



Acelerando a Transição: Estratégia para Eletrificar a Frota Brasileira de Ônibus até 2030



ITDP BRASIL

Direção executiva

Clarisse Cunha Linke

Equipe de programas e comunicação

Aline Leite

Ana Nassar

André Mello

Bernardo Serra

Danielle Hoppe

Giulia Milesi

Iuri Moura

João Miranda

Juan Melo

Laís Silva

Leonardo Veiga

Lorena Freitas

Mariana Brito

Rebecca Bassi

Equipe administrativa e financeira

Célia Regina Alves de Souza

Lívia Guimarães

Paola Lomeu

Roselene Paulino Vieira

Acelerando a Transição: Estratégia para Eletrificar a Frota Brasileira de Ônibus até 2030

Coordenação

Bernardo Serra

André Mello

Autoria

André Mello

Bernardo Serra

Camila Perotto (Scipopulis)

Gustavo Gonçalves (Scipopulis)

Milena Soares (Scipopulis)

Rebecca Bassi

Roberto Speicys (Scipopulis)

Colaboração

Ana Nassar

Clarisse Cunha Linke

Juan Melo

Leonardo Veiga

Mariana Brito

Apoio



Foto de capa

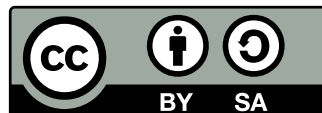
ITDP Brasil

Diagramação e arte final

Giulia Milesi

Data

Agosto, 2025



Este trabalho está licenciado sob licença Creative Commons Atribuição-Compartilhagual 3.0 Brasil. Para visualizar uma cópia desta licença, visite <http://creativecommons.org/licenses/bysa/3.0/br/> ou mande uma carta para Creative Commons, PO Box 1866, Mountain View, CA 94042, EUA.

SUMÁRIO

1. Sumário executivo	7
2. Introdução	9
3. Escopo e objetivos	10
4. Veículos elétricos no Brasil	11
4.1 Tipologias de ônibus	11
4.1.1 Ônibus Convencional (<i>Padron</i> e Básico)	12
4.1.2 Ônibus Articulado	12
4.1.3 Miniônibus	12
4.1.4 Midiônibus	12
4.1.5 Micro-ônibus	13
4.2 Veículo típico	13
4.2.1 Conclusão	14
5. Análise do potencial de eletrificação do transporte público no Brasil	15
5.1 Bases de dados	16
5.2 Desafios na gestão de dados	16
5.3 Escopo	17
5.4 Metodologia	19
5.5 Frotas de ônibus	20
5.6 Dinâmicas operacionais	22
5.7 Potencial de eletrificação por sistema analisado	24
6. Emissão de Poluentes	26
6.1 Inventários de emissão de poluentes	26
6.2 Metodologia	27
6.2.1 Estimativa <i>bottom-up</i>	27
6.2.2 Custo Social do Carbono	28
6.3 Efeitos da substituição de frota na emissão de GEE	28
6.3.1 Inventário de emissões e intensidades de uso nos sistemas analisados	28
6.3.2 Impacto econômico da redução de emissões nos sistemas analisados	31
6.3.3 Expansão dos resultados	32
7. Recomendações	35
7.1 Aprimorar a gestão e governança de dados e contratos de transporte público coletivo	35
7.2 Incentivar a adoção de estratégias de recarga alinhadas às demandas operacionais dos sistemas	35
7.3 Coordenar a compra de ônibus elétricos por municípios e estados que solicitam recursos à União	36
8. Conclusão	38
9. Referências	40
10. Anexos	42
10.1 Catálogos de veículos elétricos	42
10.2 Estimativa de demanda energética por rota	44
10.3 Detalhamento dos Cálculos de Emissões	45
10.3.1 Fatores de Emissão	45
10.3.2 Cálculo das Emissões Diárias	46

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1: Tipologias de ônibus segundo ABNT	10
FIGURA 2: Número de modelos e fabricantes distribuídos por tipologias de ônibus	10
FIGURA 3: Distribuição geográfica dos sistemas analisados	
do escopo planejado e efetivo do estudo	17
FIGURA 4: Esquema representativo da metodologia do estudo	18
FIGURA 5: Esquema detalhado da metodologia do estudo	19
FIGURA 6: Tecnologia por tipologia de veículos das frotas analisadas, em termos absolutos e relativos	20
FIGURA 7: Quantidade de veículos cadastrados e monitorados por sistema	21
FIGURA 8: Distribuição da frota conforme a produção quilométrica diária, considerando caso médio (a) e máximo (b)	22
FIGURA 9: Distribuição da frota conforme o consumo energético diário, considerando caso médio (a) e máximo (b)	22
FIGURA 10: Potencial de eletrificação das frotas por sistema, em valores absolutos	23
FIGURA 11: Potencial de eletrificação das frotas por sistema, em valores proporcionais	23

LISTA DE TABELAS

TABELA 1: Especificação técnica - Veículo convencional típico	12
TABELA 2: Escopo planejado e efetivo do estudo	16
TABELA 3: Emissões anuais, totais e parciais, por tecnologia do veículo, para os 18 sistemas analisados	28
TABELA 4: Potencial de redução de emissões, por tecnologia do veículo, para os 18 sistemas analisados	29
TABELA 5: Custos totais de emissões considerando o CSC, para os 18 sistemas analisados	30
TABELA 6: Custos potencialmente evitados considerando o CSC, para os 18 sistemas analisados	31
TABELA 7: Estimação de emissão de CO ₂ eq, considerando os 18 sistemas de transporte analisados	33
TABELA 8: Resumo dos quantitativos de veículos analisados	37
TABELA 9: Pesquisa de mercado de ônibus elétricos	40
TABELA 10: Parâmetros da operação para estimativa de consumo energético	42
TABELA 11: Fatores de conversão de CO ₂ eq	43

LISTA DE SIGLAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas

CAPEX - *Capital Expenditure*

CEPAL - Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe

CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CSC - Custo Social do Carbono

EPL - Empresa de Planejamento e Logística

GEE - Gases de Efeito Estufa

GPS - *Global Positioning System*

GTFS - *General Transit Feed Specification*

ICCT - *International Council on Clean Transportation*

IEMA - Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos

IPCC - Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

IPEA - Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada

KML - *Keyhole Markup Language*

KMZ - *Keyhole Markup Language Zipped*

NBR - Norma Brasileira Regulamentadora

Novo PAC - Novo Programa de Aceleração do Crescimento

NTU - Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos

REFROTA - Programa de Renovação de Frota do Transporte Público Coletivo Urbano

RM - Região Metropolitana

SEEG - Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa

SIMU - Sistema Nacional de Informações em Mobilidade Urbana

SMTR - Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro

SRTM - *Shuttle Radar Topography Mission*

TPC - Transporte Público Coletivo

1. SUMÁRIO EXECUTIVO

O estudo **identifica a quantidade de ônibus elétricos que poderiam ser implementados nas 21 regiões metropolitanas mais populosas do país**, no curto e médio prazo, com menor impacto operacional possível, sem necessidade de aumento de frota para complemento da operação e de forma focalizada de acordo com a tecnologia e a idade dos ônibus. Para tal, a análise identificou os veículos a diesel em operação atualmente e seus padrões de viagem, traduzidos em consumo energético compatível com a autonomia dos ônibus elétricos disponíveis no mercado e, por fim, indicou a transição tecnológica a partir da priorização de retirada dos veículos menos eficientes¹ de circulação, potencializando os efeitos e benefícios da política, além de conferir previsibilidade para a indústria.

As análises propostas foram construídas a partir de dados publicados por agências de transporte ou de materiais fornecidos por gestores. Quando não publicizados, foram requisitados o inventário da frota do sistema, traçado das rotas em operação e histórico de posições dos veículos. Além disso, também foi incorporada ao estudo a base de dados relativa à topografia das cidades para contemplar a influência de aclives sobre o desempenho operacional dos serviços, pois é um fator crítico para veículos elétricos. **Dentre as 21 regiões metropolitanas analisadas, foram contemplados 18 sistemas de transporte, entre municipais e intermunicipais, considerando a qualidade e a disponibilidade dos dados fornecidos.**

A pesquisa foi dividida em três etapas:

-  Apresentação dos fabricantes, tipologias e modelos de ônibus elétricos disponíveis no mercado brasileiro², visando a constituição de uma estratégia de eletrificação do transporte público que considere a oferta de ônibus do mercado;
-  Análise de dados operacionais de 18 sistemas para avaliar a operação de cada veículo a fim de determinar seu consumo energético e seu potencial de substituição por ônibus elétricos; e
-  Estimação, em termos de redução de emissões e seu respectivo impacto econômico, da substituição da frota proposta.

Os resultados mostram que:

- As tipologias com maior oferta no mercado de ônibus elétrico brasileiro são as básico e *padron* (convencionais), totalizando 16 modelos diferentes de 9 fabricantes;
- Somando os veículos de cada um dos 18 sistemas analisados, o potencial de eletrificação estimado contempla 14.146 ônibus convencionais;
- São Paulo, Rio de Janeiro, Goiânia e Belo Horizonte são os sistemas com maior potencial de eletrificação em valores absolutos;
- Belo Horizonte (Núcleo³ e Região Metropolitana), Curitiba (Núcleo e Região Metropolitana), Florianópolis (Núcleo), Goiânia (Região Metropolitana), Porto Alegre (Núcleo) e Rio de Janeiro (Núcleo e Região Metropolitana) são as regiões que podem ter a maior parcela de suas frotas substituída por ônibus elétrico em termos relativos;
- 24,64% das emissões de GEE dos sistemas de transporte público analisados são provenientes de veículos com tecnologia Euro III e Euro V com mais de 5 anos, com consumo diário inferior à capacidade de uma bateria;
- Estima-se que a substituição da frota de tecnologia Euro III e Euro V com mais de 5 anos poderia evitar um total de 437,7 kt de CO₂eq por ano, e uma respectiva economia, considerando apenas o Custo Social do Carbono, entre R\$ 54,4 e R\$ 62,1 milhões por ano;

¹ Esses veículos são geralmente mais antigos e deverão ser renovados no curto prazo para cumprir normas e cláusulas contratuais.

² Dados coletados até agosto de 2024.

³ Entende-se como núcleo aquele município geralmente mais populoso e que concentra grande parte dos fluxos e das oportunidades de emprego e serviços dentro da área metropolitana, exercendo um papel de influência sobre a região.

7. A metodologia de análise de impacto foi expandida para as demais cidades brasileiras que não possuem dados operacionais de frota, a fim de estimar os impactos positivos do programa Novo PAC/REFROTA. Os investimentos realizados na primeira fase do programa contemplam a introdução 2.296 veículos elétricos, podendo reduzir as emissões de CO₂eq no transporte público em 8,8 kton por ano (7,9% em relação aos níveis atuais). Em termos socioeconômicos, essa substituição pode reduzir custos associados às emissões da ordem de R\$ 11,6 milhões por ano.

Os resultados fornecem subsídios para a adoção de medidas que potencializam as políticas públicas de descarbonização do setor de transporte. O objetivo é maximizar a eficácia dos investimentos públicos e os ganhos socioambientais no médio prazo, além de fortalecer a transparência e a gestão dos sistemas de transporte público coletivo. Para isso, são apresentadas recomendações alinhadas às políticas federais, como:



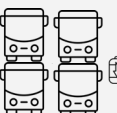
1

Aprimoramento da gestão e governança de dados e contratos de transporte público coletivo;



2

Incentivo à adoção de estratégias de recarga alinhadas às demandas operacionais dos sistemas;



3

Coordenação, pelo Governo Federal, da compra de ônibus elétricos por municípios e estados que solicitam recursos à União;

2. INTRODUÇÃO

O transporte rodoviário de bens e passageiros é a maior fonte de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na área de transportes, sendo responsável por 69% das emissões do setor. Por sua vez, segundo dados atualizados do Sistema de Estimativa de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa (SEEG)⁴, a categoria “transportes” é responsável por 53,3% das emissões do setor de energia no Brasil. As emissões relativas ao transporte rodoviário de passageiros atingiram sua máxima histórica, sendo 74% associadas ao uso de automóveis, especialmente em áreas urbanas. Para atingirmos as metas de redução de emissões estabelecidas pelo Acordo de Paris, é fundamental que o transporte rodoviário seja descarbonizado e que os sistemas de transporte público sejam cada vez mais atrativos para cativar os usuários de veículos particulares.

Dentre os diferentes modos de transporte rodoviário, o transporte público por ônibus é um componente essencial, responsável pelo deslocamento de milhões de pessoas. Segundo dados de 2022 do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), considerando a descarbonização dos ônibus a diesel que prestam esse serviço, a única tecnologia zero emissões atualmente competitiva em termos de custos e maturidade tecnológica são os ônibus elétricos. Mesmo em cenários com baixa ocupação dos ônibus (cerca de 20% em média) os ônibus elétricos são competitivos em relação aos veículos particulares elétricos considerando os valores atuais. Além da redução das emissões de GEE, a introdução de ônibus elétricos traz outros benefícios como a diminuição da emissão de materiais particulados relacionados à combustão, a redução da poluição sonora e a melhoria na qualidade do ar e na saúde pública, especialmente em áreas de alta densidade populacional.

No contexto brasileiro, a constituição de frotas compostas por ônibus elétricos a bateria é particularmente vantajosa, tendo em vista a ampla capacidade de geração de energia limpa e renovável da rede de energia elétrica nacional. Além disso, a presença de um parque industrial atuante no setor de transportes também promove eficiência em uma estratégia de adoção de veículos elétricos como tecnologia fundamental para descarbonização do transporte público sobre pneus. O presente estudo, ao abordar aspectos fundamentais para impulsionar o projeto de descarbonização brasileiro no curto/médio prazo, posiciona-se como componente chave do planejamento nacional para alcançar a sustentabilidade no transporte público.

