muito mais feliz e com total produtividade.

Por fim, a todos os professores que tive a grande oportunidade de ter como grandes guias nesta época tão importante em minha vida, com especial menção ao Prof. Dr. Alberto Luiz Francato, que depois de ótimas disciplinas, abriu-me a oportunidade para a realização deste projeto para o encerramento de especial ciclo.

## Resumo

Segundo dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas das Nações Unidas (2022), o setor de transporte corresponde a 15% das emissões globais de gases do efeito estufa, proporção ainda maior quando observamos de forma isolada os centros urbanos. Para isso, a eletrificação do transporte público oferece uma solução livre de emissões, sem poluição sonora e que oferece maior qualidade para os usuários, potencializando sua atratividade e impacto. Não à toa muitos governos têm tratado o tema como prioridade na transição rumo um setor de transportes limpo, via eletrificação geral de frotas. Contudo, desafios antes inexistentes agora devem ser tratados já na fase de planejamento de projeto para o desenho de uma solução eficiente e de sucesso. A partir da elaboração de um modelo computacional adaptável a projetos da realidade brasileira, o presente estudo analisa de forma integrada os aspectos energéticos (dimensionamento da infraestrutura de recarga e contratação de energia elétrica) envolvidos na estruturação de um projeto de transporte público de ônibus elétricos para evidenciar fatores passíveis de importantes otimizações para a viabilidade da solução a partir do planejamento estratégico prévio. Em estudo de caso ilustrativo foi demonstrado que aplicando a metodologia desenvolvida sobre as variáveis determinantes, é possível obter solução com redução de 86% no número de pontos recarga necessários, 60% na necessidade de demanda contratada e de 71% nos custos mensais de energia.

**Palavras-chave:** Ônibus elétricos, Infraestrutura de recarga, Contratação de energia

## **Abstract**

According to data from the Intergovernmental Panel on Climate Change of the United Nations (2022), the transportation sector accounts for 15% of global greenhouse gas emissions, a proportion that is even higher when considering urban centers separately. The electrification of public transportation offers an emissions-free solution, without noise pollution, and provides better service levels for users, potentializing its attractiveness and impact. Nonetheless many governments have made it a priority in the transition towards a clean transportation sector with widespread vehicle electrification. However, previously non-existent challenges must now be addressed as soon as in the project planning phase to design an efficient and successful solution. Through the development of a computational model designed to fit the peculiarities of Brazilian e-bus projects, this study analyzes the energy aspects (charging infrastructure and electricity procurement) involved in the structuring of a public transportation project of electric buses to highlight the factors that can be optimized to ensure the viability of the solution through strategic planning. In an illustrative case study, it was demonstrated that by applying the developed methodology to the determining variables, it is possible to achieve a solution with an 86% reduction in the required number of charging points, a 60% reduction in the required electricity contracted demand, and an 71% reduction in monthly energy costs.

**Keywords:** Electric buses, Charging infrastructure, Energy purchase agreements

## Sumário

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO.....</b>	<b>08</b>
1.1	REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA CIENTÍFICA .....	09
1.2	JUSTIFICATIVA DE PESQUISA.....	11
1.3	OBJETIVOS.....	11
1.3.1	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	11
<b>2</b>	<b>CONTEXTO DA ELETRIFICAÇÃO DE FROTAS .....</b>	<b>12</b>
2.1	CONTEXTO GLOBAL.....	13
2.2	CONTEXTO BRASIL .....	18
2.2.1	REGULAÇÃO .....	17
2.2.2	PROJETOS EXISTENTES .....	19
2.2.3	SETOR PRIVADO .....	22
2.3.3.1	Fabricantes de ônibus .....	22
2.3.3.2	Fabricantes de infraestrutura.....	23
2.3.3.3	Distribuidoras de energia .....	23
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>24</b>
4.1	DESENVOLVIMENTO DE MODELO .....	25
4.2	CASO ILUSTRATIVO.....	28
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DE RESULTADOS.....</b>	<b>31</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO .....</b>	<b>34</b>
	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	
	<b>ANEXO A</b>	
	<b>ANEXO B</b>	
	<b>ANEXO C</b>	



## 1 INTRODUÇÃO

Alterações drásticas em toda a cadeia logística da sociedade contemporânea são inevitáveis para que uma catástrofe ambiental seja impedida. O setor de transportes é responsável por 15% das emissões globais de gases de efeito estufa (GEE), de acordo com dados do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas das Nações Unidas (2022) [01].

Ao se observar de maneira mais detalhada as áreas de grande concentração populacional, os centros urbanos, um instrumento ganha ainda mais importância neste cenário de transição: o sistema de transporte público. Não obstante, deve-se ainda acrescentar que grande parte dos trens urbanos e metrô já operam movidos à eletricidade há décadas. As emissões do transporte público se concentram naquele que é o modal mais popular no país, os ônibus. A eletrificação das frotas de ônibus municipais não somente possibilita a eliminação das emissões dos veículos que são os principais responsáveis por material particulado nos centros urbanos (ICCT ZEBRA, 2022) [02], como é comprovadamente associada ao oferecimento de melhores níveis de serviço e atratividade à população (Barria et al., 2022) [03], potencializando ainda mais seus impactos e benefícios, como a esperada redução de trânsito local.

Seguindo estas tendências de transição energética, diversos países já implementam políticas públicas de incentivos e de restrições sobre as frotas de ônibus utilizadas em seus sistemas de transporte público, buscando acelerar de forma definitiva sua eletrificação. A se destacar: China com políticas de incentivos que abrangem desde a oferta pelo setor industrial à substituição de ônibus a diesel por elétricos pelas municipalidades (CCTP, 2020) [04]; União Europeia (THE EUROPEAN PARLIAMENT, 2019) [05] e Chile (Ministerio de Energía, 2021) [06] com restrições à comercialização de motores a diesel para tais finalidades e; Estados Unidos (THE WHITE HOUSE, 2022) [07] com poderosos incentivos à eletrificação de sua grande frota de ônibus escolares.

Buscando contribuir com o tema da eletromobilidade no transporte público no cenário brasileiro, este trabalho tem como objetivo a elaboração de um modelo computacional que evidencie as possibilidades de aperfeiçoamento de projeto sob os

aspectos de dimensionamento da infraestrutura de recarga necessária e contratação de energia elétrica. Sua estrutura está organizada de modo a apresentar os fundamentos de pesquisa, com uma breve revisão da bibliografia científica e apresentação de suas justificativas e objetivos; com a posterior sequência de seções: 2-Contexto da Eletrificação de Frota, 3-Metodologia, 4-Análise de Resultados, 5-Conclusões.

## 1.1 REVISÃO DE BIBLIOGRAFIA CIENTÍFICA

Ao se tratar de um campo de estudos que projetou severamente sua relevância de forma recente, com a popularização do próprio objeto (ônibus elétrico) na última década, há uma rica coletânea recente de materiais e artigos sobre a eletromobilidade nos centros urbanos. Perumal, Lusby e Larsen (2022) [08] revisam 43 artigos sobre o assunto, a partir dos quais constroem uma classificação da área de pesquisa entre quatro temas de problemas estudados: 1-Investimentos em frota de ônibus elétricos e infraestrutura de recarga associada; 2- Posicionamento de infraestrutura de recarga; 3- Agendamento de operação de veículos elétricos (*the electric vehicle scheduling problem – E-VSP*); 4- Agendamento de carregamento. Nesta classificação, o presente trabalho é classificado como um problema tipo 4, sobre agendamento da operação de carregamento, com elementos de tipo 1 relativos ao custo de contratação de energia elétrica e dimensionamento da infraestrutura de recarga.

Também é notável relatar a alta correlação entre as publicações e o desenvolvimento de projetos locais, evidenciando-se uma retroalimentação entre estes dois fatores. Neste tocante, a China se destaca como o maior polo de investigação sobre eletromobilidade urbana em transportes públicos. Os trabalhos de Zhang et al. (2022) [09] e Jiang et al. (2022) [10] são apenas dois dos muitos exemplos de trabalhos desenvolvidos sobre projetos chineses já operacionais.

Devido à maior proximidade histórica, econômica e política com o Brasil, estudos latino-americanos foram especialmente procurados, com o Chile sendo o país de maior notoriedade entre os resultados de busca. Em destaque está o trabalho de Munõz (2020) [11], o qual desenvolveu um modelo computacional assistido por software (OpenDSS e QGIS) para desenho e dimensionamento da infraestrutura de

distribuição elétrica necessária para atender um cenário de eletrificação total da frota a partir de dados do sistema de transporte de Santiago. Saliou-se ainda Barrientos (2022) [12] com modelagem de carga do sistema de ônibus de Santiago e posterior análise de seu impacto sobre o *Sistema Eléctrico Nacional de Chile* com simulações em modelo de despacho hidrotérmico, provando o baixo impacto em caso de planejamento da operação. E por último, Barria et al. (2022) [03] sobre a experiência dos usuários e as reações psicológicas relacionadas à eletrificação de frota de Santiago.

Needell, Wei e Trancik (2022) [13] não possuem foco em frotas de transporte público, mas contribuem com importante análise da gestão de carga aliada à geração solar distribuída em um cenário de alta penetração de veículos elétricos em grandes centros urbanos - Nova Iorque e Dallas.

Dentre outras publicações consultadas, as principais classificadas em outros temas em opção ao problema de planejamento de carregamento, estão: i) Zhang et al. (2022) [09], que chegam a fazer uma análise superficial do agendamento de recarga, mas mantém o foco da investigação em construir um plano de eletrificação de frota para uma cidade com múltiplas garagens, com a particularidade de considerar fatores de sazonalidade (por parte da demanda do sistema, do desenho das linhas de operação e da capacidade de autonomia das baterias). Em estudo de caso sobre a cidade de Wafangdian (China) a eletrificação planejada representaria uma economia de 17.8% nos custos do sistema tradicional com ônibus a diesel e; ii) Gorosabel, Xylia e Silveira (2022) [14] que construíram uma estrutura de sistematização a ser seguida para a avaliação de viabilidade técnica-econômica de centros de carregamentos para a frota elétrica de transporte público. O trabalho foi desenvolvido sobre o estudo de caso da cidade de Estocolmo, Suécia.

Por fim, sobre trabalhos com objetivos próximos ao aqui desenvolvido, foram principais fontes de revisão: Zhou et al. (2022) [15] e Hu et al. (2022) [16] que desenvolveram modelos matemáticos para a otimização robusta e simultânea para a implementação e escolha de posicionamento de carregadores rápidos e cronograma de recarga; Jiang et al. [10] que investiga o problema de cronograma de carregamento alinhado ao desenho da operação de ônibus (E-VSP) com a particularidade de considerar restrições ao número total e disponibilidade de carregadores nas garagens e; He, Liu e Song (2022) [17], que aplicam um modelo de otimização de custos de

energia e infraestrutura considerando variações nas baterias utilizadas em cada ônibus, uso de carregadores individuais e carga de oportunidade durante o período de veículos em rota para o caso de Salt Lake City (EUA), obtendo uma possibilidade de reduzir os custos da operação observada em 68.3%.

## **1.2 JUSTIFICATIVA DE PESQUISA**

A partir de pesquisa introdutória sobre eletromobilidade, é notório o aumento de interesse ao redor do tema no ambiente nacional, fato que é refletido no crescente número de projetos de transporte urbano que trazem a eletrificação como requisito. Contudo, ao se realizar profunda revisão bibliográfica, também é notória a ainda baixa quantidade de publicações que possuem o cenário brasileiro como foco. Desta forma, o presente trabalho busca modestamente contribuir com o tema via abordagem particularizada para as características apresentadas por projetos brasileiros.

## **1.3 OBJETIVOS**

O objetivo geral deste trabalho de pesquisa é o desenvolvimento de um modelo computacional de fácil utilização por um usuário (operador) que seja responsável pelo desenho de uma operação de ônibus elétricos para demonstração de oportunidades de aperfeiçoamento de projeto.

### **1.3.1 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

Especificamente, propõem-se:

- Dimensionamento do número de carregadores necessários, a partir de seleção de diferentes modelos informados pelo usuário;
- Cálculo de custos de energia elétrica sob diferentes modelos de contratação possíveis segundo a regulação brasileira.

Além disso, acrescenta-se como meta secundária:

- Elaboração de caso de aplicação ilustrativo, para demonstração de resultados tangíveis do modelo desenvolvido.

## **2 CONTEXTO DA ELETRIFICAÇÃO DE FROTAS**

Ainda que ônibus sejam a principal fonte de emissão de Óxidos de Nitrogênio (NOx) nos centros urbanos (ICCT ZEBRA, 2022) [02], por sua eficiência no transporte de massas, é fato que poluem proporcionalmente menos que os carros circulantes, o que não impede diferentes governos (como anteriormente citados) a adotarem estratégias que destacam a eletrificação da frota de transporte público às frotas privadas. Esta estratégia se dá além das óbvias justificativas do poder de influência governamental sobre suas próprias concessões de serviços.

Com a ausência de um grande motor de combustão interna, os novos veículos são completamente silenciosos e não apresentam vibrações. Desta forma, como comprovado pelas pesquisas de Barria et al. (2022) [03], passageiros de ônibus elétricos atribuem um nível de satisfação com o serviço utilizado muito superior àqueles observados nos veículos a diesel tradicionais. A percepção de melhoria no sistema público pela população possui como efeito consequencial o incentivo ao seu uso, fator que potencializa ainda mais os benefícios de uma frota livre de emissões e engatilha uma cascata de benefícios secundários, como: redução do tráfego nas vias da cidade e aumento da rentabilidade do sistema de transporte, que representam importantes retornos para o poder público em sua gestão.

Outro fato importante a se acrescentar às justificativas de uma frota 100% elétrica de ônibus é a observação de que, diferentemente do que se observa em relação ao segmento de automóveis leves, há pouco espaço para discussão sobre a utilização de motores elétricos híbridos com combustíveis renováveis (e.g. etanol), pois ainda não há combustível renovável que atenda - sem alterações - aos requisitos técnicos e mecânicos exigidos por um ônibus e seu potente motor diesel (US Department of Energy, 2022) [18].

O uso do chamado Hidrogênio Verde é uma possibilidade a ser explorada no futuro, mas ainda é alvo de estudos e muitas incertezas sobre sua viabilidade de

aplicação em larga escala para o setor de transportes (HEID; MARTENS; WITHANER, 2022) [19]. Em conjunto, não se deve ignorar o alto grau de eficiência das baterias como solução para rotas exclusivamente urbanas e o fato de ser uma solução já disponível e rentável. Projeções mais recentes (BloombergNEF, 2022) [20] mantêm veículos à bateria como principal tecnologia a ser implementada no ambiente urbano, mesmo com o desenvolvimento do Hidrogênio Verde para transportes pesados de longo curso.

Por fim, mesmo que a matriz de energia elétrica de um país ainda não seja baseada em fontes livres de emissões para que os GEE sejam completamente evitados pelo uso da nova tecnologia de propulsão dos veículos, a eletrificação dos transportes e a mudança da matriz energética são dois passos importantes e independentes que devem ser concluídos paralelamente no trajeto para um cenário ambientalmente correto.

## **2.1 CONTEXTO GLOBAL**

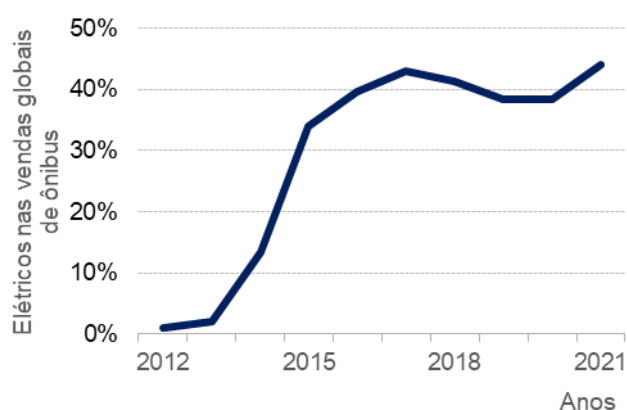
Ao contrário do que muitas vezes se acredita devido à recente onda de popularidade do tema, veículos movidos à eletricidade, contando até mesmo com a utilização de baterias, não são invenções recentes. Os primeiros bondes elétricos e trólebus foram desenvolvidos por Werner Von Siemens em 1881 e 1882, respectivamente (SIEMENS, 2022) [21]. O primeiro taxi motorizado de Londres, à época capital do histórico Império Britânico, em 1897, era de propulsão elétrica com baterias, e os primeiros registros de ônibus com a tecnologia são de 1907 (HAMMER,2019) [22].

Como relatado pela Rapid Transition Alliance (2019) [23] e por Hammer (2017) [22], até os anos iniciais do século XX, ainda não havia um consenso sobre qual seria o tipo de propulsão (motor a combustão interna, elétrico ou a vapor) a se tornar dominante. Contudo, o início de produção do ilustre Ford T em 1908 e as descobertas de reservas de petróleo por diversos países (incluindo os Estados Unidos - EUA) nos anos seguintes, colaboraram para a consolidação de uma política rodoviarista comum à época, inclusive para viagens de longo curso, então possível tecnologicamente apenas com o uso de motores a combustão interna.

Com o início das discussões sobre problemas ambientais e a crise do petróleo da década de 1970, as discussões sobre tecnologias alternativas aos combustíveis derivados de petróleo ressurgiu e novos projetos de ônibus utilizando baterias foram apresentados, como aqueles utilizados na vila olímpica de 1972. Contudo, devido à autonomia máxima alcançada de 80 km pela tecnologia então disponível, sua popularização foi limitada (PIERITZ, 2022) [24].

De maneira semelhante, o acelerado crescimento observado nos anos recentes, como ilustrado na Figura 01, teve início em 2011, quando a produção em escala do primeiro ônibus elétrico à bateria com autonomia superior a 250km foi anunciada, finalmente possibilitando maior penetração nos sistemas de transporte público.

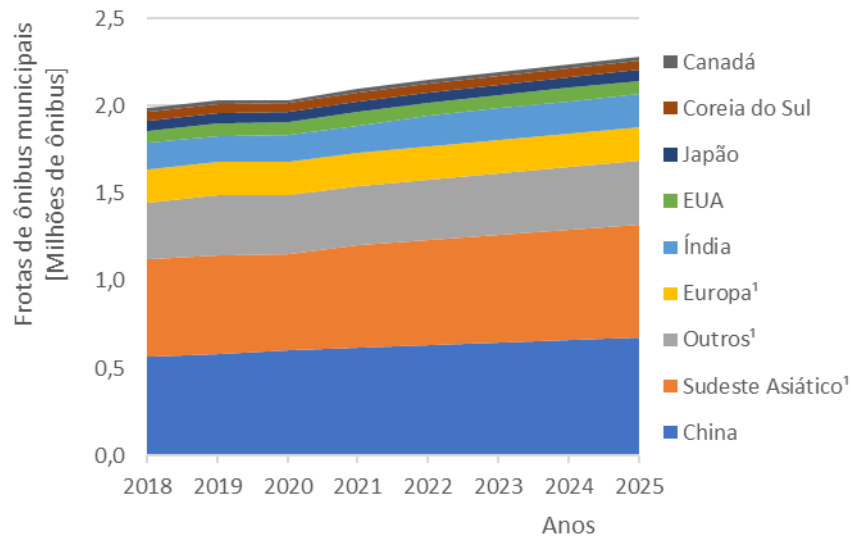
**Figura 01:** Ônibus elétricos como porcentagem das vendas globais de ônibus



Fonte: BloombergNEF (2022) [20]

Atualmente, estima-se que a frota global de ônibus urbanos seja de aproximadamente 2 150 000, sendo apenas 21% destes veículos livres de emissões (aproximadamente 450 000). Contudo, há grande desigualdade dentro destes números. A China, país destaque no processo de eletrificação, onde 33% da frota já é movida à eletricidade, corresponde a 30% da frota global de ônibus urbanos (vide Figura 02). Ao se ignorar as estatísticas chinesas, a média global é reduzida para aproximadamente 4%. (BloombergNEF, 2022) [20].