Considerando o comprometimento firmado pelo Governo Federal através da atualização da NDC brasileira apresentada em Baku no final de 2024, que foca em reduzir as emissões de GEE entre 59% e 67% até 2035 em comparação aos níveis de 2005, e as políticas intersetoriais de descarbonização do setor de transportes, o estudo **Acelerando a Transição: Estratégia para Eletrificar a Frota Brasileira de Ônibus até 2030** oferece insumos técnicos para o desenvolvimento de uma **política pública focalizada de incentivo à eletrificação do transporte público coletivo**. A pesquisa tem como objetivo maximizar a eficiência e a eficácia do investimento público, sobretudo para o programa Renovação de Frota do Transporte Público Coletivo Urbano (REFROTA) no Novo Programa de Aceleração do Crescimento (Novo PAC), que se compromete a financiar milhares de veículos elétricos nas cidades brasileiras por meio de chamamentos públicos para estados e municípios.

A análise visa fornecer informações técnicas para subsidiar a tomada de decisão no curto prazo, sem promover mudanças bruscas ou grandes intervenções nos sistemas atuais. Para tal, considerou-se o panorama atual do mercado de ônibus elétricos no Brasil, bem como as características operacionais das redes de transporte para avaliar o potencial de eletrificação no médio prazo das frotas de ônibus das 21 maiores regiões metropolitanas do país, que representam 41% da população brasileira e mais de 50% da frota de ônibus urbanos em operação. A partir dos resultados deste estudo, o Governo Federal pode determinar os investimentos necessários para acelerar a transição tecnológica e aprimorar a sustentabilidade no transporte público.

⁴ Ver mais em: <https://plataforma.seeg.eco.br/?highlight=br-emissions-by-sector-energy>

3. ESCOPO E OBJETIVOS

Explorar o transporte público em escala nacional fornece uma compreensão dos caminhos rumo à descarbonização do setor, considerando a dimensão territorial do Brasil e a sua diversidade. Em última instância, a análise conecta mobilidade urbana e sustentabilidade, fornecendo evidências e diagnósticos locais para apoiar a elaboração de políticas públicas para o planejamento de transportes.

Nesse sentido, o principal objetivo do estudo é **identificar o potencial de eletrificação das redes de transporte das 21 regiões metropolitanas mais populosas do Brasil, no curto e médio prazo, para acelerar e potencializar a descarbonização do setor**. A análise considera, em particular, o tamanho e as condições das frotas operantes nos sistemas analisados, além de características dos serviços em operação, como topografia, extensão e dinâmica de velocidades. Evidentemente, essa análise não se baseia apenas na demanda potencial de cada região, mas também na oferta de veículos capazes de atender a essa necessidade. Os objetivos específicos são:

- 1** **Descrever modelos de ônibus elétricos atualmente disponíveis no Brasil**, identificando fabricantes e detalhando tipologias e características dos veículos, especialmente aquelas associadas a baterias, operações de recarga e dimensões da composição chassi-carroceria-motor;
- 2** **Caracterizar padrões de operação das frotas de ônibus em cidades e regiões metropolitanas brasileiras**, detalhando quantidade, tipologia, idade média, além da estimativa de produção quilométrica e consumo energético associados a um dia típico de operação;
- 3** **Estimar as emissões de poluentes em cada sistema analisado**, especificando a quantidade de poluentes, em quilogramas, emitidos diariamente pela frota de ônibus do transporte público e quantificando o respectivo custo social.

Para atingir esses objetivos específicos, a metodologia proposta se baseia em dados operacionais das redes analisadas, a fim de obter uma visão detalhada do comportamento de cada veículo que compõe o sistema. Tal granularidade é necessária para caracterizar a operação de cada ônibus, a fim de avaliar se o seu perfil operacional é compatível com a operação elétrica. A partir desses dados desagregados, foi construído um quadro do potencial de eletrificação brasileiro a partir das regiões analisadas.

Dado o panorama de dados de transporte no Brasil⁵, não são todas as regiões do escopo proposto inicialmente que puderam reunir as condições necessárias na forma de disponibilidade de informações. Ainda assim, essa decisão metodológica fornece um panorama inédito das redes analisadas e complementa outras fontes de informação relacionadas a partir de outro ponto de vista.

O processo inicial de coleta de dados, que consistia na angariação das informações de transporte público coletivo publicizados pelos poderes públicos locais, permitiu a construção de um panorama a respeito da governança e da qualidade de dados urbanos nas cidades, no qual foi discutido desafios e potenciais lacunas existentes para propor políticas públicas (em nível municipal e federal) baseadas em evidências. Este estudo propõe, portanto, uma metodologia aplicável em escala nacional para avaliação (ex-ante) de políticas públicas relacionadas à mobilidade urbana sustentável. A abordagem adotada propõe estratégias para focalizar e priorizar os incentivos públicos, visando maximizar seu impacto socioambiental e econômico.

⁵ Instituto de Políticas de Transporte e Desenvolvimento (ITDP Brasil). Insumos para a Estratégia Nacional de Mobilidade Urbana". Disponível em: itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2024/10/Insumos-para-Estrategia-Nacional-de-Mob-Urbana.pdf.

4. VEÍCULOS ELÉTRICOS NO BRASIL

Um aspecto importante para a criação de uma estratégia de incentivo à mobilidade elétrica é o mercado nacional de ônibus elétricos. A aceleração de um processo de adoção de novas tecnologias gera uma demanda crescente, podendo desencadear desequilíbrios no mercado e potencializar impactos negativos, como o aumento de preços dos veículos e componentes estratégicos, como semicondutores e baterias. Considerando a proposição de incentivos nacionais para eletrificação de frotas, uma análise mercadológica é relevante para guiar a estruturação dos investimentos e identificar potenciais desafios a serem superados ao adquirir e operar ônibus elétricos a bateria.

4.1 Tipologias de ônibus

No Brasil, as diferentes tipologias de ônibus são definidas pela Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) e estão ilustradas na Figura 1. A norma ABNT NBR 15570/2021, em especial, define as especificações técnicas básicas para cada uma delas. Neste estudo, foram pesquisadas as tipologias de veículos elétricos disponíveis no mercado brasileiro de ônibus elétricos, incluindo os tipos *padron*, articulado, básico, miniônibus, midiônibus e micro-ônibus, que serão detalhados nas seções subsequentes.

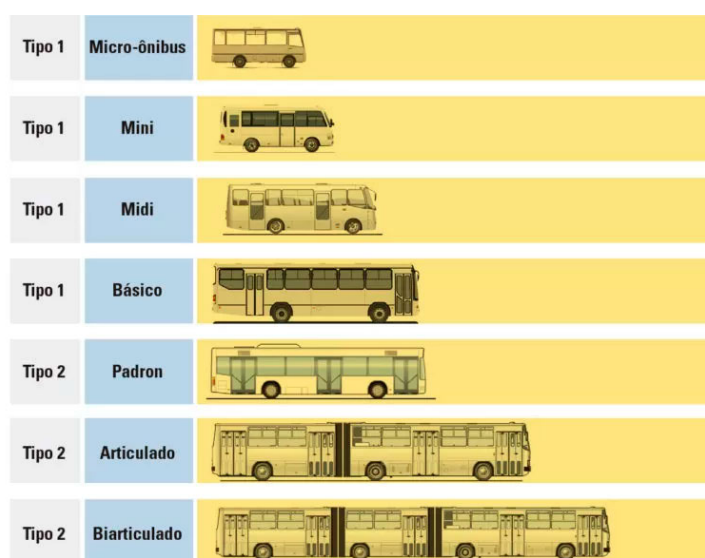


FIGURA 1
Tipologias de ônibus
segundo ABNT
FONTE: Transporte
Moderno⁶

A pesquisa de mercado identificou nove principais fabricantes de ônibus elétricos: BYD, Eletra, Higer, Marcopolo, Mercedes-Benz, Scania, SHC Ankaï, Volkswagen e Volvo. Cada um desses fabricantes oferece diferentes modelos de ônibus, totalizando 25⁷, que abrangem as tipologias de veículos mencionadas anteriormente. A distribuição do número de modelos e fabricantes por tipologia de veículo está ilustrada na Figura 2.

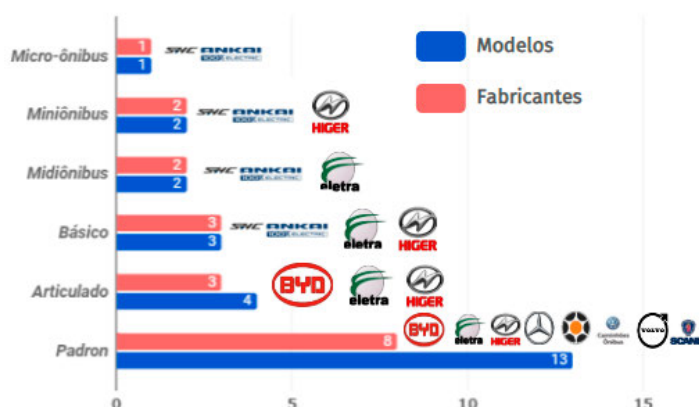


FIGURA 2
Número de modelos
e fabricantes
distribuídos por
tipologia de ônibus.
FONTE: Elaboração
própria

⁶ Transporte Moderno. Refrota prevê financiar dez mil ônibus no país. Disponível em: <https://transportemoderno.com.br/2017/05/10/refrota-preve-financiar-dez-mil-onibus-no-pais/>

⁷ Relação de modelos atualizada até o mês de agosto de 2024..

Uma visão detalhada desses modelos está apresentada no Anexo 1. Com base na norma ABNT e no levantamento de catálogos técnicos, as tipologias disponíveis no mercado brasileiro em 2024 são descritas a seguir.

4.1.1 Ônibus Convencional (*Padron e Básico*)

O modelo *padron* é amplamente utilizado no cenário nacional atual e, segundo a norma, seu comprimento varia entre 12 m e 14 m, com capacidade de transportar até 80 passageiros, entre sentados e em pé. O modelo básico, também muito utilizado no transporte público de passageiros, apresenta comprimento semelhante, entre 12 m e 14 m, mas capacidade ligeiramente inferior, transportando até 70 passageiros, conforme a NBR 15570/2021.

No total, foram identificados **16 modelos diferentes de veículos convencionais** (*padron* ou Básico), comercializados por **9 fabricantes** (BYD, Eletra, Higer, Mercedes-Benz, Marcopolo, Scania, SHC Ankai Volkswagen e Volvo). A maioria desses modelos possui piso baixo, facilitando o acesso ao veículo, com exceção do modelo D9A, da BYD, que é de piso alto. A capacidade das baterias varia de 282 kWh a 588 kWh, proporcionando uma autonomia entre 160 km e 250 km, e o tempo de recarga varia de 2 h a 4 h. Além disso, o peso bruto total dos veículos varia entre 19,5 t e 26,2 t.

Destaca-se que essas tipologias de veículos são predominantes nas composições das frotas de ônibus brasileiras. Além disso, apesar da norma brasileira definir diferenças técnicas entre veículos *padron* e básico, observa-se que as duas tipologias são similares em termos de capacidade e de especificações mecânicas. Por isso, neste estudo, adota-se a denominação "convencional" para analisar a presença, operação e substituição tecnológica dessas tipologias de veículos.

4.1.2 Ônibus Articulado

O modelo articulado é caracterizado por ter comprimento maior que 15 m e ter capacidade para até 100 passageiros sentados e em pé. Essa tipologia possui uma seção extra conectada por uma articulação, permitindo maior capacidade de passageiros. Por serem maiores, atendem normalmente rotas de maior demanda e usualmente estão presentes em cidades de maior porte.

Atualmente, foram identificados **4 modelos** comercializados por **3 fabricantes** (BYD, Eletra e Higer). Nota-se que a maioria dos modelos disponíveis é de piso baixo, sendo que o fabricante BYD conta com um modelo de piso alto (D11A). O peso varia de 38 t a 41 t e a capacidade da bateria é de 516 kWh a 590 kWh. A autonomia é de 180 km a 250 km, sendo que a bateria leva de 2 h a 4 h para ser recarregada.

Veículos biarticulados não foram considerados neste estudo por corresponderem a uma frota reduzida no Brasil e estarem restritos a poucas cidades brasileiras. Além disso, não foram encontrados fornecedores de veículos desse porte que se utilizem de motores de tração diferente da combustão.

4.1.3 Miniônibus

Os miniônibus são menores que os convencionais e têm capacidade reduzida. Portanto, são ideais para áreas de menor demanda e cidades pequenas. Segundo a norma, essa tipologia é caracterizada por comportar até 21 passageiros (sentados e em pé), tendo um comprimento máximo de 10 m.

Foram identificados **2 modelos** nessa categoria, comercializados por **2 fabricantes** (SHC Ankai e Higer). Esses veículos possuem baterias com capacidade entre 210 kWh e 269 kWh, autonomia de 250 km a 250 km e tempo de recarga de 1h15 à 1h35.

4.1.4 Midiônibus

Os midiônibus possuem comprimento de até 12 m e capacidade para até 40 passageiros sentados e em pé. Verificando a disponibilidade desse tipo de veículo no mercado brasileiro, foram encontrados **2 modelos**, comercializados por **2 fabricantes** (SHC Ankai e Eletra). Os modelos analisados têm peso variando entre 17 t e 18 t, capacidade da bateria entre 282 kWh e 338 kWh, autonomia de 250 km a 350 km e podem ser recarregadas em até 2 h.

4.1.5 Micro-ônibus

Os micro-ônibus possuem comprimento de até 8 m e capacidade para até 20 passageiros sentados e em pé, sendo indicados para áreas de menor demanda e cidades pequenas. Apenas **1 modelo** dessa tipologia está disponível no mercado nacional (SHC Ankai). Ele tem comprimento de 6,6 m, capacidade para 9 passageiros, pesa 9 t, tem bateria com capacidade entre 141 kWh e 163 kWh, autonomia de 250 km a 350 km e tempo de recarga variando entre 50 minutos e 1h10.

4.2 Veículo típico

Com base nos modelos apresentados anteriormente, foi definido um veículo típico para avaliar o potencial de eletrificação da frota analisada. A tipologia convencional, por ser a mais amplamente disponível no mercado, foi adotada como referência neste estudo. As características técnicas deste veículo estão detalhadas na Tabela 1, representando a média das especificações dos modelos comercialmente disponíveis.

Parâmetro	Unidade	Valor referência
Massa bruta (veículo+bateria)	kg	23.375
Largura	m	2,55
Altura	m	3,3
Área frontal	m2	8,48
Passageiros (total)	-	75
Massa (c/ passageiros)	kg	27.050
Potência nominal (motor)	kW	210
Capacidade nominal (bateria)	kWh	330
Capacidade real (bateria)	kWh	264
Autonomia nominal	km	250
Autonomia real	km	200

TABELA 1
Especificação técnica
- Veículo convencional
típico.
FONTE: Elaboração
própria

Entre as especificações, destacam-se aquelas associadas à autonomia do veículo, como a autonomia nominal, que expressa em quilômetros que o veículo pode percorrer sem necessidade de recarga. Com base nos catálogos analisados, este valor é usualmente estimado em 250 km, a depender das características de tráfego e de relevo nos trajetos percorridos.

Considera-se ainda a capacidade nominal da bateria de 330 kWh. Descontando parcela de 20% destinada à reserva técnica de rodagem e perdas de eficiência, com base em metodologias descritas na literatura⁸, define-se que a capacidade da bateria real de um veículo típico é de 264 kWh, sendo este o parâmetro de referência para discussões posteriores a respeito do potencial de eletrificação das frotas de ônibus. Com essa configuração, assume-se que o mesmo veículo seria capaz de percorrer 200 km sem necessitar de uma nova recarga.

4.2.1 Conclusão

Dentre as tipologias de ônibus definidas na norma ABNT NBR 15570/2021, nota-se a disponibilidade crescente de modelos disponíveis no mercado brasileiro. A exceção são os ônibus biarticulados, que no momento da realização deste estudo não estavam disponíveis no mercado brasileiro. Além disso, verificamos que as especificações dos modelos básico e *padron* são semelhantes, atendendo a casos de uso equivalentes. Por essa razão, ao longo do documento utilizaremos a denominação "convencional" para fazer referência aos dois modelos.

Considerando a oferta de ônibus elétricos no Brasil, nota-se que o veículo *padron* possui maior oferta no mercado brasileiro, em termos de quantidade de fabricantes e de modelos disponíveis. Para as demais tipologias, a oferta ainda é restrita. É possível também observar a predominância da operação de veículos dos tipos *padron* e básico nos sistemas de transporte público coletivo das cidades brasileiras. Por isso, essas tipologias foram adotadas como referência para o veículo típico, definido como parâmetro central para o desenvolvimento das análises.

⁸ HJELKREM, O. A. et al. A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 94, p. 102804, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102804>. Acesso em: 10 out. 2024.

5. ANÁLISE DO POTENCIAL DE ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO NO BRASIL

Estima-se que a frota de transporte público rodoviário no Brasil seja composta por cerca de 107 mil ônibus, com idade média de 6,4 anos, de acordo com um levantamento⁹ realizado em outubro de 2023 pela Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU). Nesse contexto, no intuito de fomentar a descarbonização da mobilidade urbana, esforços multilaterais visando a renovação da frota de ônibus e promoção de tecnologias limpas vêm sendo empregados no Brasil. Dentre eles, o Novo PAC destaca-se como um instrumento econômico relevante para a indução da transição energética, sendo um programa estabelecido em nível federal e com potencial de alcançar os demais entes federativos brasileiros.

O programa Novo PAC/REFROTA, especificamente, consiste em investimentos para aquisição de material rodante e equipamentos necessários para sua operação, podendo contemplar estados, Distrito Federal, municípios com mais de 150 mil habitantes, consórcios públicos e operadores privados. Considerando apenas os investimentos em ônibus elétricos, a primeira seleção estabelecida pelo programa, em 2023, disponibilizou recursos equivalentes a R\$ 7,3 bilhões, destinados à aquisição de 2.296 veículos elétricos.

No entanto, considerando a limitação de recursos intrínseca à formulação de programas e políticas públicas, a eficiência na alocação dos investimentos torna-se fundamental para garantir que suas metas sejam alcançadas. Sendo assim, a constituição de uma política pública focalizada é relevante para maximizar a eficiência desses investimentos, especialmente quando se tem em vista a diversidade de frotas e características socioespaciais das populações urbanas no Brasil, além de permitir que no médio prazo já sejam observados efeitos mais concretos da política, tanto ambientais quanto no mercado de ônibus e peças.

Conforme será apresentado nas seções seguintes, há sistemas em que a frota de ônibus circulante encontra-se em idade avançada, usando tecnologias ultrapassadas para consumir combustíveis fósseis. Esse contexto, em particular, torna a descarbonização do transporte público um processo relevante não somente para alcançar metas ambientais, mas também por ser uma oportunidade para promover qualidade do transporte público. Na prática, analisar em detalhe as frotas de ônibus permite identificar localidades e volumes de investimentos necessários para promover modernização, conforto e sustentabilidade na mobilidade urbana.

Além disso, é relevante ainda considerar a diversidade de relevos e configurações das cidades e regiões metropolitanas brasileiras, que influenciam a operação das frotas de ônibus ao estabelecer trajetos com características diversas e com condições de tráfego distintas. A análise individualizada dos sistemas de transporte contribui, portanto, com a identificação de oportunidades latentes de transformação e promove investimentos com maior impacto.

Diante disso, o desenvolvimento de uma estratégia para a transição energética do transporte público urbano requer contextualizações sobre a dinâmica do transporte público nas cidades brasileiras e estimativas dessa operação em um cenário de substituição tecnológica. Este estudo se propõe inicialmente a caracterizar sistemas de transporte, analisando especificamente:

- Frota cadastrada, com ênfase na tipologia, idade e tecnologia dos veículos;
- Produção quilométrica dos veículos;
- Demanda energética dos veículos.

Tendo em vista as possíveis mudanças operacionais geradas pelo uso da bateria como fonte energética dos ônibus, considera-se que a introdução de veículos elétricos pode ser (inicialmente) focalizada para minimizar incertezas operacionais. Nesse sentido, o presente estudo estima o potencial de eletrificação de frotas de ônibus ao quantificar veículos que atendem simultaneamente os critérios de:



- Idade superior a 5 anos, o que contempla as tecnologias Euro III e Euro 5 e indica a parcela de veículos que deveriam ser substituídos em curto ou médio prazo;

⁹ Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU). Anuário NTU 2023 - 2024. Brasília: NTU, 2024. Disponível em: <https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638573500081945042.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

- ✓ Consumo energético diário inferior à capacidade de uma bateria usualmente disposta em veículos convencionais elétricos, considerando definições dispostas anteriormente a partir especificações técnicas de veículos elétricos;
- ✓ Tipologia convencional, tendo em vista maior disponibilidade de modelos no mercado e predominância na composição das frotas de ônibus brasileiras.

Dessa forma, em cada um dos sistemas analisados, identifica-se a parcela da frota com características técnicas e operacionais favoráveis à substituição tecnológica. Na prática, a introdução de ônibus elétricos a bateria em tais circunstâncias representa a remoção de veículos ineficientes na queima de combustíveis fósseis e, portanto, mais poluentes do que as tecnologias mais recentes. Além disso, respeitando a capacidade de carga usual em veículos convencionais, o cenário de substituição de frota em discussão considera que a substituição dos veículos pode ocorrer sem incremento de frota, possibilitando ainda flexibilidade na definição de estratégias de recarga e minimizando alterações no padrão de alocação de veículos atualmente observado.

5.1 Bases de dados

As análises propostas foram construídas a partir de dados publicados por agências de transporte ou de materiais fornecidos por gestores. Quando não publicizados, foram requisitados o inventário de frota do sistema, traçado das rotas em operação e histórico de posições dos veículos. Além disso, também foi incorporada ao estudo a base de dados relativa à topografia das cidades para contemplar a influência de aclives sobre o desempenho operacional dos serviços, o que é um fator crítico para veículos elétricos.

Os dados coletados são representativos da operação das frotas de ônibus em dias úteis de 2024. Destaca-se que a presença de frota elétrica em operação é praticamente inexistente nos sistemas analisados. De acordo com dados do E-Bus Radar¹⁰ consultados em novembro de 2024, cerca de 1,5% da frota das cidades analisadas é formada por ônibus elétricos, concentrados principalmente em São Paulo. Além disso, os dados foram coletados antes da incorporação dos veículos financiados pelo Programa Novo PAC/REFROTA. Portanto, a baixa quantidade de veículos elétricos verificada atualmente reforça a necessidade da criação e da continuidade de mecanismos de incentivo à transição energética no transporte público.

Durante as análises foram utilizadas as seguintes bases de dados:

- **Inventário de frota**, para caracterizar os veículos de cada sistema, principalmente em função da tipologia, idade e tecnologia veicular;
- **Mapeamento das rotas da rede de transporte**, podendo ser estruturado em formato *General Transit Feed Specification* (GTFS) ou arquivos dos tipos KML, KMZ, *shapefile* ou *geojson*;
- **Topografia**, obtida a partir do projeto *Shuttle Radar Topography Mission*¹¹ (SRTM). Esses dados, capturados por satélites, possuem uma resolução espacial de 30 metros;
- **Posições dos veículos**, que usualmente são consolidadas em tabelas (formatos txt ou csv) e informam latitude, longitude, data, horário e rota em execução pelo veículo. Nos casos em que não há possibilidade de acessar posições de veículos, foram cedidas tabelas que compilam horários de partidas por veículo e por rota, permitindo as análises subsequentes previstas.

Na primeira fase do levantamento, foram acessados os dados das cidades¹² que disponibilizam as bases mencionadas em formatos abertos, o que agilizou o processamento e a análise. Em paralelo, as demais regiões foram contactadas múltiplas vezes para disponibilização dos dados, em particular as entidades públicas responsáveis pela gestão do transporte público. Essa comunicação foi estabelecida a partir de ofícios, apresentando formalmente o projeto e as bases de dados requisitadas, ou de contato direto com gestores e técnicos que já colaboraram previamente com a equipe técnica deste estudo. Destaca-se que, na maior parte dos casos, como será visto mais adiante, as informações requisitadas não foram cedidas, pois não eram acessíveis pelo poder público ou não estavam estruturadas adequadamente para serem processadas e analisadas.

5.2 Desafios na gestão de dados

A dificuldade na obtenção de dados de transporte público é uma questão recorrente em todo o país e foi abordada no estudo *Soluções para Incentivar a Gestão de Dados no Transporte Público*¹³.

O ITDP destaca os principais problemas nesse cenário, dos quais três se relacionam diretamente

¹⁰ Ver mais em: ebusradar.org.

¹¹ Disponível em: <https://portal.opentopography.org/raster?opentopolD=OTSRTM.082015.4326.1>

¹² Belo Horizonte, Curitiba, Porto Alegre, Rio de Janeiro e São Paulo.

¹³ <https://itdpbrasil.org/solucoes-para-incentivar-a-gestao-de-dados-no-transporte-publico/>

com as dificuldades encontradas no presente projeto. O primeiro é a fragilidade regulatória relacionada ao acesso aos dados, uma vez que atualmente não há uma regulamentação clara sobre o compartilhamento dessas informações, permitindo que as empresas privadas, geralmente responsáveis pelas operações, retenham esses registros. Em segundo lugar, há a carência na disponibilização de dados pelo setor público. Em muitos casos, mesmo com coleta e acesso, não é realizada a publicação dos dados abertos, que poderiam servir como insumos para pesquisas, empresas e para a população no geral.

Também é apontada a falta de estrutura técnica e institucional para gerenciar e centralizar essas informações, especialmente em áreas mais complexas, como as regiões metropolitanas. Isso dificulta as etapas de coleta, processamento e divulgação dos dados, resultando em inconsistências nos insumos produzidos e compartilhados. Durante a coleta de dados para esta análise, essas limitações foram evidentes, com incompatibilidades nas bases de dados que dificultaram a análise proposta. Tais problemas incluíram, por exemplo, inconsistências nos identificadores de veículos entre inventários de frota e transmissões de GPS, além de incompatibilidade nas nomenclaturas de rotas entre bases de dados de mapeamento e posições de veículos.

No estudo do ITDP Brasil, que tem como objeto as 21 maiores regiões metropolitanas do Brasil, observou-se que somente uma pequena parcela dos dados do setor são disponibilizados em portais de dados abertos, mesmo quando há uma infraestrutura de coleta de dados. Em destaque estão os sistemas municipais de São Paulo¹⁴, Curitiba¹⁵, Rio de Janeiro¹⁶, Belo Horizonte¹⁷ e Porto Alegre¹⁸, que mantêm portais de dados abertos e possibilitam o *download* de diversas bases, sendo atualizadas sistematicamente, conforme a rede de transporte é alterada.

Entretanto, quando se considera, por exemplo, os dados de posições dos veículos em tempo real (essenciais para este estudo de eletrificação de frota), somente 9% dos dados estão publicamente disponíveis, apesar de 72% dos sistemas terem GPS embarcado, segundo o estudo.