**Figura 02<sup>1</sup>:** Frota global de ônibus municipais



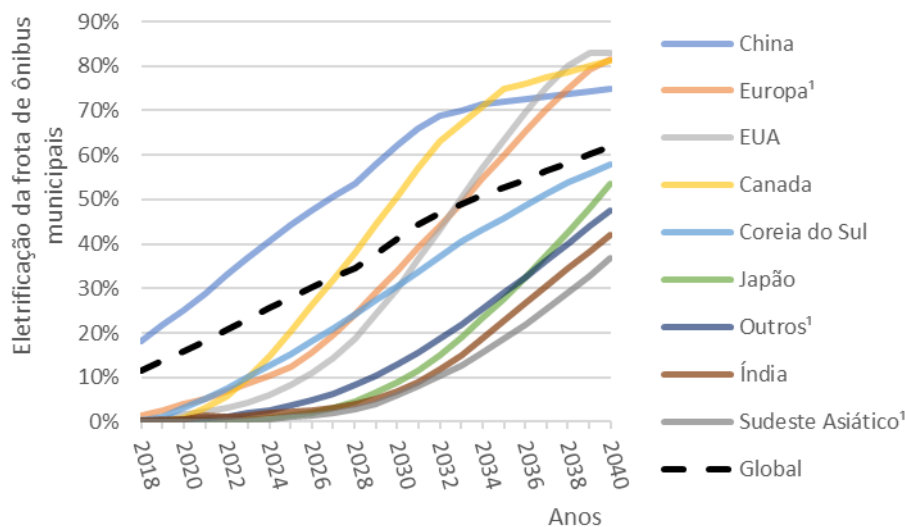
Fonte: BloombergNEF (2022) [20]

Ainda segundo BloombergNEF (2022) [20], o cenário esperado para o futuro é de grande aumento na penetração das frotas elétricas, com um crescimento esperado de aproximadamente 7% ao ano em números totais entre 2022 e 2040. Também sendo válido observar, a partir da Figura 03 abaixo, que países como China, EUA e europeus, que já contam com políticas bem estruturadas para a promoção da transição de frota lideram o movimento até por volta de 2035, quando a popularização da tecnologia e redução de preços serão suficientes para superar as barreiras de adoção em economias menos desenvolvidas, como as do Sudeste Asiático e América Latina (inclusa em “Outros”).

<sup>1</sup> Figura 02: “Europa” se refere ao conjunto de países membros da União Europeia, da Associação Europeia de Comércio Livre (AECL) e ao Reino Unido; “Outro” se refere a Brasil, México, Colômbia e Austrália; “Sudeste Asiático” se refere a Indonésia, Malásia, Filipinas, Tailândia e Vietnam



**Figura 03<sup>2</sup>:** Penetração de ônibus elétricos no total de frotas urbanas



Fonte: BloombergNEF (2022) [20]

Ao focarmos no panorama atual da América Latina, seis países, destacam-se por já possuírem estratégias nacionais de eletromobilidade e metas bem definidas de eletrificação para guiar o desenvolvimento de políticas públicas, apresentadas nas Tabelas 01 e 02. Entretanto, ainda deve-se ressaltar que Chile e Colômbia são aqueles na vanguarda do processo, possuindo projetos relevantes já em operação, e atualmente com 5% a 6% de suas respectivas frotas já movidas a eletricidade (E-bus Radar, 2022; MTT, 2021; DANE, 2021) [25; 26; 27].

**Tabela 01:** Estratégias Nacionais de Eletromobilidade países Latino-Americanos

País	Publicação	Documento	Órgãos Responsáveis
<b>Chile</b>	2017   2021	Estrategia Nacional de Electro-movilidad	Ministerio de Energía
<b>Costa Rica</b>	2018	Plan Nacional de Transporte Eléctrico 2018-2030	Ministerio de Ambiente y Energía Ministerio de Obras Públicas y Transportes

<sup>2</sup> Figura 03: “Europa” se refere ao conjunto de países membros da União Europeia, da Associação Europeia de Comércio Livre (AECL) e ao Reino Unido; “Outro” se refere a Brasil, México, Colômbia e Austrália; “Sudeste Asiático” se refere a Indonésia, Malásia, Filipinas, Tailândia e Vietnam

<b>Colômbia</b>	2019	Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica	Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible Ministerio de Minas y Energía Ministerio de Transporte Unidad de Planeación Minero Energética
<b>Panamá</b>	2019	Estrategia Nacional de Movilidad Eléctrica de Panama	Ministerio de Ambiente
<b>República Dominicana</b>	2020	Plan Estratégico Nacional de Movilidad Eléctrica	Instituto Nacional de Tránsito y Transporte Terrestre
<b>Equador</b>	2021	Estrategia Nacional de Electromovilidad para Ecuador	Banco Interamericano de Desenvolvimento (BID)

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 02:** Metas de eletrificação de frotas de ônibus urbanos em países Latino-Americanos

Ano	Meta
<b>2025</b>	<b>Equador:</b> 3-5% <b>Colômbia:</b> Mínimo 10% <b>Panamá:</b> Mínimo 10-20% (2027)
<b>2030</b>	<b>Equador:</b> 20-30% <b>Colômbia:</b> Mínimo 60% <b>Panamá:</b> Mínimo 33% <b>Rep. Dominicana:</b> 30%
<b>2035</b>	<b>Colômbia:</b> 100% <b>Chile:</b> 100% das vendas <b>Costa Rica:</b> 70%
<b>2040</b>	<b>Equador:</b> 60-70%
<b>2045</b>	- Sem metas -
<b>2050</b>	<b>Rep. Dominicana:</b> 100% <b>Costa Rica:</b> 100%

Fonte: PNME, 2022 [28]

No Chile, onde a rede de transportes públicos é unificada sob o governo federal, a modernização da frota teve início em 2019 a partir de uma grande transformação no sistema de ônibus (renomeado para RED) (DTPM, 2022) [29]. Para novas concessões, os serviços de fornecimento e operação de ônibus foram separados. Determinação que diminui a influência dos operadores sobre o sistema e permite que

o governo estimule diretamente a implementação de veículos elétricos por meio de concessões de fornecimento de frota que contenham incentivos desenhados especificamente para a nova tecnologia. Como resultado, em menos de quatro anos houve a implementação de aproximadamente 1 000 ônibus elétricos e registro de aumento no nível de satisfação da população com o nível de serviço observado (E-bus Radar, 2022; BARRIA et al. 2022) [25; 06].

## **2.2 CONTEXTO BRASIL**

Segundo as estatísticas mais recentes (E-bus Radar, 2022) [25], o Brasil possui apenas 373 ônibus elétricos em circulação em sistemas de transporte público, sendo destes: 315 concentrados na Região Metropolitana de São Paulo e 302 trólebus. Números totais que representam menos de 0,4% da frota total de ônibus urbanos no país (NTU, 2022) [30]. Esta seção busca apresentar o contexto do país com os posicionamentos das principais partes relacionadas ao processo de eletrificação da frota nacional: Governos, via legislações e desenvolvimento de projetos; Fabricantes de ônibus e de equipamentos acessórios, atuando sobre a oferta de produtos e; distribuidoras de energia elétrica (sendo os últimos apresentados como representantes do Setor Privado).

### **2.2.1 Regulação**

O atraso brasileiro relativo à popularização de veículos elétricos em comparação a outros países expõe a carência de políticas públicas incentivadoras e organização de programas que direcionem o desenvolvimento do assunto no âmbito nacional. Sem uma estratégia unificada pelo governo federal, o país conta com poucos incentivos e projetos desconexos desenvolvidos por diferentes órgãos públicos (sumarizados na Tabela 03), além de Estados adotando diferentes estratégias de forma individual para projetos que comumente são apenas de pequeno porte.

Contudo, apesar dos prejuízos, é necessário salientar que a falta de uma estratégia nacional com objetivos escalonados não implica que o país não tenha

nenhuma meta definida. Como signatário do Acordo de Paris (ONU, 2015) [31], promulgado pelo Decreto nº 9.073 de julho de 2017 [32], o Brasil tem o compromisso de eliminar totalmente suas emissões até 2050, fato que implica invariavelmente na reformulação de sua frota.

**Tabela 03:** Políticas públicas federais pró-mobilidade elétrica no Brasil

<b>Política Pública</b>	<b>Órgão Responsável</b>	<b>Objetivo principal</b>
Resolução CAMEX nº 97 de 26 de outubro de 2015	Câmara de Comércio Exterior - Ministério da Economia	Determina isenção ou diminuição do Imposto de Importação para veículos elétricos e híbridos
Resolução ANEEL nº 819 de 19 de junho de 2018	Agência Nacional de Energia Elétrica - Ministério de Minas e Energia	é o primeiro sinal regulatório que fundamenta os princípios do serviço de recarga dos veículos em eletropostos
Decreto da Presidência da República nº9.442 de 5 de julho de 2018	Secretaria Geral da Presidência da República	Determina diminuição da alíquota de Imposto sobre Produtos Industrializados para veículos elétricos e híbridos - Revogado pelo Decreto nº10.923/2021
Programa de Eletromobilidade do BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social - Ministério da Economia	Financiamento para o desenvolvimento de um ecossistema de eletromobilidade e para compras de veículos elétricos por corporações
Chamada 22 - P&D ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica - Ministério de Minas e Energia	Financiamento de projetos para geração de modelos de negócio e soluções de mercado para eletromobilidade
Lei Nº13.755 de 10 de dezembro de 2018 - Rota 2030	Secretaria Geral da Presidência da República	Icentiva as atividades de inovação relacionadas a novas tecnologias de propulsão, eletromobilidade e eficiência energética
Frente Parlamentar Mista pela Eletromobilidade	Senado Federal	Debater o desenvolvimento sustentável aliado à inovação tecnológica com foco nos veículos elétricos
Projeto de Lei - em andamento	Câmara de Comércio Exterior - Ministério da Economia	Projeto de lei que isenta veículos elétricos e híbridos de Imposto de Importação até 31 de dezembro de 2025

Fonte: PNME, 2022 [28]

Por fim, é importante destacar a relevância da legislação do município de São Paulo. A capital paulista concentra uma frota de aproximadamente 14 000 ônibus urbanos (SP Trans, 2022) [33] dentro do universo de 107 000 (NTU, 2022) [30] em

escala nacional e, conseqüentemente, exerce grande poder de influência sobre todo mercado brasileiro. Fabricantes buscam sempre construir soluções que atendam aos requisitos do município e disponibilizar produtos no mercado nacional que sejam de interesse aos projetos de transporte da cidade. A penetração da propulsão elétrica nos sistemas de transporte público brasileiros depende da demanda da capital paulista para incentivar os fabricantes e de seu papel como vitrine da tecnologia para outras cidades.

Neste sentido, soma-se como destaque o município de São Paulo possuir legislação mais exigente que a observada a nível federal para limitar o uso de motores de combustão interna. A lei municipal N° 16.802 de 17 de janeiro de 2018 [34] determina para seus operadores de ônibus públicos e de veículos de coleta de resíduos uma redução nas emissões até 2028 em 50% para CO<sub>2</sub>, 90% para material particulado e 80% para NO<sub>x</sub> (e 100%, 95% e 95%, respectivamente, para 2038). Além disso, argumentando atrasos em metas intermediárias, o município, por meio de sua empresa controlada responsável pelo sistema de transporte, SP Trans, anunciou em 16/10/2022 que não aceitará que novos veículos movidos a diesel sejam incorporados à frota.