5.3 Escopo

O escopo planejado para este estudo contempla as 21 maiores regiões metropolitanas do Brasil, considerando os sistemas de transporte por ônibus presentes em cada uma delas. Adota-se a denominação núcleo (N) aquele sistema que atende exclusivamente o arranjo populacional de maior magnitude da região metropolitana, sendo composto por serviços restritos ao território municipal. O sistema de transporte que estabelece ligações entre os municípios é denominado intermunicipal, representando uma região metropolitana (RM). Considerando desafios associados à gestão e governança de dados requisitados e a metodologia proposta pelo estudo, foram analisados 18 dos sistemas inicialmente selecionados, indicados na tabela a seguir.

Região	Localidade	Núcleo (N)	Região Metropolitana (RM)
Centro-Oeste	Distrito Federal	Habilitado	Não habilitado
Centro-Oeste	Goiânia	NA	Habilitado com inconsistências
Nordeste	São Luís	Não habilitado	Não habilitado
Nordeste	Teresina	Habilitado com inconsistências	Não habilitado
Nordeste	Fortaleza	Não habilitado	Habilitado com inconsistências
Nordeste	João Pessoa	Não habilitado	Não habilitado
Nordeste	Maceió	Não habilitado	Não habilitado
Nordeste	Natal	Não habilitado	Não habilitado
Nordeste	Recife	NA	Não habilitado
Nordeste	Salvador	Habilitado	Não habilitado
Norte	Belém	Não habilitado	Não habilitado
Norte	Manaus	Não habilitado	Não habilitado
Sudeste	Baixada Santista	Não habilitado	Habilitado

TABELA 2
Escopo planejado e efetivo do estudo.
FONTE: Elaboração própria

¹⁴ Disponível em: <https://www.sptrans.com.br/desenvolvedores/>

¹⁵ Disponível em: <https://transporteservico.urbs.curitiba.pr.gov.br/>

¹⁶ Disponível em: <https://www.data.rio/datasets/>

¹⁷ Disponível em: <https://dados.pbh.gov.br/dataset>

¹⁸ Disponível em: <https://dadosabertos.poa.br/dataset>

Sudeste	Belo Horizonte	Habilitado	Habilitado
Sudeste	Campinas	Habilitado	Habilitado
Sudeste	Rio de Janeiro	Habilitado	Habilitado
Sudeste	São Paulo	Habilitado	Habilitado
Sudeste	Vitória	NA	Não habilitado
Sul	Curitiba	Habilitado	Habilitado
Sul	Florianópolis	Habilitado	Não habilitado
Sul	Porto Alegre	Habilitado	Não habilitado

Dentre as regiões brasileiras, a região Sudeste foi a de maior representatividade neste estudo, por concentrar os maiores núcleos populacionais do país e também por possibilitar a análise da maior parcela dos sistemas selecionados. O panorama disposto, no entanto, indica que a cessão de dados requisitados não ocorreu em todas as regiões do país.

Os sistemas não contemplados neste estudo (não habilitados), embora selecionados inicialmente para análise, são localidades em que as bases de dados não estavam sob posse do poder público e seu acesso não era viável. Em outros casos, as bases de dados requisitadas não haviam sido estruturadas e, portanto, não podiam ser cedidas. Dentre os sistemas que compõem o estudo, aqueles pertencentes à região Norte e a maior parcela dos sistemas na região Nordeste não cederam as bases de dados necessárias para processamento ou o fizeram de forma parcial (habilitado com inconsistências), demandando ajustes e abstrações para seu processamento, como foram os casos de Goiânia (RM), Fortaleza (RM) e Teresina (N).

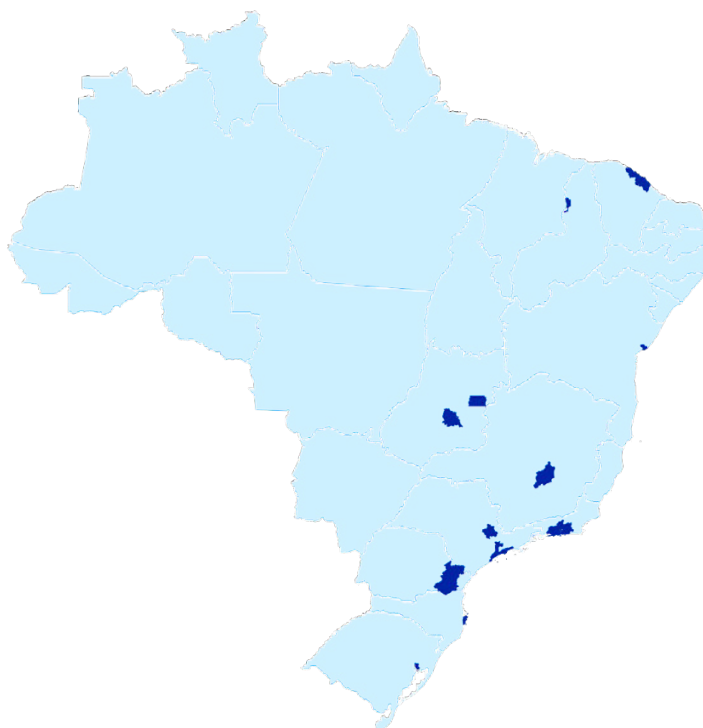
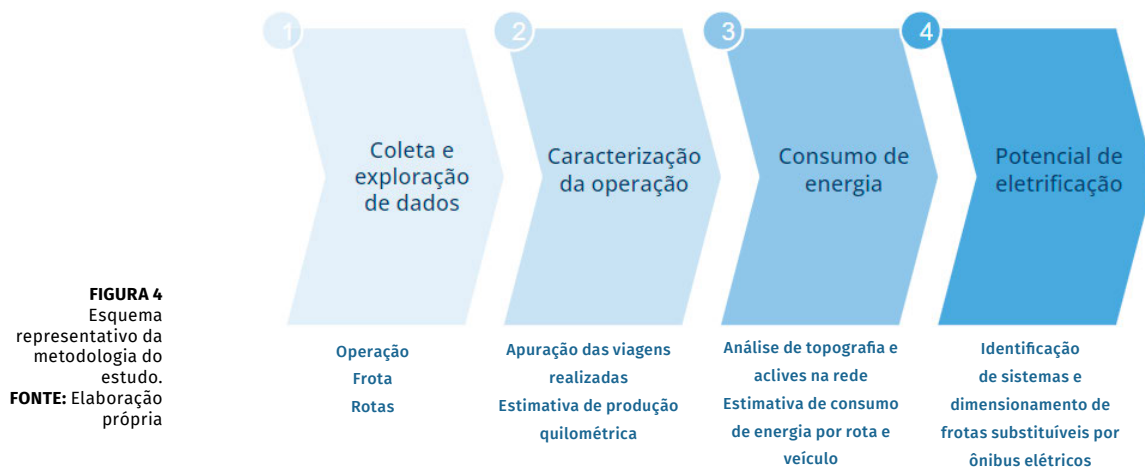


FIGURA 3
Distribuição geográfica
dos sistemas analisa-
dos scopo planejado e
efetivo do estudo.
FONTE: Elaboração
própria

5.4 Metodologia

Nesta análise, foi caracterizada a operação no sistema integrando aspectos relacionados à frota, rotas e circulação dos veículos. A metodologia é composta por quatro etapas, que contemplam desde o processamento até a discussão dos resultados frente aos objetivos nacionais de descarbonização do transporte público.



Na primeira etapa, caracterizou-se tanto a frota quanto as rotas de cada sistema analisado. A caracterização da frota é importante para identificar tipologias de veículos presentes em cada sistema, bem como aqueles que devem ser substituídos prioritariamente em razão da idade avançada ou da tecnologia utilizada por eles. Esse processo tem por objetivo descrever a cobertura geográfica do sistema e identificar inicialmente trechos com aclives críticos (inclinações iguais ou superiores a 25%), que são desaconselhados para a operação de veículos elétricos.

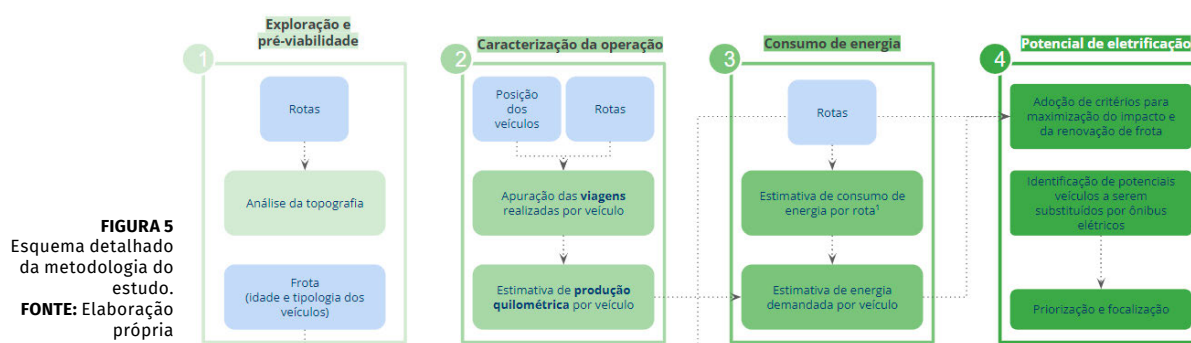
Em seguida, são processados os registros de posição da frota para quantificar as viagens realizadas por cada veículo. Esta análise toma como base o modelo de inferência de partidas desenvolvido pela Secretaria Municipal de Transportes do Rio de Janeiro (SMTR), publicado em código aberto¹⁹. Com a apuração das viagens por veículos, calcula-se a produção quilométrica somando a extensão (individual) de cada viagem apurada. Tendo em vista que apenas uma parcela pequena dos sistemas analisados disponibiliza posições fora de deslocamento em serviço, a produção quilométrica apurada não contempla a quilometragem ociosa dos veículos.

Destaca-se ainda que sistemas como o transporte municipal de Teresina e intermunicipal de Fortaleza apresentaram inconsistências significativas entre as bases de dados, não permitindo a integração e o processamento completo das informações disponibilizadas para análise. Além disso, nos sistemas de Goiânia e Distrito Federal, o mapeamento das rotas (fornecido pelo ente público) documentava de forma parcial os trajetos registrados via GPS. A fim de dimensionar a quilometragem em linha com a operação praticada, as posições de GPS, reportadas em alta frequência nestes dois sistemas, foram utilizadas para reconstituir todos os trajetos percorridos em serviço.

Na terceira etapa, calcula-se o consumo típico de energia por viagem de cada rota, considerando as altitudes das coordenadas que compõem o trajeto documentado. Apesar dos fabricantes publicarem estimativas de autonomia dos veículos elétricos em termos de distância percorrida, estes valores de autonomia são muito influenciados pelas condições de operação dos veículos. Por isso, são utilizados de forma conjunta o mapeamento desses trajetos e a topografia dos municípios, como detalhado no Anexo 2. A partir da quantidade de partidas determinadas por veículo (na etapa anterior), estima-se, portanto, a quantidade de energia que ele consumiria ao realizar este trajeto, na hipótese de sua substituição por um ônibus elétrico de mesmo porte.

Após a caracterização da operação dos veículos e das rotas no sistema, a quarta etapa dedica-se à discussão da introdução de veículos elétricos nas cidades brasileiras de forma focalizada. Esse direcionamento na implementação de políticas públicas permite maior ganho de eficiência e eficácia no investimento realizado. Na prática, priorizar e substituir intencionalmente determinadas parcelas de frota de ônibus por veículos zero-emissões maximiza o impacto ambiental (positivo) de mitigação das mudanças climáticas e os demais benefícios associados à eletromobilidade. Nesse sentido, essa etapa aplica critérios para identificar sistemas e quantificar as respectivas frotas em que a substituição dos veículos atuais (baseados na combustão de diesel) por elétricos a bateria é mais adequada.

¹⁹ Disponível em: github.com/prefeitura-rio/queries-rj-smtr/tree/master



5.5 Frotas de ônibus

De acordo com o estudo Oferta de ônibus elétrico no Brasil em um cenário de recuperação econômica de baixo carbono²⁰ da Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), a quantidade de ônibus licenciados e operantes na frota de transporte público brasileira variou consideravelmente desde o início do século XXI. Esse número apresenta uma forte correlação com a fabricação de veículos e oscila conforme o contexto econômico do país. Dados mostram que, de 2000 até 2011, houve um grande crescimento na produção e, consequentemente, na expansão da frota brasileira. Após esse período, os números começaram a declinar, inicialmente devido à crise econômica mundial (entre 2012 e 2016) e, posteriormente, em razão da pandemia de COVID-19.

Esta pesquisa indica que, no período pós-pandemia, com a melhora no cenário econômico nacional, esses números relativos à produção e aquisição de ônibus tendem a crescer novamente. Esse movimento é impulsionado pela necessidade de renovação da frota, visando reduzir a idade média dos veículos em operação. Segundo a Lei nº 15.831, os ônibus *padron* a diesel devem ser substituídos após dez anos de uso. Essa diretriz é considerada uma oportunidade para fomentar a operação de veículos zero-emissão no Brasil, constituindo-se como um componente fundamental na definição de potencial de eletrificação de frota discutida neste estudo.

No processo de análise da frota de ônibus nos sistemas alvo deste estudo, foram utilizados dados fornecidos pelos inventários das frota das cidades, com o objetivo de avaliar o estado atual da frota e suas características tecnológicas. O total de veículos cadastrados analisados foi de 46.236, representando cerca de 43,2% do total de veículos contabilizados no Brasil²¹. Nos catálogos avaliados, destacam-se os ônibus descritos como convencionais (68,8%), seguidos por midiônibus (11,3%) e articulados (8,4%).

Em relação à tecnologia veicular, esta análise categoriza a frota de veículos Euro V em dois grupos: os veículos com mais de 5 anos (Euro V 5+) e os veículos com menos de 5 anos (Euro V 5-). O objetivo dessa separação é contabilizar isoladamente os veículos que deverão ser substituídos no curto ou médio prazo (aqueles com mais de 5 anos) dos demais que são mais novos e podem operar ainda durante mais tempo antes de serem substituídos.