### **2.2.2 PROJETOS EXISTENTES**

Nesta seção, a demanda atual do setor brasileiro é apresentada pelo mapeamento dos projetos de transporte público existentes que envolvem, mesmo que de maneira parcial, a utilização de ônibus elétricos. Como é possível observar a partir das Tabelas 04 e 05, aqueles que já se encontram em operação possuem escalas reduzidas se comparados aos planejados para os próximos anos, números que demonstram a construção e desenvolvimento da confiança de governos e outros tomadores de decisão nos veículos elétricos após um primeiro período marcado por testes da tecnologia.

Caso todos os projetos já anunciados para os próximos dois anos se concretizem, é esperado que a frota de ônibus elétricos urbanos circulante no Brasil seja multiplicada em aproximadamente 47 vezes.

**Tabela 04:** Ônibus elétricos a bateria em operação em sistemas de transportes públicos

<b>Localidade</b>	<b>n° atual de ônibus elétricos</b>	<b>Início de operação</b>
Bauru	2	2018
Brasília	6	2018
Campinas	15	2019
Maringá	3	2019
Salvador	2	2021
Região Metropolitana de Salvador	20	2022
Santos	7	2017
São Paulo	18	2017
Região Metropolitana de São Paulo	1	2021
Volta Redonda	3	2018

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 05:** Projetos de ônibus elétricos a bateria para sistemas de transportes públicos anunciados

<b>Localidade</b>	<b>n° previsto de ônibus elétricos</b>	<b>Início de operação</b>
São Paulo	~2,400	2024
São José dos Campos	437	2023
Campinas	309	2023
Curitiba	150	2024
Goiânia	114	2023
Cuiabá	54	2023

Fonte: Elaboração própria

### 2.2.3 SETOR PRIVADO

Para complemento do relato do cenário brasileiro do processo de eletrificação das frotas de ônibus urbanos, estão aqui brevemente descritos os posicionamentos dos participantes que atendem pelo panorama da oferta à demanda criada pelas legislações e projetos já mencionados, em sequência: fabricantes de ônibus, fabricantes de infraestrutura acessória e distribuidoras de energia elétrica.

#### 2.2.3.1 Fabricantes de ônibus

Devido ao tamanho do mercado nacional e ao processo de industrialização associado à política rodoviária, o Brasil desenvolveu ao longo do século XX uma grande indústria nacional de ônibus, marcada pela presença das principais fabricantes multinacionais e adoção do modelo de chassi e carroceria independentes. (SCHIAVON, 2020) [35].

Com o início da transformação da indústria à procura de soluções sustentáveis, participantes tradicionais estão buscando adaptar-se e oferecer novos produtos enquanto novos entrantes focados apenas em soluções sem emissões estão sendo atraídos pela oportunidade de um grande mercado. A Tabela 06 abaixo descreve o posicionamento das principais fabricantes que compõem o mercado brasileiro.

**Tabela 06:** Posicionamento de fabricantes de ônibus com presença no Brasil

<b>Companhia</b>	<b>Posicionamento</b>
<b>Mercedes-Benz</b>	Primeiro modelo elétrico com desenvolvimento focado no mercado brasileiro anunciado em agosto de 2021 com início de produção previsto para novembro de 2022.
<b>BYD</b>	Empresa focada apenas em veículos elétricos. Instalação de fábrica no Brasil em 2014 para atender ao mercado nacional. Atualmente possui o maior portfólio dentre as fabricantes.
<b>Eletra</b>	Empresa nacional com origem na produção de trólebus, lançou seu primeiro ônibus 100% elétrico a bateria em 2013.
<b>Higer</b>	Empresa chinesa disponibilizando ônibus elétricos para importação ao mercado brasileiro desde 2021. Possui planos anunciados para uma fábrica território nacional em 2024.

<b>Volvo</b>	Anunciou primeiro modelo de ônibus elétrico para o mercado brasileiro para 2023 e fim da comercialização de motores a combustão em 2025.
<b>Volkswagen</b>	Estratégia de eletrificação atualmente focada em caminhões urbanos.
<b>Scania</b>	Foco atual na comercialização de ônibus movidos a gás, modelo elétrico para o mercado brasileiro em fase de testes.
<b>Marcopolo</b> (carrocerias)	Desenvolveu ônibus elétrico próprio (chassi e carroceria). Comercializa carrocerias para todos os chassis de ônibus elétricos disponíveis no Brasil.
<b>Caio</b> (carrocerias)	Comercializa carrocerias para todos os chassis de ônibus elétricos disponíveis no Brasil.

Fonte: Elaboração própria

### 2.2.3.2 Fabricantes de infraestrutura

Para a oferta de infraestrutura de carregamento, é observada maior variação entre os participantes e soluções oferecidas. Há aqueles que atuam de maneira mais ampla, desde a produção do carregador à infraestrutura elétrica (e.g. subestações e quadros de controle), enquanto há outros que focam em etapas específicas da cadeia de fornecimento. Com relação aos carregadores, o mercado nacional possui maior fragmentação entre equipamentos nacionais e importados do que o observado, tanto para ônibus quanto para infraestrutura elétrica complementar. Entre as principais companhias atuando neste segmento estão: WEG, Siemens, ABB, Nansen, Enel X e Efacec.

### 2.2.3.3 Distribuidoras de energia elétrica

A eletrificação de frotas de transporte público é de grande interesse para as distribuidoras de energia elétrica por diversos motivos. Contudo, com garagens de ônibus elétricos facilmente alcançando demandas na ordem de dezenas de MW, há especial interesse na segurança da rede de distribuição e a responsabilidade da distribuidora como sua garantidora. Além disso, não se deve ignorar o interesse comercial das distribuidoras, que muitas vezes também atuam no âmbito de comercialização de energia, no mapeamento destas oportunidades.



Apresentados no quadro abaixo (Tabela 07) estão projetos desenvolvidos por distribuidoras que contribuem para o desenvolvimento do setor no cenário nacional, com destaque para a intensa atuação da Enel em toda a América Latina, não apenas no Brasil.

**Tabela 07:** Projetos de ônibus elétricos desenvolvidos por distribuidoras de energia elétrica

<b>Companhia</b>	<b>Posicionamento</b>
<b>Enel</b>	Criação de subsidiária, Enel X, focada em projetos de inovação em energia. Atua ativamente como incentivadora e consultoria para governos no desenvolvimento de projetos de eletrificação de transporte público e participa diretamente em processos de concessões na América Latina (já fornece veículos e infraestrutura para Santiago e Bogotá).
<b>CPFL</b>	Financiamento do projeto Campus Sustentável, parceria com a Unicamp que envolve a operação de um ônibus elétrico em associação a geração fotovoltaica local. Iniciativa participante do programa de pesquisa e desenvolvimento da Aneel.
<b>EDP</b>	Parceria com Unesp e BYD para desenvolvimento de ônibus movido a energia solar para transporte de funcionários da UTE Pecém. Desenvolvimento de infraestrutura de recarga para a operação piloto da empresa VIX Logística.
<b>CEMIG</b>	Fornecimento de infraestrutura de carregamento e geração solar para projeto piloto realizado no município de Belo Horizonte.

Fonte: Elaboração própria

### 3 METODOLOGIA

Além de conter explicação generalista do modelo construído, esta seção possui em sua segunda parte um relato das premissas utilizadas em elaboração de caso de aplicação ilustrativo, desenvolvido para melhor explicação a partir da apresentação de resultados tangíveis. O estudo foi baseado em premissas obtidas de projetos de frotas de ônibus elétricos no Brasil e informações indicativas de mercado sobre produtos disponíveis e contratação de energia elétrica.

### 3.1 DESENVOLVIMENTO DE MODELO

Buscando garantir a desejada usabilidade pelos usuários propostos e a possível familiarização destes com todas as etapas de raciocínio e cálculo realizadas, optou-se pela construção do modelo computacional - objeto deste trabalho - em software de planilhas eletrônicas largamente popularizado: Microsoft Excel. Ainda sobre o tema, também é notório relatar que especial atenção foi despendida à interação usuário-sistema, com as necessárias interações manuais sendo restringidas à página única de entrada de dados, desenhada com interface própria à interação (capturas de tela apresentada no Anexo A), na qual o usuário deve inserir as seguintes variáveis apresentadas na Tabela 08 para o início da simulação:

**Tabela 08:** Variáveis de entrada modelo computacional

<b>Variáveis de entrada</b>
<b>Ônibus</b>
Capacidade de baterias [kWh]
Consumo de energia [kWh/km]
<b>Carregadores</b>
Potência de saída [kW]
Tempo para recarga 100% das baterias [minutos]
<b>Operação de frota</b>
Distância diária [km/dia] (para cada ônibus)
Horário de chegada e saída da garagem (para cada ônibus)
<b>Energia elétrica</b>
Intervalo de horário de ponta
ACR: Tarifas de energia modalidade Azul e Verde
ACL: Propostas de custos recebidas

Fonte: Elaboração própria

O sistema foi desenvolvido de modo que a análise de dados seja segmentada em duas etapas sequenciais cujos resultados componham as respostas dos objetivos intermediários propostos: i) determinação do número de carregadores; ii) projeção do custo mensal de energia em diversos modelos de contratação. Além disso, estrategicamente, para que haja ênfase sobre os pontos passíveis de otimização no desenvolvimento de projeto, seis cenários de avaliação são construídos e apresentados ao usuário final, sendo três as variações de abordagens exploradas

para a determinação dos cenários: i) priorização de carregadores lentos ou rápidos; ii) possibilidade de compartilhamento de carregadores entre veículos e; iii) modelo de gestão do agendamento de ônibus por percurso a ser realizado. Um resumo dos cenários avaliados é apresentado no quadro abaixo:

**Tabela 09:** Quadro-resumo cenários avaliados

<b>Cenário</b>	<b>Priorização de carregadores</b>	<b>Compartilhamento de carregadores</b>	<b>Gestão de frota</b>
1	Lentos	Não	A
2	Lentos	Sim	A
3	Rápidos	Não	A
4	Rápidos	Sim	A
5	Lentos	Sim	B
6	Rápidos	Sim	B

Fonte: Elaboração própria

Destacando-se o último ponto: em cenários identificados com modo A de gestão de frotas, admite-se que os veículos sejam diariamente atribuídos ao mesmo percurso, possuindo distância percorrida e horários de chegada e saída da garagem constantes. Em cenários do modo B, assume-se estratégia para maximizar o tempo disponível da frota em garagem, atribuindo os horários de saída de ônibus da garagem de acordo com o horário de chegada ao final do dia anterior, em mesma ordem, possibilitando que ônibus sejam atribuídos a percursos diferentes a cada dia.