Entre os veículos registrados, 25% utilizam a tecnologia Euro III e 48,7% são Euro V 5+. As duas categorias são compostas por veículos que devem ser substituídos no curto e médio prazo, pois atualmente já possuem idade maior ou igual a 5 anos. Quando somadas, elas representam 73,7% do total de veículos cadastrados, destacando a necessidade emergente de modernização e substituição das frotas de ônibus brasileiras.

²⁰ BARASSA, E. et al. Oferta de ônibus elétrico no Brasil em um cenário de recuperação econômica de baixo carbono. Santiago: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2022. Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/5f891b54-d6a5-4be9-8278-e67908fb2ce3/content>. Acesso em: 22 out. 2024.

²¹ Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU). Anuário NTU 2023 - 2024. Brasília: NTU, 2024. Disponível em: <https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638573500081945042.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

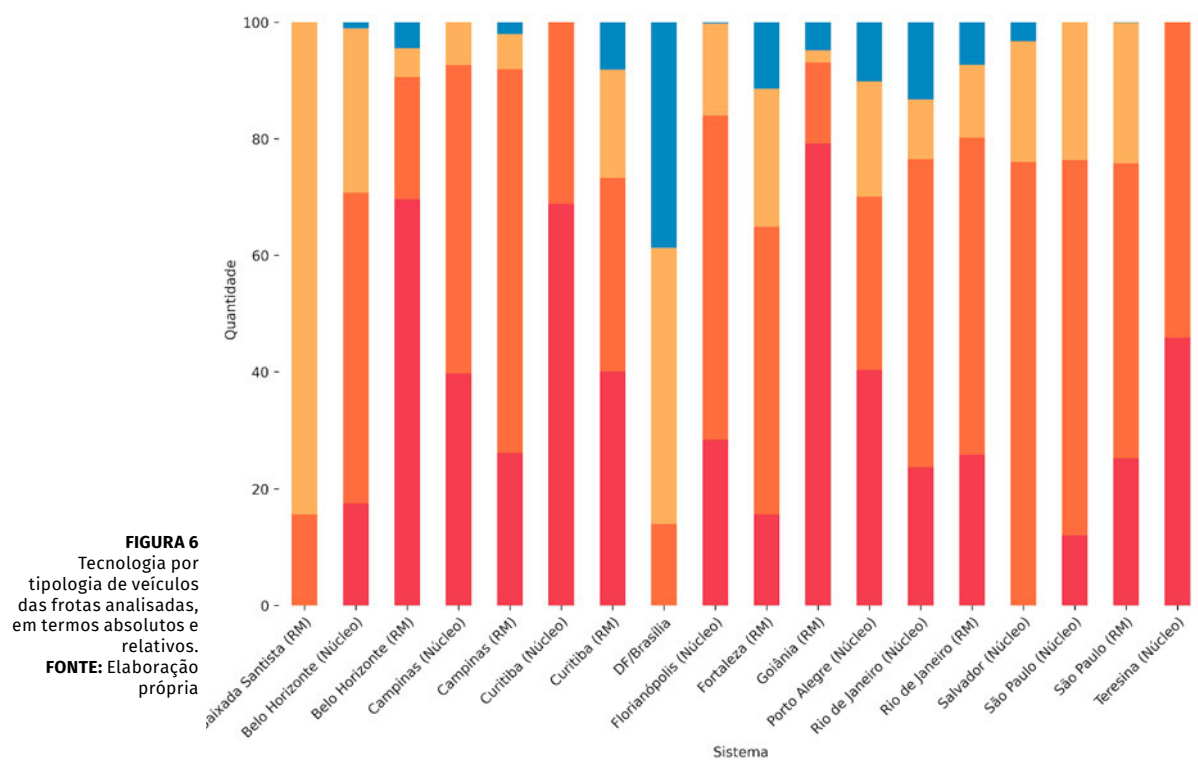
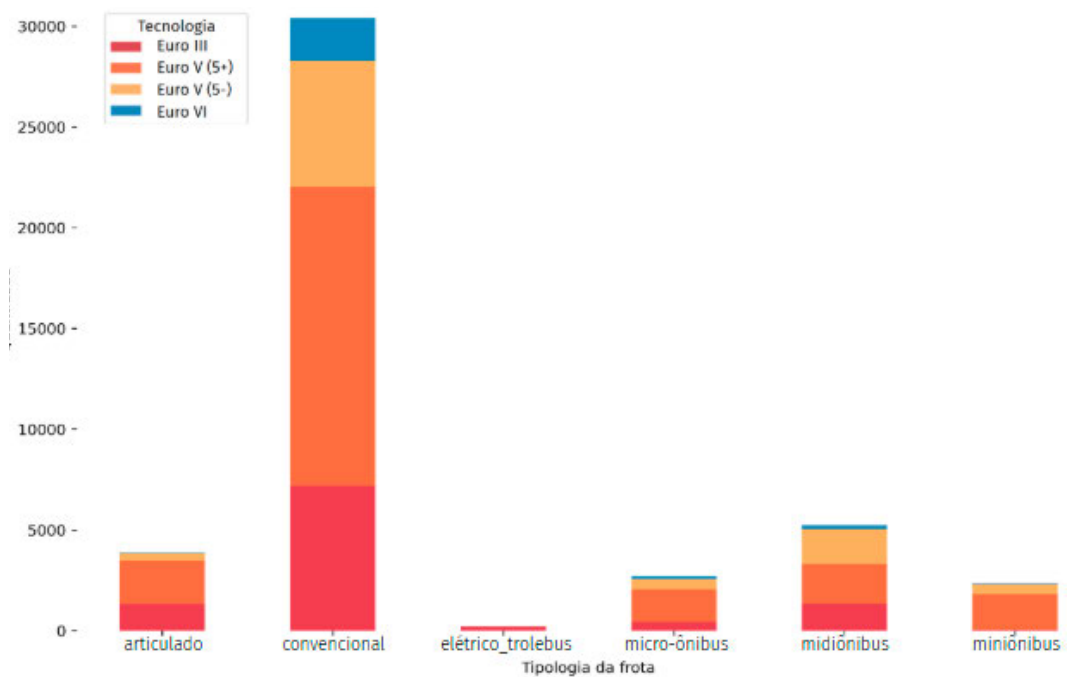


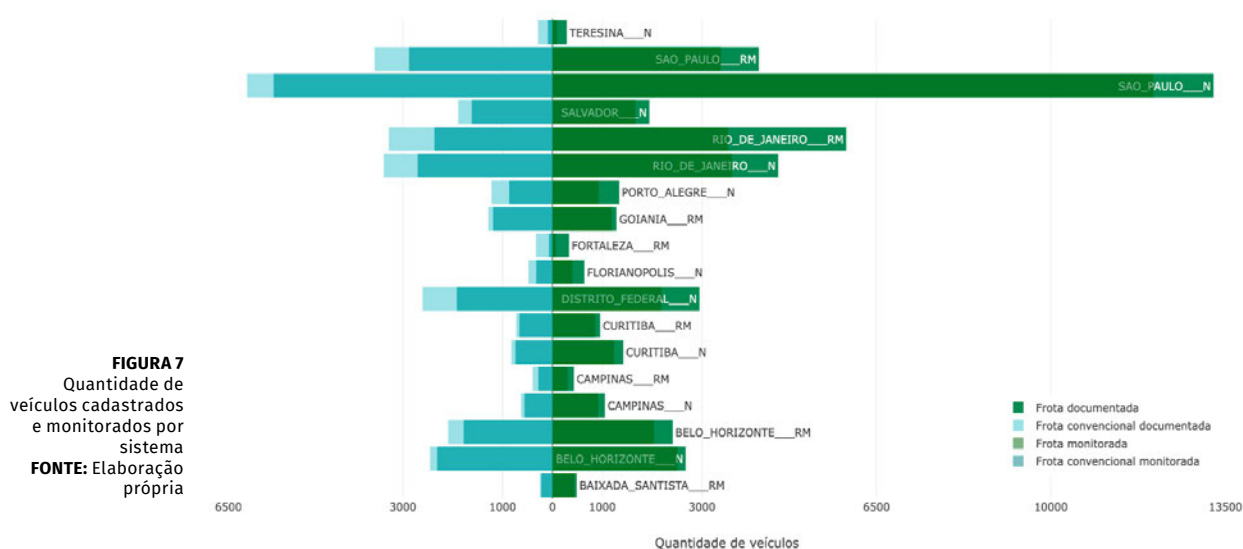
FIGURA 6
Tecnologia por
tipologia de veículos
das frotas analisadas,
em termos absolutos e
relativos.
FONTE: Elaboração
própria

Apenas 5,6% da frota total, representada por 2.600 veículos, é de tecnologia Euro VI, a mais recente e eficiente para redução de poluentes em veículos a combustão. Na operação desses veículos, destaca-se o Distrito Federal (N), onde 38% da frota já possui essa tecnologia, seguido pelo Rio de Janeiro (N), com 13%. Cinco dos 18 sistemas analisados (Região Metropolitana da Baixada Santista, Campinas, Curitiba, São Paulo e Teresina) ainda não possuem veículos dessa categoria.

As frotas dos sistemas analisados são predominantemente compostas por veículos de tecnologia Euro III e Euro V 5+, ambos com mais de cinco anos de uso. Dentre os sistemas analisados, destacam-se os sistemas de Belo Horizonte (RM), Campinas (RM e N), Curitiba (RM e N), Florianópolis, Goiânia, Porto Alegre, Rio de Janeiro (RM e N) e Teresina, onde mais de 90% dos veículos cadastrados pertencem a estas tecnologias e a idade da frota supera os 8 anos.

Quando considerada a frota efetivamente em operação, a partir da análise dos dados de GPS, nos 18 sistemas analisados, 80,9% (37.395) veículos, dos 46.236 cadastrados, estão em operação, do qual 70% (26.192) são ônibus convencionais. No geral, o número de veículos cadastrados supera o de monitorados quando se utiliza uma amostra de dados de GPS de intervalo temporal reduzido.

Na figura a seguir, observa-se a discrepância entre a frota cadastrada e processada para cada um dos sistemas analisados.



Na prática, os veículos não observados em circulação podem ser parte de um cadastro reserva (sendo utilizados em circunstâncias emergenciais e/ou atípicas) ou estar passando por procedimentos de manutenção, considerando o período analisado. Além disso, é possível também que o cadastro de veículos esteja desatualizado, não refletindo renovações de frota recentes.

Os sistemas de Teresina e Fortaleza (RM), em especial, indicaram divergências significativas entre a documentação de rotas, registros de GPS e cadastro de frota, fazendo com que o volume de dados efetivamente processados fosse inferior ao comportamento observado nos demais sistemas. Nesses casos, a proporção de veículos efetivamente analisados (mensurada pela discrepância entre as barras do gráfico) é inferior aos demais sistemas.

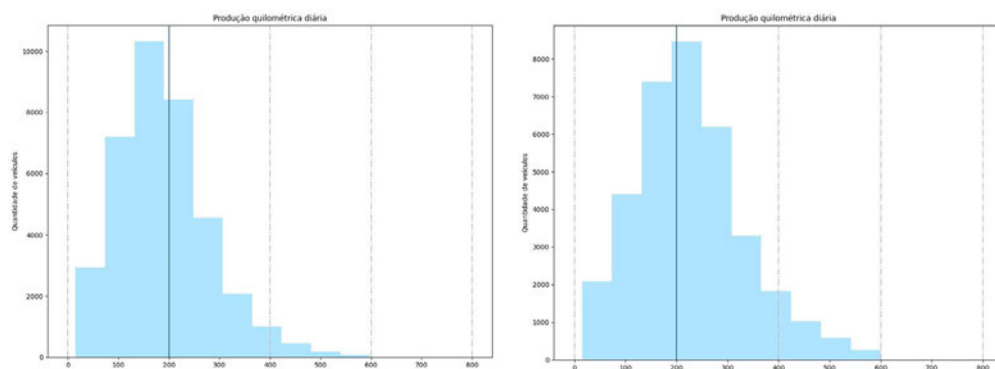
5.6 Dinâmicas operacionais

As dinâmicas operacionais das frotas cadastradas foram analisadas sob os pontos de vista de produção quilométrica e demanda energética. A fim de verificar a quantidade de ônibus operando diariamente no intervalo de autonomia recomendado, examinamos os dados operacionais dos 18 sistemas ao longo do período de análise para identificar os veículos que circularam no máximo 200 km em um dia de operação, que representa a autonomia típica de uma bateria para ônibus convencionais.

A primeira análise foi feita com base na média das distâncias diárias percorridas pelos veículos em dias úteis de operação. Consta-se que 59,5% (22.245) da frota em circulação analisada percorre, em média, distâncias menores ou iguais a 200 km. Observa-se ainda que a distância média percorrida por dia é de 189,7 km. O histograma abaixo apresenta a distribuição dos veículos em diferentes faixas de produção quilométrica diária.

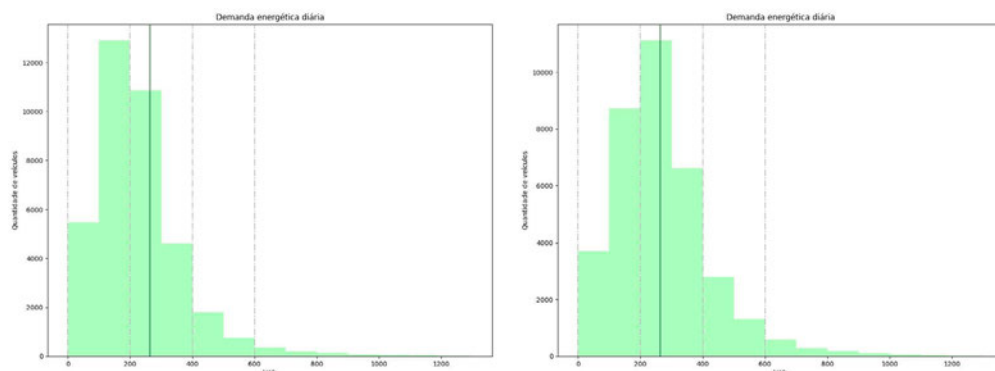
Também foram avaliados os deslocamentos máximos realizados pelos veículos, considerando os dias selecionados para análise neste estudo. Neste contexto, considera-se um cenário mais conservador a respeito da operação da frota, em que o uso é mais intenso do que a operação média (anteriormente descrita). Nesse caso, observou-se que um ônibus percorre em média 227,1 km diariamente, em que 40,6% (15.170) da frota circula por distâncias inferiores a 200 km. Destaca-se que ambas estimativas das quilometragens percorridas por veículo (considerando valores médios e máximos) fortalecem o potencial de introdução da tecnologia elétrica nas frotas de ônibus brasileiras.

FIGURA 8
Distribuição da frota conforme a produção quilométrica diária, considerando caso médio (a) e máximo (b).
FONTE: Elaboração própria



Replicando a análise anterior, o consumo energético por veículo também foi analisado considerando valores médios e máximos para o período analisado, resultando em um consumo de 226,3 kWh e 268,66 kWh, respectivamente. Destaca-se que ambos resultados estão abaixo ou próximos do valor de referência adotado como capacidade da bateria, sendo que, no caso médio, 69,93% (26.151) dos veículos da frota operante consomem menos que 264 kWh de energia por dia típico de operação, enquanto o caso extremo (máximo) indica que 52,80% (19.743) operariam nesta faixa de consumo energético.

FIGURA 9
Distribuição da frota conforme o consumo energético diário, considerando caso médio (a) e máximo (b).
FONTE: Elaboração própria



Outra métrica relevante no contexto da eletromobidade é a taxa de consumo energético, que consiste na razão entre a quantidade de energia consumida pela distância percorrida. Conforme indicam estudos da área, verifica-se taxa de consumo de energia variando entre 0,90 e 1,60 kWh/km, a depender de condições climáticas e operacionais, como topografia, velocidade e carregamento.

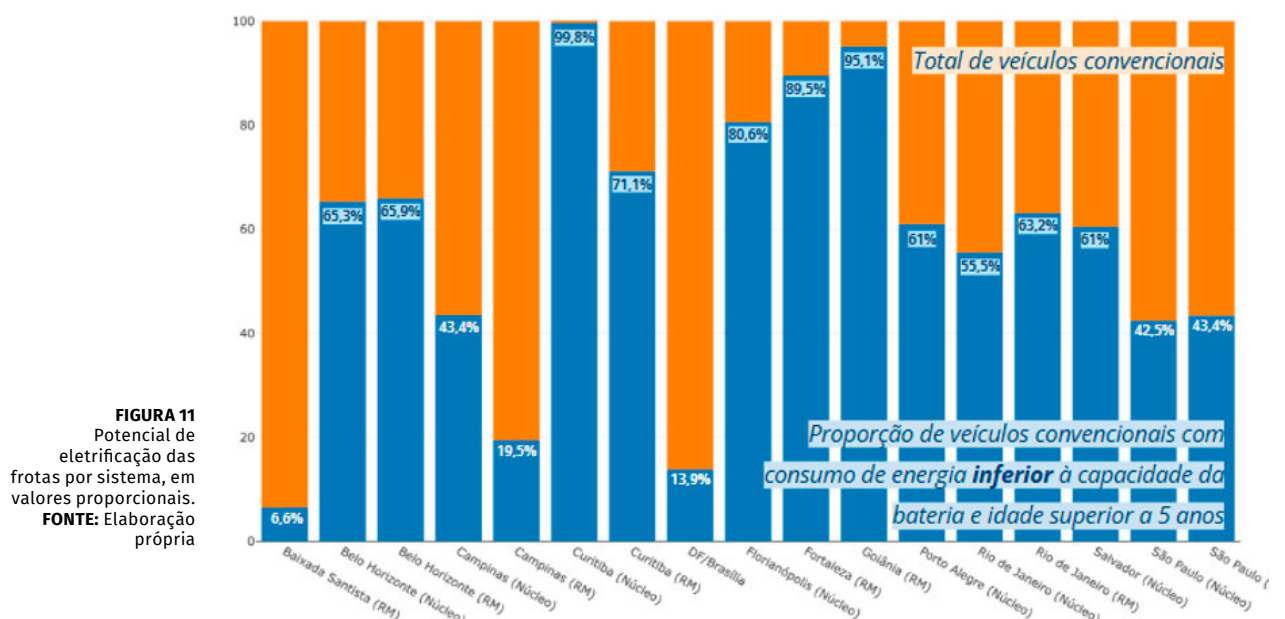
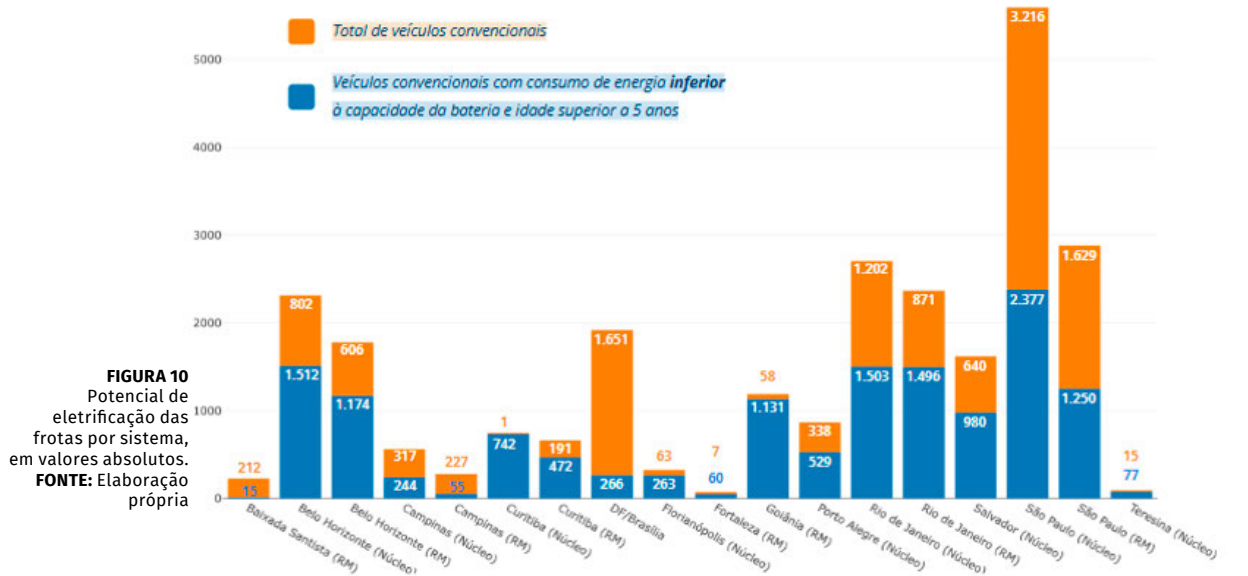
Ressalta-se que, no geral, as declividades nas cidades brasileiras favorecem a operação de veículos elétricos por não demandarem intensamente o tráfego em aclives, resultando em taxas de consumo energético eficientes. Considerando os 18 sistemas analisados neste estudo, a taxa média de consumo energético equivale a 1,10 kWh/km. Em destaque estão as taxas de consumo energético em Campinas, que alcança 1,33 kWh/km nos sistemas municipal e intermunicipal, e São Paulo, sendo 1,44 kWh/km e 1,38 kWh/km nos sistemas municipal e intermunicipal, respectivamente.

²² (1) BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). Guia para a eletromobidade: recomendações para o planejamento da eletromobidade urbana no Brasil. Brasília: MDR, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobidade-urbana/Guia_Eletromobidade.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.
(2) EUFRÁSIO, A.; DANIEL, J.; DELGADO, O.. Análise operacional de ônibus elétricos a bateria em São Paulo. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2022. Disponível em: <https://theicct.org/publication/brazil-hvs-zebra-analise-operacion-onibus-eletricos-sao-paulo-nov22>.
(3) URBS – Urbanização de Curitiba S.A. Relatório técnico dos testes operacionais do chamamento público para a demonstração de ônibus elétricos em Curitiba. Edital 001/2022. Curitiba, 2022. Disponível em: <https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2024/02/URBS-report.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

5.7 Potencial de eletrificação por sistema analisado

Este estudo adotou três critérios principais para identificar o potencial de eletrificação da frota de ônibus de cada sistema: tecnologia, tipologia e consumo energético dos veículos. Primeiramente, são selecionados como prioritários os veículos de tecnologia Euro III ou Euro V 5+, por serem candidatos naturais à renovação da frota no curto prazo e gerarem poluentes em maiores taxas do que veículos similares mais modernos. Outro critério complementar dos veículos selecionados diz respeito às suas tipologias: são priorizados ônibus de tipologia convencional, devido à maior disponibilidade de fabricantes e modelos disponíveis no mercado brasileiro.

Com base nesses critérios, o potencial de eletrificação foi determinado para cada núcleo urbano e região metropolitana, identificando a parcela da frota que possui padrões de operação favoráveis à substituição tecnológica sem necessidade de acréscimo de veículos. Consideraram-se aqui, portanto, veículos cuja demanda energética é inferior à 264 kWh (valor de referência para capacidade de uma bateria elétrica típica de veículos convencionais). Nas Figuras 10 e 11, as barras representam a quantidade total de veículos convencionais em cada sistema, incluindo todas as tecnologias veiculares, e as barras azuis representam quantos desses veículos atendem os três critérios utilizados para caracterizar o potencial de eletrificação da frota.



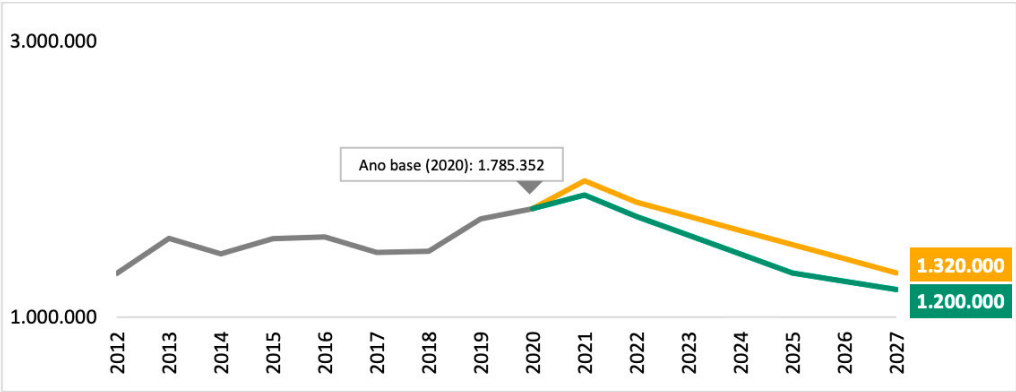
Em números absolutos, as regiões de São Paulo (N e RM), Rio de Janeiro (N e RM) e Belo Horizonte (N) apresentam o maior potencial para a substituição de frota, sendo também as localidades que concentram as maiores populações e frotas de ônibus no território nacional. Analisando de forma relativa, Belo Horizonte (N e RM), Curitiba (N e RM), Florianópolis (N), Goiânia (RM), Porto Alegre (N), Rio de Janeiro (N e RM), Salvador (N), Teresina (N) são sistemas em que o potencial de substituição de veículos supera 50% da frota.

Considerando todos os veículos analisados, foram contabilizados 14.146 veículos convencionais de idade superior a 5 anos e consumo energético diário (médio) inferior a 264 kWh, o que caracteriza, portanto, o potencial de eletrificação das frotas analisadas neste estudo. Este valor representa 54% dos veículos convencionais em operação e 37,8% da frota observada em operação neste estudo.

6. EMISSÃO DE POLUENTES

A partir do Acordo de Paris, em que diversas nações se comprometem a mitigar as mudanças climáticas em curso e o aquecimento do planeta, o Brasil também compromete-se com a redução de emissões de CO₂ equivalente (CO₂eq). Nesse sentido, tem-se como alvo (em um cenário base) a redução em 35% das emissões de GEE até 2025 e em 43% até 2030, em comparação a 2005.

FIGURA 12
Emissões de GEE no Brasil (em Gg), no período de 2017 a 2027.
FONTE: Anexo de Indicadores da Dimensão Estratégica do PPA 2024-2027



Esse objetivo, disposto em diretrizes nacionais como o Anexo de Indicadores da Dimensão Estratégica do PPA 2024-2027²³, demanda que seja feito monitoramento periódico dos indicadores e esforços para a redução das emissões de poluentes em todos os setores considerados mais poluidores. Nesse sentido, investimentos para descarbonização do transporte público estão alinhados ao compromisso nacional assumido, por promover a descarbonização do subsetor de transportes, enquadrado no setor de energia, conforme disposições do IPCC para elaboração de inventários de emissões.