Devido aos cenários sem a utilização de compartilhamento de carregadores serem evidentemente aqueles a apresentar piores resultados relativos a número de carregadores necessários e custos de energia (devido à maior necessidade de contratação de demanda), foram determinados como base de comparação e são apenas apresentados aqueles que efetivamente representam os casos mais agudos (i.e. quando utiliza-se o modo A de gestão de frota).

Como passo inicial para a simulação, é realizado o ordenamento dos ônibus pela ordem de chegada destes na garagem (início do horário de disponibilização para carregamento), informado como dado de entrada pelo usuário. A partir de então, o dimensionamento do número de carregadores é iniciado por uma análise primária, na qual há a seleção da potência máxima ou mínima (a se depender do cenário

observado) que atenda de forma individual os requisitos horários de determinado veículo, como demonstrado pelo quadro abaixo. Esta seleção primária (apresentada no Quadro 01 abaixo) também é correspondente ao resultado final do dimensionamento nos cenários onde não se explora a possibilidade de compartilhamento de carregadores.

**Quadro 01:** Seleção primária de carregadores

Seja:

- $C = \{a, b, c\}$ , o conjunto de potências de carregadores e;
- $T = \{t_a, t_b, t_c\}$ , os respectivos tempos de recarga 0% - 100% associados a C para o modelo de ônibus/bateria informado

Para um ônibus  $i \mid i \in \mathbb{N}^* < 50$ , tem-se:

- Tempos de recarga:  $t_i = T \cdot (1 - SOC)$ , onde SOC é a porcentagem de carga remanescente do veículo após sua operação
- Seleção primária de carregadores:
  - Cenários 1, 2 e 5:  $C_i \in C \rightarrow t_i(C_i) = \max(t_i \mid E + t_i < S)$
  - Cenários restantes:  $C_i \in C \rightarrow t_i(C_i) = \min(t_i \mid E + t_i < S)$
  - Onde:
    - E: horário de entrada em garagem
    - S: horário de saída de garagem

Fonte: Elaboração própria

Cabe observar que mantido o alinhamento com os propósitos deste trabalho, prezando pela simplicidade do modelo construído se utilizou de aproximação de ordem prática com um comportamento linear para a carga de bateria durante a operação de carregamento.

A otimização da infraestrutura de recarga é realizada a partir do uso, sempre que possível, de compartilhamento de carregadores. Verificado após a seleção primária de carregadores (como nos casos de uso individual do equipamento) e se utilizando do mesmo princípio de restrições horárias, com as seguintes alterações: i) o horário disponível para início do carregamento é determinado pela contingência crítica entre o momento de chegada do próprio ônibus e a finalização da última operação de recarga realizada por determinado carregador; ii) a potência do carregador a ser verificado para um novo ciclo de operação (novo veículo) não é alterada para atender os requisitos de tal ônibus, mas mantida a determinação a partir de seu primeiro

veículo designado, oferecendo possivelmente carga mais rápida do que a originalmente prevista para os veículos subsequentes.

Ainda deve-se destacar que o modelo foi construído de forma a realizar a análise secundária com a verificação de compartilhamento de carregadores a partir da ordenação reversa dos ônibus (i.e. o primeiro ônibus a ser verificado de possível uso do carregador nº1 após a finalização de seu primeiro ciclo de recarga é o último ônibus a finalizar suas rotas, em último caso o ônibus de nº 50) devido ao sistema não ter como propósito uma otimização matemática máxima possível para o dimensionamento da infraestrutura, a estratégia ser de fácil implementação prática e apresentar resultados superiores a uma otimização realizada a partir da verificação em ordem comum (i.e. iniciando-a em ônibus de menor índice).

Para melhor ilustração do método, um equacionamento do algoritmo é apresentado no Quadro 02 abaixo e um exemplo de matriz diagonal resultante da aplicação do algoritmo está presente no Anexo B, sendo este exemplo pertencente ao processo de seleção do cenário 4 do caso ilustrativo desenvolvido.

**Quadro 02:** Seleção secundária de carregadores, com verificação de compartilhamento

Seja:

- $C = \{a, b, c\}$ , o conjunto de potências de carregadores e;
- $T = \{t_a, t_b, t_c\}$ , os respectivos tempos de recarga 0% - 100% associados a C para o modelo de ônibus/bateria informado

Seleção primária de carregadores, com carregadores  $C_i$  associados a um ônibus  $i \mid i \in \mathbb{N}^* < 50$ :

- Tempos de recarga:  $t_i = T \cdot (1 - SOC)$ , onde SOC é a porcentagem de carga remanescente do veículo após sua operação
- Seleção primária de carregadores:
  - Cenários 1, 2 e 5:  $C_i \in C \rightarrow t_i(C_i) = \max(t_i \mid E + t_i < S)$
  - Cenários restantes:  $C_i \in C \rightarrow t_i(C_i) = \min(t_i \mid E + t_i < S)$
  - Onde:
    - E: horário de entrada em garagem
    - S: horário de saída de garagem

Seleção secundária com verificação de compartilhamento para carregadores  $C_i$  associados primariamente a um ônibus  $i$ , utilizando-se iterações com  $i$  em ordem crescente:

Verifica-se para um ônibus  $j \mid j \in \mathbb{N}^* < 50$ , utilizando-se iterações em ordem decrescente de  $j$

- Se  $E_j + t_j(C_i) < S_j \rightarrow C_j = \exists e j$  passa a ser associado a  $C_i$
- Onde:
  - $E_j$ : max(entrada em garagem  $j$ ;  $E_{j+a} + t_{j+a}(C_i) \mid E + t_{j+a}(C_i) < S_{j+a}$ ,  $a = \max(i) - j$ )
  - $S_j$ : horário de saída de  $j$  da garagem

Fonte: Elaboração própria

Uma vez dimensionado o parque de carregadores necessários, utilizam-se seus horários de funcionamento, determinados conseqüentemente na própria análise de dimensionamento, para determinação do consumo de energia elétrica observado pela operação e a necessidade de demanda contratada a partir da demanda máxima medida e integralizada em intervalos de 15 minutos, como determinado pela Regulação nº 1000 da Aneel, de 7 de dezembro de 2021 [36]. Tanto consumo como demanda contratados são estabelecidos para horários de ponta e fora de ponta, de acordo com o informado pelo usuário final e respectiva distribuidora. Há a observação de que buscando estruturar um modelo abrangente para projetos de todo o Brasil, utilizam-se tarifas de energia elétrica e se apresentam resultados antes da aplicação de impostos, que devem ser calculados a cada caso, a depender da distribuidora local.

Por fim, algumas das limitações do método seguido pelo modelo computacional desenvolvido são: análise a ser realizada para número inferior ou igual a 50 ônibus, com apenas uma capacidade de bateria a ser utilizada, seleção entre apenas três potências de carregadores e desconsideração da possibilidade de cargas de oportunidade a serem realizadas dentro do horário de operação da frota.

### **3.2 CASO ILUSTRATIVO**

Para melhor demonstração dos resultados e potencial do modelo construído, um caso ilustrativo foi elaborado a partir de informações retiradas de editais de projetos de transporte públicos brasileiros que contemplem veículos elétricos (e.g. São José dos Campos e Goiânia), além de informações coletadas dos produtos já disponíveis em território nacional, utilizando-se de valores encontrados com maior disponibilidade entre diferentes fabricantes de veículos e carregadores. A Tabela 10 abaixo apresenta as principais premissas técnicas adotadas para os equipamentos:

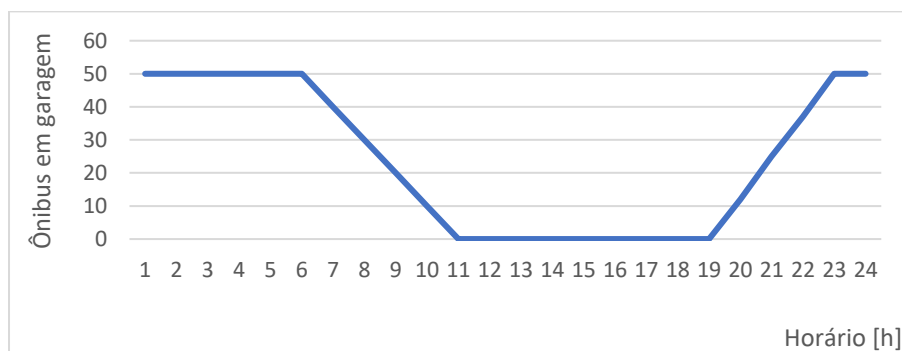
**Tabela 10:** Quadro-resumo premissas técnicas caso ilustrativo

Premissas técnicas			
<b>Ônibus</b>			
<b>Modelo:</b>	Padron		
<b>Capacidade bateria (kWh):</b>	350		
<b>Autonomia inicial (km)</b>	250		
<b>Consumo (kWh/km):</b>	1,4		
<b>Carregadores</b>			
<b>Potência de saída (kW)</b>	30	60	150
<b>Tempo para carga 100% (min)</b>	770	385	154

Fonte: Elaboração própria

Para a operação de frota, foi desenhada proposta com 50 ônibus que não possuem retorno à garagem em horário de menor demanda do sistema, fator alinhado à limitação do modelo de não possibilitar a investigação de recargas de oportunidade em horários ociosos dentro de um dia de operação. Buscando representar uma operação padrão de ônibus e sua demanda com picos ao longo do dia, adotou-se que os ônibus são despachados para início de operação de forma linear entre 05:00 e 09:00 e similarmente recolhidos entre 19:00 e 22:00, com quilometragem diária proporcional ao tempo de operação, e estipulando-se que o ônibus de maior trajeto (05:00 às 22:00) possua percurso de 200km, para permitir sua viabilidade mesmo ao final da vida útil de sua bateria, quando espera-se por informações garantidas pelos fabricantes, 80% de capacidade de carga (i.e. 80% da autonomia original). Além da síntese presente na Figura 04, informações completas sobre trajeto diário (em km), horário de saída e chegada de cada ônibus do caso ilustrativos estão disponíveis no Anexo C.