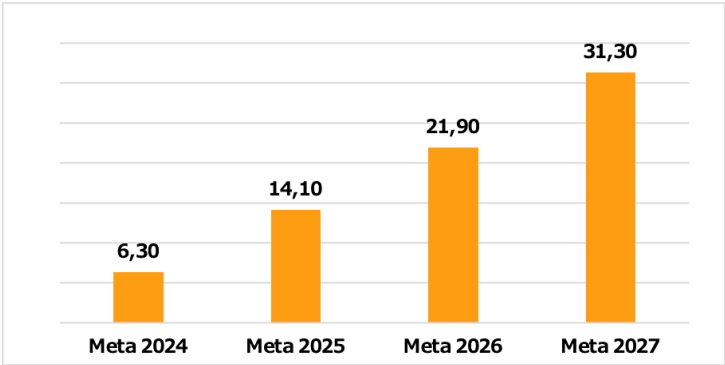
Programa: 2319 - Mobilidade Urbana

Objetivo Específico: 0254 - Melhorar a prestação dos serviços de transporte público coletivo por meio da renovação da frota

Indicador: 9419 - Percentual de renovação da frota - unidade: % - Meta

Cumulativa: Sim

FIGURA 13
Objetivo e indicador nacional relacionados ao ODS 11 - Cidades e Comunidades Sustentáveis.
FONTE: SIOP apud Ministério do Planejamento e Orçamento



6.1 Inventários de emissão de poluentes

As diretrizes globais para o cálculo de emissões de poluentes no setor de transportes oferecem duas abordagens amplamente aceitas: *top-down* e *bottom-up*. Essas abordagens fazem parte do Protocolo Global para Inventários de Emissões de Gases de Efeito Estufa²⁴. Esse protocolo estabelece padrões internacionais para a contabilização de emissões de gases de efeito estufa, sendo amplamente utilizado por governos e cidades ao redor do mundo.

- **Top-down:** Baseia-se no consumo total de combustível, sem diferenciar entre modais ou categorias de transporte, utilizando fatores de emissão proporcionais ao volume de combustível consumido.
- **Bottom-up:** Parte de dados mais específicos, como a tipologia da frota e a distância percorrida, e utiliza fatores de emissão por quilômetro rodado.

²³ BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento (MPO). Anexo de indicadores da dimensão estratégica do PPA 2024-2027. Brasília: MPO, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/planejamento/plano-plurianual/copy_of_arquivos/anexo-de-indicadores-da-dimensao-estrategica-do-ppa-2024-2027.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

²⁴ WORLD RESOURCES INSTITUTE; C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP; ICLEI – Local Governments for Sustainability. Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories: an accounting and reporting standard for cities. 2014. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/GHGP_GPC_0.pdf. Acesso em: 31 de out. 2024.

Neste estudo, optou-se pela abordagem *bottom-up*, visto que as cidades analisadas disponibilizaram dados suficientemente detalhados para sua aplicação.

Para a implementação em âmbito nacional, o principal referencial utilizado foi o Relatório de Emissões Veiculares no Estado de São Paulo, publicado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB)²⁵. Sendo a CETESB considerada uma referência no setor, destacando-se pela publicação regular de relatórios, amplamente reconhecidos pela precisão e atualização anual dos fatores de emissão. O relatório de 2021 é o mais recente a adotar a abordagem *bottom-up* para estimativas de emissões. Além disso, foram considerados os fatores de emissão mais recentemente publicados, referentes ao ano de 2023²⁶.

A CETESB identifica os óxidos de nitrogênio (NOx) e o material particulado (MP) como os principais poluentes a serem monitorados nas emissões provenientes de ônibus. Além desses, o CO₂eq é amplamente utilizado para mensurar o impacto dos GEE. Assim, este estudo foca no cálculo dessas três emissões: NOx, MP e CO₂eq.

Para o cálculo de emissões de GEE expressas em CO₂eq, que consiste em uma medida que padroniza diferentes poluentes com base no seu potencial de aquecimento global, foi utilizada a metodologia de cálculo proposta pelo *Intergovernmental Panel on Climate Change*²⁷ (IPCC). Este cálculo inclui as emissões de dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O), cujos detalhes serão explorados nas próximas seções.

Neste contexto, as emissões CO₂ provenientes da queima de combustíveis fósseis são as mais volumosas no setor de transportes, embora o CH₄ e o N₂O também exerçam influência significativa sobre o efeito estufa. Estudos realizados no Brasil²⁸, considerando os combustíveis utilizados, os padrões operacionais e as tecnologias veiculares típicas, apontam que a queima de um litro de diesel gera entre 2,300 e 2,671 kg de CO₂. Para este estudo, adotou-se um fator de emissão de 2,603 kg de CO₂ por litro de diesel, conforme os parâmetros estabelecidos pelo Instituto Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (IEMA) em seu Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários, que também foram aplicados em estudos conduzidos pela CETESB.

6.2 Metodologia

Inicialmente, as emissões foram calculadas para as cidades que disponibilizaram dados detalhados sobre a operação da frota de ônibus. Em seguida, para as cidades sem informações completas, aplicou-se um modelo de regressão linear para expandir os resultados, utilizando como base as estimativas obtidas nas cidades com dados granulares. Dessa forma, constitui-se um retrato atual e em escala nacional a respeito das emissões de GEE associadas ao transporte público urbano rodoviário.

6.2.1 Estimativa *bottom-up*

Para as cidades que disponibilizaram dados operacionais, foi possível aplicar a metodologia *bottom-up*, detalhada no Anexo 3. A análise baseou-se em três componentes principais: dados da frota, dados operacionais e fatores de emissão específicos para cada poluente.

Os dados da frota incluem informações detalhadas sobre cada veículo, como a tipologia, o ano de fabricação e a tecnologia do motor, sendo o ano de fabricação essencial para associar os fatores de emissão adequados.

Os dados operacionais fornecem a quilometragem diária percorrida por cada veículo, discriminada por rota, sendo que um veículo pode operar em mais de uma rota no mesmo dia. Essas informações, combinadas com os fatores de emissão, permitem uma estimativa detalhada das emissões de poluentes. Sendo as emissões calculadas da seguinte forma:

$$\text{Emissão (kg)} = \text{Fator de emissão (kg/km)} \times \text{Quilometragem Diária (km/dia)}$$

Os fatores de emissão foram obtidos das fontes já mencionadas para cada um dos poluentes principais: NOx, MP e CO₂eq (que engloba CO₂, CH₄ e N₂O). Os fatores são ajustados conforme o ano de fabricação do veículo. Os resultados de emissões anuais, apresentados nas próximas seções, foram obtidos considerando-se 252 dias úteis de operação.

²⁵ COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Relatório de emissões veiculares no Estado de São Paulo 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2023/01/Relatorio-Emissoes-2021-completo.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

²⁶ COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Fatores de emissão veicular 2023. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2023/01/Relatorio-Emissoes-2021-completo.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

²⁷ IPCC. Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

²⁸ (1) Laboratório de Transporte de Carga – LTC/PEP/COPE/UFRJ. Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro. 2011. Disponível em: https://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/05/relatorio_inventario_2011.pdf. Acesso em: 11 out. 2024.

(2) INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: ano-base 2012. Disponível em: <https://energiaambiente.org.br/produto/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-por-veiculos-automotores-rodoviarios-2013-ano-base-2012>. Acesso em: 23 out. 2024.

(3) CAMPOLI, J. S.; FEIJÓ, J. R. Preço do Carbono para Projetos de Investimentos de Infraestrutura no Brasil. IPEA - Nota Técnica, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11449/1/NT_102_Diset_Precos_Carbono.pdf. Acessado em 31 out. 2024.

(4) SÃO PAULO TRANSPORTE S.A. (SPTrans). Instrução técnica: metodologia para cálculo de emissões de poluentes. 2023. Disponível em: <https://www.sptrans.com.br/media/13527/instrucao-tecnica-emissao-poluente.pdf>. Acesso em: 23 out. 2024.

6.2.2 Custo Social do Carbono

Com objetivo de estimar o valor monetário decorrente das emissões de CO₂eq, este estudo adotou o conceito de Custo Social do Carbono (CSC). O CSC quantifica os danos econômicos, sociais e ambientais causados pela emissão de uma tonelada (t) adicional de CO₂ na atmosfera, permitindo traduzir em valor monetário os benefícios relacionados à redução de emissão de CO₂ e políticas climáticas.

A estimativa do CSC é complexa e varia de acordo com fatores como o país analisado, suas taxas de desconto e o setor econômico estudado. No Brasil, ainda não há uma regulamentação oficial que defina parâmetros padrão para o cálculo do CSC. Contudo, uma metodologia que estima o CSC para o cenário brasileiro é descrita pela Nota Técnica publicada pelo Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (Ipea)²⁹. Nesse documento é destacado que o CSC para o Brasil, em 2024, deve ser considerado como US\$ 22,60 por tonelada de CO₂, segundo dados da Empresa de Planejamento e Logística (EPL). Para os anos seguintes, de 2025 a 2029, o valor de referência é de US\$ 25,70.

Além dessa referência nacional, também é considerada uma estimativa da Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL)³⁰, que é referência internacional e estabelece o CSC em US\$ 25,83 por tonelada de CO₂, aplicável também ao contexto brasileiro.

Diante dessas duas referências, o presente estudo utilizará os valores dos estudos do Ipea e da CEPAL para calcular uma faixa de variação estimada do CSC. Essa abordagem permitirá uma análise mais abrangente, considerando tanto uma perspectiva nacional quanto uma internacional aplicadas no contexto brasileiro.

Importante notar que o CSC é uma estimativa conservadora do custo de emissões de uma tonelada adicional de CO₂ na atmosfera. Por construção, o CSC considera apenas os custos locais dessas emissões, estimando o impacto na população que vive próxima à fonte das emissões, utilizando uma metodologia de custo-benefício. Outras metodologias, como a de Custo-Sombra do Carbono, consideram o cumprimento dos objetivos de redução de emissões assumidos por cada país, e dessa forma consideram os custos globais de emissão de uma tonelada adicional de CO₂, a partir de uma metodologia de custo-efetividade. Nessa metodologia, os valores de carbono aumentam agressivamente com o passar do tempo, uma vez que a janela de oportunidade para atingir as metas de redução de emissões diminui.

Para fins de comparação, países como o Reino Unido e a França utilizam a metodologia de Custo-Sombra de Carbono para avaliar seus investimentos em projetos de descarbonização, ao invés do CSC. O Reino Unido estabelece um valor de pelo menos £ 120,00 por tonelada de carbono adicional emitida em 2020, passando a no mínimo £ 140,00 em 2030, enquanto a França define um valor de € 87 em 2020, passando a € 250 em 2030. Em ambos os casos observamos valores muito superiores aos valores de US\$ 22,60 - US\$ 25,83 do CSC.

Entretanto, não foi possível encontrar ainda uma estimativa do Custo-Sombra do Carbono para o cenário brasileiro. Como esse custo está diretamente ligado às metas de redução de emissões assumidas por cada país, não é possível adotarmos no Brasil os custos estabelecidos por outros países. Por essa razão, nosso estudo não contempla uma estimativa dos custos de emissão de carbono segundo a metodologia de Custo-Sombra.

6.3 Efeitos da substituição de frota na emissão de GEE

6.3.1 Inventário de emissões e intensidades de uso nos sistemas analisados

A partir da aplicação da metodologia *bottom-up*, foram obtidos os resultados apresentados na Tabela 3. No total, estima-se que cerca de 1.776.424,53 t de CO₂eq sejam emitidas anualmente nos 18 sistemas analisados, sendo que 20,5% (363.648,91 t) provém de veículos Euro III, e 49,6% (880.466,25 t) de veículos Euro V 5+.

A análise desses resultados revela que as maiores emissões de poluentes ocorrem nos municípios e regiões metropolitanas de grande porte, o que resulta na exposição de grandes contingentes populacionais aos gases e partículas provenientes da queima de combustíveis fósseis. As regiões de Brasília, Rio de Janeiro e São Paulo são as maiores fontes de emissões de poluentes.

²⁹ CAMPOLI, J. S.; FEIJÓ, J. R. Preço do Carbono para Projetos de Investimentos de Infraestrutura no Brasil. IPEA - Nota Técnica, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11449/1/NT_102_Diset_Precio_Carbono.pdf. Acessado em 31 out. 2024

³⁰ ALATORRE, J. E.; CABALLERO, K.; FERRER, J.; GALINDO, L. M. El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina. Comisión Económica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2019. Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/471ab218-0a3a-475a-bedd-097ec0b58b30/content>. Acesso em: 31 out. 2024.

SISTEMA	Total CO ₂ eq [t]	Euro III CO ₂ eq [t]	Euro III CO ₂ eq [%]	Euro V 5+ CO ₂ eq [t]	Euro V 5+ CO ₂ eq [%]
Baixada Santista (RM)	25.700,8	0,0	0,0	4.344,1	16,9
Belo Horizonte (N)	76.310,1	14.857,2	19,5	38.731,2	50,8
Belo Horizonte (RM)	78.228,1	54.283,6	69,4	15.136,3	19,3
Campinas (N)	56.504,5	28.481,0	50,4	23.227,5	41,1
Campinas (RM)	21.885,3	6.176,3	28,2	15.358,5	70,2
Curitiba (N)	31.160,7	16.172,3	51,9	14.927,5	47,9
Curitiba (RM)	40.241,3	14.667,6	36,4	13.999,9	34,8
Distrito Federal (RIDE)	144.515,7	687,3	0,48	25.478,6	17,63
Florianópolis (N)	19.717,4	6.064,0	30,8	11.934,8	60,5
Fortaleza (RM)	4.314,6	3.172,5	73,5	1.142,1	26,5
Goiânia (RM)	49.886,3	41.261,9	82,71	7.484,8	15,00
Porto Alegre (N)	28.202,2	11.602,7	41,1	7.370,7	26,1
Rio de Janeiro (N)	172.222,4	39.313,6	22,8	87.075,6	50,6
Rio de Janeiro (RM)	145.414,8	24.053,0	16,5	85.252,4	58,6
Salvador (N)	68.353,1	0,0	0,0	45.728,5	66,90
São Paulo (N)	640.451,5	63.355,5	9,9	401.315,1	62,7
São Paulo (RM)	167.121,5	39.500,5	23,6	81.958,8	49,0
Teresina (N) *	6.194,3	-	-		-
TOTAL	1.776.424,53	363.648,91	20,47%	880.466,25	49,56%

TABELA 3
Emissões anuais, totais e parciais, por tecnologia do veículo, para os 18 sistemas analisados.
FONTE: Elaboração própria

* No caso da cidade de Teresina, foi verificada incompatibilidade nos identificadores dos veículos presentes nas bases de dados de cadastro de frota e posições de GPS. Por esta razão, não foi possível diferenciar as frotas Euro 3 e Euro 5+.