**Figura 04:** Presença de ônibus em garagem – caso ilustrativo



Fonte: Elaboração própria

Para premissas referentes ao tema de contratação de energia elétrica, adotou-se como referência uma operação localizada em território atendido pela distribuidora CPFL Paulista. Desta forma, o horário de ponta de demanda considerado é o intervalo 18:00 – 20:59 e as tarifas referentes às possibilidades de contratação de energia no Ambiente de Contratação Regulada (ACR) são aquelas informadas pela própria distribuidora em questão, prévias à aplicação de impostos.

Para tarifas relativas à aquisição de energia no Ambiente de Contratação Livre (ACL), que evidentemente apresentam maior volatilidade, informações apenas indicativas de mercado foram consideradas a partir de histórico recente obtido em sistema da Câmara de Comercialização de Energia Elétrica – CCEE (2023) [37]. Deve-se destacar a particularidade de direcionamento das premissas utilizadas para um Consumidor Especial, que deve necessariamente adquirir energia de fontes renováveis incentivadas, por ser um caso com benefícios em questão de custos e por acreditar-se que esta seja uma premissa alinhada ao princípio de sustentabilidade que rege a eletrificação de uma frota.

**Tabela 11:** Quadro-resumo premissas tarifas de energia elétrica

Tarifas de Energia Elétrica									
<b>ACR</b>									
<u>Modalidade tarifária Azul</u>									
Subgrupo	TUSD Ponta (kW)	TUSD fora de Ponta (kW)	TUSD (MWh)	TE Ponta verde	TE Ponta amarela	TE Ponta vermelha	TE fora de ponta verde	TE fora de ponta amarela	TE fora de ponta vermelha
A4 (2,3 a 25 kV)	47,86	16,66	110,49	484,11	514,00	549,11	302,56	332,45	367,56
<u>Modalidade tarifária Verde</u>									
Subgrupo	TUSD (kW)	TUSD Ponta (MWh)	TUSD fora de Ponta (MWh)	TE Ponta verde	TE Ponta amarela	TE Ponta vermelha	TE fora de ponta verde	TE fora de ponta amarela	TE fora de ponta vermelha
A4 (2,3 a 25 kV)	16,66	1273,65	110,49	484,11	514,00	549,11	302,56	332,45	367,56
<b>ACL</b>									
<u>Consumidor especial Azul</u>									
	TUSD Ponta (kW)	TUSD fora de Ponta (kW)	TUSD (MWh)	TE					
	23,93	8,33	110,49	130,00					
<u>Consumidor especial Verde</u>									
	TUSD (kW)	TUSD Ponta (MWh)	TUSD fora de Ponta (MWh)	TE Ponta verde					
	8,33	636,83	110,49	130,00					

Fonte: Elaboração própria



## 4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Em alinhamento à proposta inicial da elaboração de caso de aplicação ilustrativo, são apresentados nesta seção seus resultados que, como planejado, demonstram - por consequência - o êxito da elaboração do modelo computacional desenvolvido como objetivo principal deste trabalho. As Tabelas 12 e 13 resumizam os principais dados de saída observados da simulação, com comentários e análise posteriores.

**Tabela 12:** Resultados de caso ilustrativo – Infraestrutura de recarga

Cenário	Gestão de frota	Carregadores			Demanda de ponta (kW)	Demanda fora de ponta (kW)	Consumo de ponta (kWh)	Consumo fora de ponta (kWh)
		30 kW	60 kW	150 kW				
1	A	30	20	0	750	2.100	1.110	11.138
2	A	24	20	0	570	1.920	750	11.498
3	A	0	0	50	3.750	3.750	4.160	8.087
4	A	0	0	7	1.050	1.050	1.405	10.842
5	B	50	0	0	750	1.500	1.110	11.138
6	B	0	0	8	1.200	1.200	1.806	10.442

Fonte: Elaboração própria

**Tabela 13:** Resultados de caso ilustrativo – Contratação de energia

Cenário	Custo mensal de energia (BRL)					
	ACR Azul Band. Verde	ACR Azul Band. Vermelha	ACR Verde Band. Verde	ACR Verde Band. Vermelha	ACL Azul	ACL Verde
1	228.691,88	252.574,56	231.530,10	255.412,79	127.477,01	127.056,46
2	215.117,54	239.000,22	214.008,44	237.891,12	121.670,21	<b>119.872,65</b>
3	416.374,62	440.257,31	382.074,31	405.956,99	213.011,51	188.966,19
4	227.164,55	251.047,24	225.944,91	249.827,59	125.909,51	<b>122.970,82</b>
5	218.695,88	242.578,56	221.534,10	245.416,79	122.479,01	122.058,46
6	239.025,00	262.907,68	244.608,90	268.491,58	130.748,51	130.547,48

Fonte: Elaboração própria

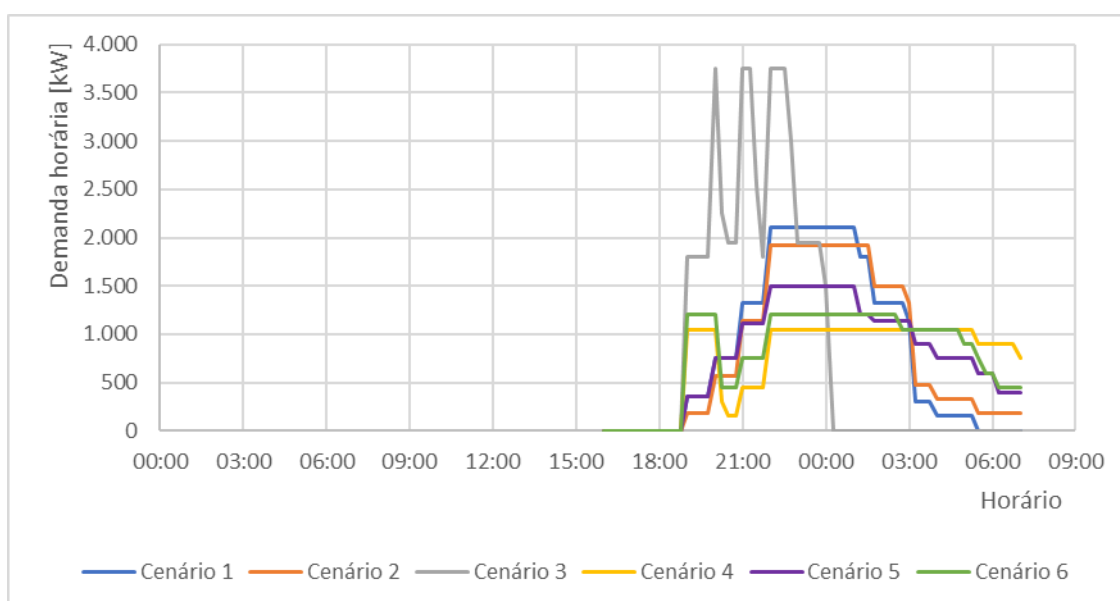
De forma semelhante ao modelo, ao se analisar primeiro o dimensionamento de infraestrutura, deve-se ressaltar que para a comparação direta do número de carregadores entre todos os cenários seja verdadeiramente completa, seria necessária realização de análise econômico-financeira do projeto devido à grande

diferença de custo de implementação associada a cada cenário e respectivas potências de carregadores selecionadas. Contudo, mantendo-se dentro do escopo proposto, é possível analisar os números resultantes dentro de cenários alternativos que sejam baseados na priorização por um mesmo tipo de carregador.

Com relação às propostas voltadas a carregadores lentos (1, 2 e 5), ao se implementar a estratégia de uso compartilhado foi possível observar redução de 12% na necessidade de carregadores (associada a -24% na necessidade de demanda contratada em horário de ponta e -9% fora de ponta). Ao se alternar para o modelo de gestão B, o número total de carregadores foi mantido, porém com possibilidade de utilização apenas daqueles de menor potência, garantindo redução na demanda contratada fora de ponta em 29%.

Para cenários nos quais foi utilizado o princípio de carregadores rápidos (2, 4 e 6), os resultados obtidos são ainda mais significantes, com as maiores melhorias sendo encontradas no cenário de uso compartilhado e modo de gestão de frota convencional (4), com reduções de 86% no número de carregadores e de 72% nas demandas tanto de ponta quando fora de ponta.

**Figura 05:** Demanda de eletricidade observada por horário



Fonte: Elaboração própria

A implementação da estratégia de uso compartilhado de carregadores, responsável por amenizar o pico de demanda elétrica (como demonstrado na Figura 05), em associação à contratação de eletricidade a preços mais competitivos possibilitados pelo acesso ao Ambiente de Contratação Livre (ACL) (43% a 52% de desconto em com relação ao Ambiente de Contratação Regulada – ACR em tarifa Azul e 44 a 53% em tarifa verde, em comparações dentro dos cenários) é a combinação responsável pelas soluções apresentadas.

Ao se utilizar a premissa de priorização de carregadores lentos, o principal resultado encontrado é a possibilidade de redução em 53% nos custos mensais de energia obtida na comparação do pior cenário observado (1), com contratação em ACR com modalidade tarifária verde, e melhor cenário (2) com contratação em ACL modalidade verde. Nas mesmas condições, mas se utilizando da priorização de carregadores rápidos, os ganhos são expandidos, chegando-se a uma redução de 70% nos referidos custos entre os cenários 3 e 4. Caso as restrições do método relacionadas ao impacto do custo de implementação de cada tipo de carregador fossem ignoradas, entre o pior (3) e melhor (2) cenários absolutos seriam encontradas reduções de 86% no número de pontos recarga necessários, 60% na necessidade de demanda contratada e de 71% nos custos mensais de energia.

Por fim, é necessário observar que reduções ainda adicionais poderiam ser obtidas ao se utilizar bandeira tarifária vermelha para o pior caso, fator que não foi considerado para os dados relatados acima, pois os preços indicativos de contratação em ACL, obtidos do contexto atual de mínimas históricas são derivados de abundância de recursos energéticos, fator que também implica na ocorrência de bandeira verde (utilizada). Por outro lado, a prevenção às oscilações no custo de energia é outra importante vantagem da contratação em ACL, que não é passível de contabilização nos resultados apresentados.

## **5 CONCLUSÕES**

Utilizando-se de apenas simples verificações horárias ordinárias às operações de frotas de ônibus e com a estruturação dos resultados a partir das simulações simultâneas de seis cenários baseados em distintas estratégias de recarga e

possíveis modos de aquisição de energia elétrica, foi possível garantir o devido destaque a cada variável dentro do processo de criação de oportunidades de otimização dos recursos estudados (infraestrutura de recarga e contratação de energia). E dessa forma, logrou-se atender ao objetivo de desenho de uma solução que fosse instrutiva ao usuário final, evitando-se a simples disponibilização de cenário ótimo e criando as possibilidades para adaptações a cada realidade de projeto encontrada.

Ainda na perspectiva do desenvolvimento de propostas passíveis de utilização prática na elaboração de projetos de eletrificação de frotas no país, destaca-se que a metodologia implementada para a otimização de recursos a partir da verificação direta via restrições horárias para possibilidade de uso compartilhado de carregadores, possibilitou a prevenção à ocorrência de *switching* na modelagem de carga, como relatado por Barrientos (2022) e verificado em outros trabalhos de literatura consultada. Este fenômeno consiste quando a operação de recarga dos veículos é realizada com equipamentos de alta potência a partir de intervalos muito curtos de tempo (em grandeza de minutos) e intermitentes para se buscar otimizações em custos de aquisição de energia elétrica, fator possivelmente danoso às baterias dos ônibus e que inviabiliza a aplicação prática da estratégia proposta, em contraposição aos princípios utilizados para esta pesquisa.

Como mencionado anteriormente, o interesse sobre a eletromobilidade é crescente no Brasil, e é refletido no crescimento de projetos em elaboração no país, apesar de ainda tímidas estatísticas relacionadas à publicação de conhecimento. Em conclusão a este estudo, apresenta-se uma lista, evidentemente não exaustiva, de propostas para projetos futuros a serem desenvolvidos em natural continuação ao tema:

- Desenvolvimento de análise de retorno financeiro complementar à análise técnica sobre representatividade das economias geradas pelas propostas de otimização encontradas pelo modelo desenvolvido;
- Estudo de caso real para o dimensionamento de infraestrutura de recarga e projeção dos custos de energia elétrica sobre projeto em etapa de desenvolvimento no Brasil;

- Desenvolvimento de nova versão de modelo computacional com a inclusão de considerações relativas a diferentes capacidades de baterias (otimizadas para cada rota) e utilização de recargas de oportunidade;
- Desenvolvimento de nova versão do modelo computacional com a utilização de premissas de tarifação horária de energia elétrica;
- Análise de do comportamento de infraestrutura de recarga em garagem com instalações de painéis fotovoltaicos e armazenamento estático de energia via baterias estáticas de segunda vida.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [01] UNITED NATIONS. Intergovernmental Panel on Climate Change - IPCC. **Sixth Assessment Report: Working Group III Contribution** , Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. [S. l.], 4 abr. 2022. Disponível em: [https://report.ipcc.ch/ar6/wg3/IPCC\\_AR6\\_WGIII\\_Full\\_Report.pdf](https://report.ipcc.ch/ar6/wg3/IPCC_AR6_WGIII_Full_Report.pdf). Acesso em: 6 nov. 2022.
- [02] ICCT | C40. Zero Emission Bus Rapid-Deployment Accelerator - ZEBRA. **Benefícios da entrada exclusiva de ônibus de emissão zero na frota de São Paulo**. [S. l.], 6 nov. 2022. Disponível em: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/Beneficios-ZEBRA-A4-v3.pdf>. Acesso em: 6 nov. 2022.
- [03] BARRIA, Carlos; GUEVARA, Angelo; JIMENEZ, Angel; SERIANI, Sebastian. Relating Emotions, Psychophysiological Indicators and Context in Public Transport Trips: Case Study and a Joint Framework for Data Collection and Analysis. **SSRN**, 10 jun. 2022. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.2139/ssrn.4133094>. Acesso em: 6 nov. 2022.
- [04] CHINA AUTOMOTIVE TECHNOLOGY AND RESEACH CENTER. New Energy Buses in China Overview on Policies and Impacts. [S. l.]: **Deutsche Gesellschaft für Internationale Zusammenarbeit (GIZ) GmbH**, 2020. Disponível em: [https://changing-transport.org/wp-content/uploads/2020\\_GIZ\\_New-Energy-Buses-in-China.pdf](https://changing-transport.org/wp-content/uploads/2020_GIZ_New-Energy-Buses-in-China.pdf). Acesso em: 6 nov. 2022.
- [05] THE EUROPEAN PARLIAMENT AND THE COUNCIL OF THE EUROPEAN UNION. 20/06/2019. **DIRECTIVE (EU) 2019/116**, [S. l.], 12 jul. 2019. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/eli/dir/2019/1161/oj>. Acesso em: 9 nov. 2022.
- [06] GOBIERNO DE CHILE. Ministerio de Energía. **Estrategia Nacional de Electromovilidad**. [S. l.], Outubro 2021. Disponível em: [https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia\\_nacional\\_de\\_electromovilidad\\_2021\\_0.pdf](https://energia.gob.cl/sites/default/files/documentos/estrategia_nacional_de_electromovilidad_2021_0.pdf). Acesso em: 9 nov. 2022.
- [07] THE WHITE HOUSE. **FACT SHEET: Progress on Biden-Harris Action Plan for Building Better School Infrastructure**. [S. l.], 26 out. 2022. Disponível em: <https://www.whitehouse.gov/briefing-room/statements-releases/2022/10/26/fact->

sheet-progress-on-biden-harris-action-plan-for-building-better-school-infrastructure/.  
Acesso em: 6 nov. 2022.

[08] PERUMAL, Shyam; LUSBY, Richard; LARSEN, Jesper. Electric bus planning & scheduling: A review of related problems and methodologies. **European Journal of Operational Research**, [s. l.], n. 301, p. 395-413, 3 nov. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2021.10.058>. Acesso em: 4 jun. 2023.

[09] ZHANG, Li et al. Long-term charging infrastructure deployment and bus fleet transition considering seasonal differences. **Transportation Research Part D**, [s. l.], n. 111, 12 setembro 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103429>. Acesso em 4 jun. 2023

[10] JIANG, Mengyan; ZHANG, Yi; ZHANG, Yi. Electric Bus Scheduling Considering Limited Charging Facility Capacity for Large-Scale Operation. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, ASCE, 24 jun. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1061/JTEPBS.0000706>. Acesso em: 4 jun. 2023.

[11] MUÑOZ, Andrés Braga. Electrificación Del Transporte – Buses Eléctricos Y El Sistema De Distribución. 2022. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico - Santiago de Chile. **Universidad de Chile**, 2022. Disponível em: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184624>. Acesso em: 4 jun. 2023.

[12] BARRIENTOS, Andrés Nicolás Zapata. Impacto De Electrificación De Buses Del Transporte Público De Santiago Sobre El Sistema Eléctrico Nacional. 2022. Memoria para Optar al Título de Ingeniero Civil Eléctrico - Santiago de Chile. **Universidad de Chile**, 2022. Disponível em: <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/184624>. Acesso em: 4 jun. 2023.

[13] NEEDELL, Zachary; WEI, Wei; TRANCIK, Jessika. s. **Cell Reports Physical Science**, [s. l.], n. 4, 15 mar. 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.xcrp.2023.101287>. Acesso em: 4 jun. 2023.

[14] GOROSABEL, Oier; XYLIA, Maria; SILVEIRA, Semida. A framework for the assessment of electric bus charging station construction: A case study for Stockholm's inner city. **Sustainable Cities and Society**, [s. l.], ed. 78, 9 dez. 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2021.103610>. Acesso em: 4 jun. 2023.

- [15] ZHOU, Yu et al. Robust optimization for integrated planning of electric-bus charger deployment and charging scheduling. **Transportation Research Part D**, [s. l.], n. 110, 24 jul. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103410>. Acesso em: 4 jun. 2023.
- [16] HU, Hao et al. A joint optimisation model for charger locating and electric bus charging scheduling considering opportunity fast charging and uncertainties. **Transportation Research Part C**, [s. l.], n. 141, 12 maio 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trc.2022.103732>. Acesso em: 4 jun. 2023.
- [17] HE, Yi; LIU, Zhaocai; SONG, Ziqi. Integrated Charging Infrastructure Planning And Charging Scheduling For Battery Electric Bus Systems. **Transportation Research Part D**, [s. l.], n. 111, 5 set. 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2022.103437>. Acesso em: 4 jun. 2023.
- [18] US DEPARTMENT OF ENERGY. **Alternative Fuels Data Center**. [S. l.], 2022. Disponível em: [https://afdc.energy.gov/fuels/renewable\\_diesel.html](https://afdc.energy.gov/fuels/renewable_diesel.html). Acesso em: 4 jun. 2023.
- [19] HEID, Bernd; MARTENS, Christopher; WITHANER, Markus. **Unlocking hydrogen's power for long-haul freight transport**. [S. l.]: McKinsey, 2 ago. 2022. Disponível em: <https://www.mckinsey.com/capabilities/operations/our-insights/global-infrastructure-initiative/voices/unlocking-hydrogens-power-for-long-haul-freight-transport>. Acesso em: 6 nov. 2022.
- [20] BLOOMBERGNEF. **Electric Vehicle Outlook 2022**. [S. l.], 1 jun. 2022. Disponível em: <https://about.bnef.com/electric-vehicle-outlook/>. Acesso em: 6 nov. 2022.
- [21] SIEMENS. **A detour to success**: The world's first electric streetcar. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.siemens.com/global/en/company/about/history/stories/first-electric-streetcar.html>. Acesso em: 6 nov. 2022.
- [22] HAMMER, Mick. How crooks stalled the rise of electric cars for 100 years. **New Scientist**, [S. l.], p. -, 6 set. 2019. Disponível em: <https://www.newscientist.com/article/mg23531420-600-how-crooks-stalled-the-rise-of-electric-cars-for-100-years/>. Acesso em: 6 nov. 2022.



[23] RAPID TRANSITION ALLIANCE. **All aboard the electric bus**: modern public transport powered by electricity is coming back quickly, to the benefit of people and the climate. [S. l.], 30 abr. 2019. Disponível em: <https://www.rapidtransition.org/stories/all-aboard-the-electric-bus-modern-public-transport-powered-by-electricity-is-coming-back-quickly-to-the-benefit-of-people-and-the-climate/>. Acesso em: 6 nov. 2022.

[24] PIERITZ, Boris. **THE STORY OF ELECTRIC BUSES**. [S. l.]: MAN Trucks, 2022. Disponível em: <https://www.mantruckandbus.com/en/electrifying-europe-day-1/04-29-deepdive-the-story-of-electric-buses.html>. Acesso em: 6 nov. 2022.

[25] UFRJ. LABMOB; TECHNICAL UNIVERSITY OF DENMARK. **E-BUS RADAR**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.ebusradar.org/>. Acesso em: 29 nov. 2022.

[26] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES - MTT. Subsecretaria de Transportes. **Parque Vehiculares del país**: Abril 2021. [S. l.], 2021. Disponível em: <https://usuarios.subtrans.gob.cl/estadisticas/parques-vehiculares.html>. Acesso em: 29 nov. 2022.

[27] DEPARTAMENTO ADMINISTRATIVO NACIONAL DE ESTADÍSTICA - DANE. **Encuesta de Transporte Urbano de Pasajeros (ETUP)**. [S. l.], fev 2022. Disponível em: <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/transporte/encuesta-de-transporte-urbano-etup>. Acesso em: 29 nov. 2022.

[28] PLATAFORMA NACIONAL DE MOBILIDADE ELÉTRICA; BARASSA & CRUZ CONSULTING. **2º Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.pnme.org.br/wp-content/uploads/2022/11/2o-Anuario-Brasileiro-de-Mobilidade-Eletrica.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2022.

[29] MINISTERIO DE TRANSPORTES Y TELECOMUNICACIONES - MTT. Directorio de Transporte Público Metropolitano - DTPM. **NUEVO MODELO DE NEGOCIO DEL SISTEMA DE TRANSPORTE PÚBLICO METROPOLITANO**. [S. l.], 2022. Disponível em: <https://www.dtpm.cl/descargas/memoria/NUEVO%20MODELO%20DE%20NEGOCIO%20DEL%20SISTEMA%20DE%20TRANSPORTE%20PUBLI%20CO%20METROPOLITANO.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2022.

[30] ASSOCIAÇÃO NACIONAL DAS EMPRESAS DE TRANSPORTE URBANO - NTU. **Os grandes números da mobilidade urbana**: Cenário Nacional. [S. l.],

novembro 2022. Disponível em:  
<https://www.ntu.org.br/novo/AreasInternas.aspx?idArea=7>. Acesso em: 29 nov. 2022.

[31] ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS - ONU. **Acordo de Paris**. [S. l.], 2015. Disponível em: [https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf). Acesso em: 29 nov. 2022.

[32] SECRETARIA GERAL DA PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA. **Decreto nº 9.073, de 5 de julho de 2017**. [S. l.], 5 jul. 2017. Disponível em: [https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2015-2018/2017/decreto/d9073.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2015-2018/2017/decreto/d9073.htm). Acesso em: 29 nov. 2022.

[33] PREFEITURA DE SÃO PAULO. SPTrans. **Frota Contratada**. [S. l.], 1 nov. 2022. Disponível em: [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/mobilidade/institucional/sptrans/acesso\\_a\\_informacao/index.php?p=245214](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/mobilidade/institucional/sptrans/acesso_a_informacao/index.php?p=245214). Acesso em: 29 nov. 2022.

[34] CÂMARA MUNICIPAL DE SÃO PAULO. Lei nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018. [S. l.], 17 jan. 2018. Disponível em: <http://documentacao.camara.sp.gov.br/iah/fulltext/leis/L16802.pdf>. Acesso em: 29 nov. 2022.

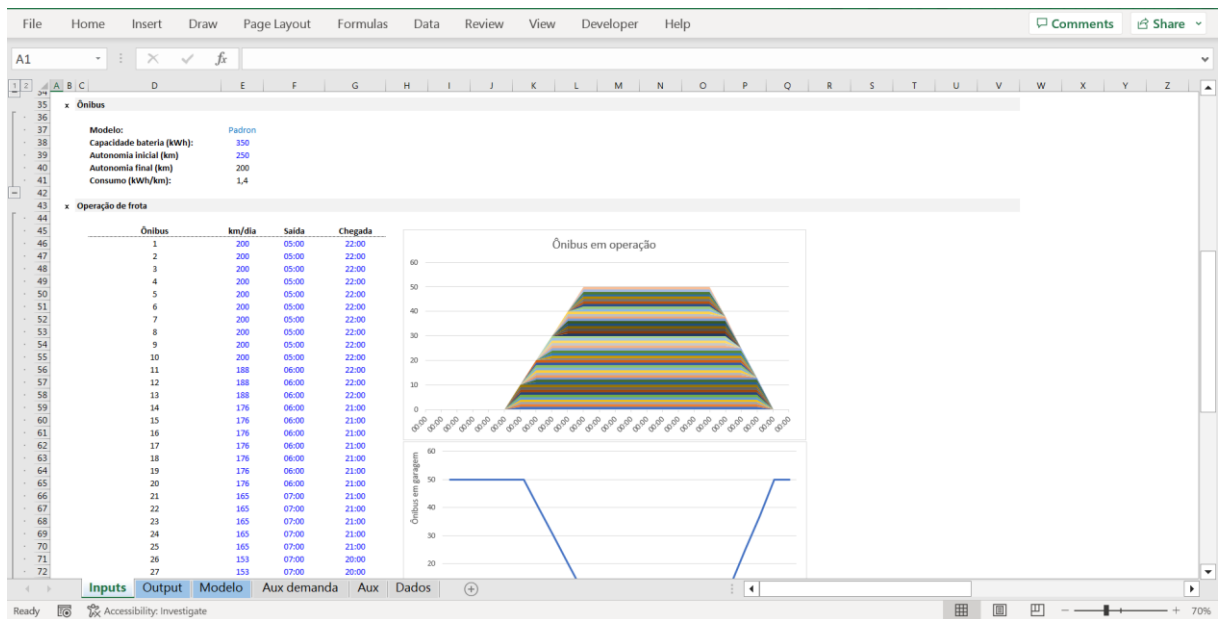
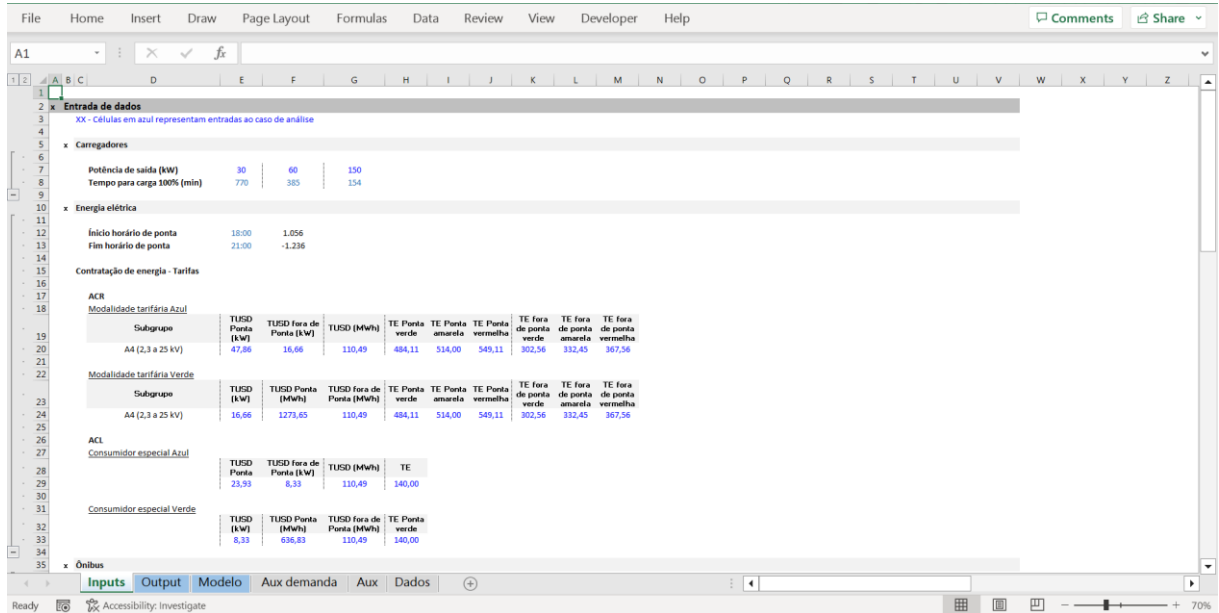
[35] SCHIAVON, Taís. A conformação dos caminhos do Estado de São Paulo: breves correlações com seu desenvolvimento urbano e econômico. **Confins: Revista franco-brasileira de geografia**, [s. l.], v. 44, 12 mar. 2020. Disponível em: <https://doi.org/10.4000/confins.25959>. Acesso em: 4 jun. 2023.

[36] AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA - ANEEL. **Resolução normativa nº 1000**, de 7 de dezembro de 2021. [S. l.], 7 dez. 2021. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf>. Acesso em: 4 jun. 2023.

[37] CÂMARA DE COMERCIALIZAÇÃO DE ENERGIA ELÉTRICA - CCEE. **Painel de Preços**: Histórico da Média Mensal. [S. l.], 2023. Disponível em: <https://www.ccee.org.br/web/guest/precos/painel-precos>. Acesso em: 4 jun. 2023.

# ANEXO A

## Capturas de tela de inserção de dados pelo usuário do modelo.





## ANEXO C

Varáveis de entrada referentes à operação de frota de ônibus utilizada em caso ilustrativo.

Ônibus	km/dia	Saída	Chegada
1	200	05:00	22:00
2	200	05:00	22:00
3	200	05:00	22:00
4	200	05:00	22:00
5	200	05:00	22:00
6	200	05:00	22:00
7	200	05:00	22:00
8	200	05:00	22:00
9	200	05:00	22:00
10	200	05:00	22:00
11	188	06:00	22:00
12	188	06:00	22:00
13	188	06:00	22:00
14	176	06:00	21:00
15	176	06:00	21:00
16	176	06:00	21:00
17	176	06:00	21:00
18	176	06:00	21:00
19	176	06:00	21:00
20	176	06:00	21:00
21	165	07:00	21:00
22	165	07:00	21:00
23	165	07:00	21:00
24	165	07:00	21:00
25	165	07:00	21:00

Ônibus	km/dia	Saída	Chegada
26	153	07:00	20:00
27	153	07:00	20:00
28	153	07:00	20:00
29	153	07:00	20:00
30	153	07:00	20:00
31	141	08:00	20:00
32	141	08:00	20:00
33	141	08:00	20:00
34	141	08:00	20:00
35	141	08:00	20:00
36	141	08:00	20:00
37	141	08:00	20:00
38	141	08:00	20:00
39	129	08:00	19:00
40	129	08:00	19:00
41	118	09:00	19:00
42	118	09:00	19:00
43	118	09:00	19:00
44	118	09:00	19:00
45	118	09:00	19:00
46	118	09:00	19:00
47	118	09:00	19:00
48	118	09:00	19:00
49	118	09:00	19:00
50	118	09:00	19:00