Fortaleza (RM), Belo Horizonte (RM), Goiânia (RM), Curitiba (N) e Campinas (N) possuem entre 50,9% até 84,1% das emissões totais geradas a partir da circulação de veículos Euro III. Além disso, a substituição de veículos de tecnologia Euro V 5+ também pode trazer benefícios significativos na redução de emissões. Esse cenário é relevante para os sistemas de transporte de Belo Horizonte (N e RM), Campinas (RM), Florianópolis, Goiânia, Rio de Janeiro (N e RM), Salvador (N) e São Paulo (N e RM), onde essa tecnologia ainda é responsável por mais de 50,6% das emissões geradas.

Conclui-se que a substituição total da frota com idade superior a 5 anos por veículos elétricos têm o potencial de reduzir as emissões de GEE nesses sistemas em cerca de 70% do total produzido atualmente. É relevante destacar que a substituição dessa frota é iminente a curto prazo, dada a obsolescência dos veículos. Assim, a renovação dos veículos não só atenderia necessidades operacionais e contratuais, como também resultaria em avanços no cumprimento de compromissos nacionais relativos à mitigação de emissão de poluentes.

A Tabela 4 apresenta os potenciais de redução de emissões nos sistemas analisados. Considerando a focalização proposta neste estudo, é possível eliminar 437,7 kt de CO₂eq por ano, o que representa 24,64% das emissões produzidas nos sistemas de transporte analisados.

SISTEMA	Redução Euro III CO ₂ eq [t]	Redução Euro III CO ₂ eq [%]	Redução Euro V 5+ CO ₂ eq [t]	Redução Euro V 5+ CO ₂ eq [%]	Redução Total [t]	Redução Total [%]
Baixada Santista (RM)	0,00	0,00	624,14	14,37	624,14	2,43
Belo Horizonte (N)	8.995,63	60,55	27.247,06	70,35	36.242,69	47,49
Belo Horizonte (RM)	21.154,44	38,97	7.422,79	49,04	28.577,23	36,53
Campinas (N)	4.062,06	14,26	4.627,75	19,92	8.689,80	15,38
Campinas (RM)	977,59	15,83	1.486,93	9,68	2.464,52	11,26
Curitiba (N)	11.180,81	69,14	8.807,09	59,00	19.987,90	64,14
Curitiba (RM)	9.058,67	61,76	8.398,05	59,99	17.456,72	43,38
Distrito Federal (RIDE)	0,00	0,00	4.161,75	16,33	4.161,75	2,88
Florianópolis (N)	2.854,17	47,07	7.413,04	62,11	10.267,21	52,07
Fortaleza (RM)	1.942,40	61,23	913,86	80,02	2.856,27	66,20
Goiânia (RM)	36.425,82	88,28	6.461,90	86,33	42.887,72	85,97
Porto Alegre (N)	7.281,70	62,76	4.695,73	63,71	11.977,43	42,47
Rio de Janeiro (N)	12.825,92	32,62	41.240,78	47,36	54.066,70	31,39
Rio de Janeiro (RM)	8.923,24	37,10	38.529,07	45,19	47.452,31	32,63

TABELA 4
Potencial de redução de emissões, por tecnologia do veículo, para os 18 sistemas analisados.
FONTE: Elaboração própria

Salvador (N)	0,00	0,00	26.605,06	58,18	26.605,06	38,92
São Paulo (N)	14.903,75	23,52	69.741,02	17,38	84.644,77	13,22
São Paulo (RM)	14.546,12	36,83	20.149,67	24,59	34.695,79	20,76
Teresina (N) *		-		-	4.039,92	65,22
TOTAL	155.132,31	42,66	278.525,70	31,63	437.697,93	24,64

* No caso da cidade de Teresina, foi verificada incompatibilidade nos identificadores dos veículos presentes nas bases de dados de cadastro de frota e posições de GPS. Por esta razão, não foi possível diferenciar as frotas Euro 3 e Euro 5+.

6.3.2 Impacto econômico da redução de emissões nos sistemas analisados

A partir das emissões calculadas com a aplicação da metodologia *bottom-up*, foram estimados os custos equivalentes detalhados na tabela abaixo. Os cálculos foram feitos com base no CSC. Estima-se que o custo total das emissões anuais varia entre R\$220,8 milhões e R\$252,4 milhões³¹, utilizando as estimativas do Ipea e da CEPAL como referência.

SISTEMA	Total CO ₂ eq [t]/ano	CSC/ano (Ipea: US\$ 22,6/tCO ₂)	CSC/ano (CEPAL: US\$ 25,83/tCO ₂)
Baixada Santista (RM)	25.700,8	\$ 580.837,31	\$ 663.850,79
Belo Horizonte (N)	76.310,1	\$ 1.724.609,15	\$ 1.971.090,91
Belo Horizonte (R)	78.228,1	\$ 1.767.954,98	\$ 2.020.631,73
Campinas (N)	56.504,5	\$ 1.277.001,16	\$ 1.459.510,62
Campinas (R)	21.885,3	\$ 494.606,98	\$ 565.296,39
Curitiba (N)	31.160,7	\$ 704.232,38	\$ 804.881,53
Curitiba (RM)	40.241,3	\$ 909.452,74	\$ 1.039.432,04
Distrito Federal (RIDE)	144.515,7	\$ 3.266.054,42	\$ 3.732.840,07
Florianópolis (N)	19.717,4		\$ 509.301,73
Fortaleza (RM)	4.314,6	\$ 97.510,87	\$ 111.447,16
Goiânia (RM)	49.886,3	\$ 1.127.429,87	\$ 1.288.562,55

TABELA 5
Custos totais de emissões considerando o CSC, para os 18 sistemas analisados.
FONTE: Elaboração própria

³¹ Valores considerando o real a uma taxa de câmbio onde US\$ 1 equivale R\$5,50.

Porto Alegre (N)	28.202,2	\$ 637.369,54	\$ 728.462,62
Rio de Janeiro (N)	172.222,4	\$ 3.892.225,66	\$ 4.448.503,93
Rio de Janeiro (RM)	145.414,8	\$ 3.286.374,30	\$ 3.756.064,08
Salvador (N)	68.353,1	\$1.544.781,08	\$1.765.561,73
São Paulo (N)	640.451,5	\$ 14.474.203,43	\$ 16.542.861,71
São Paulo (RM)	167.121,5	\$ 3.776.945,38	\$ 4.316.747,75
Teresina (N) *	6.194,3	\$ 139.990,72	\$ 159.998,25
TOTAL	1.776.424,53	\$ 40.147.194,36	\$ 45.885.045,58

* No caso da cidade de Teresina, foi verificada incompatibilidade nos identificadores dos veículos presentes nas bases de dados de cadastro de frota e posições de GPS. Por esta razão, não foi possível diferenciar as frotas Euro 3 e Euro 5+.

A substituição de frota proposta neste estudo seria responsável por uma redução anual de 437.697,93 t de CO₂ por ano. Isso seria equivalente, utilizando a estimativa conservadora do CSC, a uma economia anual entre **R\$54,4 milhões e R\$62,2 milhões**³².

SISTEMA	Redução CO ₂ eq [t]/dia	CSC evitado/dia (IPEA: US\$ 22,6/tCO ₂)	CSC evitado/dia (CEPAL: US\$ 25,83/tCO ₂)
Baixada Santista (RM)	624,14	\$ 14.105,63	\$ 16.121,62
Belo Horizonte (N)	36.242,69	\$ 819.084,84	\$ 936.148,73
Belo Horizonte (RM)	28.577,23	\$ 645.845,40	\$ 738.149,85
Campinas (N)	8.689,80	\$ 196.389,53	\$ 224.457,59
Campinas (RM)	2.464,52	\$ 55.698,05	\$ 63.658,44
Curitiba (N)	19.987,90	\$ 451.726,46	\$516.287,36
Curitiba (RM)	17.456,72	\$ 394.521,77	\$ 450.906,96
Distrito Federal (RIDE)	4.161,75	\$ 94.055,61	\$ 107.498,08
Florianópolis (N)	10.267,21	\$ 232.038,93	\$ 265.202,02

TABELA 6
Custos potencialmente evitados considerando o CSC, para os 18 sistemas analisados.
FONTE: Elaboração própria

³² Valores considerando o real a uma taxa de câmbio onde US\$ 1 equivale R\$5,50.

Fortaleza (RM)	2.856,27	\$ 64.551,61	\$ 73.777,34
Goiânia (RM)	42.887,72	\$ 969.262,53	\$ 1.107.789,87
Porto Alegre (N)	11.977,43	\$ 270.689,87	\$ 309.376,96
Rio de Janeiro (N)	54.066,70	\$ 1.221.907,39	\$ 1.396.542,83
Rio de Janeiro (RM)	47.452,31	\$ 1.072.422,21	\$ 1.225.693,17
Salvador (N)	26.605,06	\$ 601.274,42	\$ 687.208,78
São Paulo (N)	84.644,77	\$ 1.912.971,91	\$ 2.186.374,53
São Paulo (RM)	34.695,79	\$ 784.124,93	\$ 896.192,34
Teresina (N) *	4.039,92	\$ 91.302,15	\$ 104.351,08
TOTAL	437.697,93	\$ 9.891.973,24	\$ 11.305.737,56

* No caso da cidade de Teresina, foi verificada incompatibilidade nos identificadores dos veículos presentes nas bases de dados de cadastro de frota e posições de GPS. Por esta razão, não foi possível diferenciar as frotas Euro 3 e Euro 5+.

6.3.3 Expansão dos resultados

Com base nos resultados obtidos na etapa anterior, as emissões de poluentes foram estimadas para as cidades que não forneceram dados operacionais detalhados. Para isso, utilizou-se um modelo de regressão linear, que estabelece a relação entre variáveis independentes e as emissões de poluentes (variável dependente), medidas em quilogramas de CO₂eq.

O modelo foi desenvolvido considerando bases de dados disponíveis em escala nacional, a fim de garantir consistência e comparabilidade entre as diferentes cidades. As três variáveis dependentes incluídas no modelo foram:

- **População** (IBGE, 2022)³³;
- **Área urbanizada das cidades** (IBGE, 2022);
- **Frota de ônibus**, obtida a partir de dados coletados e de declarações dos projetos do Novo PAC.

O modelo é expresso, portanto, da seguinte forma:

$$\ln(\text{CO}_2\text{eq estimado}) = \alpha + \beta_1 \times \ln(\text{População}) + \beta_2 \times (\text{Taxa de Área Urbanizada}) + \beta_3 \times \ln(\text{Frota de Ônibus}) + \beta_4 \times (\text{Região Metropolitana})$$

Em que:

- α é o intercepto do modelo, que representa o valor base de CO₂eq (quando todas as variáveis independentes são iguais a zero);
- β_1 , β_2 , β_3 e β_4 são os coeficientes associados a cada variável independente, que quantificam o impacto relativo de cada uma sobre as emissões de CO₂eq.

³³ Ver mais em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>

TABELA 7
Estimação de emissão de CO₂eq, considerando os 18 sistemas de transporte analisados
FONTE: Elaboração própria

	Coeficiente	Erro Padrão	t	P > t	[0.025 0.975]	
Intercepto	1,250	0,520	2,404	0,032	0,127	2,374
(ln)População	0,2841	0,111	2,551	0,024	0,043	0,525
(ln)Frota diesel	0,8103	0,075	10,859	0,000	0,649	0,971
(dummy)Região Metropolitana	-0,195	0,076	-2,565	0,024	-0,359	-0,031
Taxa de Área Urbana	-3,255	952,00	-3,419	0,005	-5,311	-1,198

Os parâmetros gerados pelo modelo representam a contribuição de cada uma dessas variáveis na determinação das emissões de CO₂eq. Os resultados da modelagem indicam diferentes impactos das variáveis analisadas sobre as emissões de GEE. A população demonstrou ter efeito positivo sobre as emissões de GEE. Isso indica que o crescimento populacional tende a aumentar a intensidade de uso dos sistemas de transportes, o que demandaria mais viagens e maior produção quilométrica para atender a demanda crescente por se deslocar. Em linha com resultados anteriormente discutidos, esta variável está associada ao comportamento observado nas maiores metrópoles brasileiras, que concentram parcelas significativas da população brasileira e são, em número absoluto, as maiores emissoras de CO₂eq.

A variável relativa a frotas de ônibus a motor diesel indica que, em média, a substituição (redução) de 1% dos veículos a diesel resulta em uma redução de 0,810% nas emissões de CO₂eq, considerando os demais fatores constantes. Sabe-se que a substituição de ônibus a diesel por veículos elétricos não ocorre de forma totalmente equivalente (1:1), devido a fatores como a disponibilidade de recarga, a capacidade das baterias e a intensidade de uso dos veículos. Nesse sentido, a redução estimada em 0,810% nas emissões de CO₂eq para cada 1% de frota substituída indica que a simples troca de um veículo a diesel por um elétrico pode não ser suficiente para cumprir toda a quilometragem originalmente realizada, o que demandaria introdução de outro veículo elétrico para operacionalizar a programação.

A fim de representar as localidades em relação à área de influência de seus serviços, utiliza-se uma variável binária (*dummy*) para modelar a territorialidade dos sistemas. De forma prática, o valor da variável é 1 quando o sistema opera em nível intermunicipal e 0 quando o sistema é restrito a um município. O coeficiente estimado indica que os sistemas de transporte intermunicipal emitem 19,5% menos poluentes quando comparado a um sistema municipal com as demais variáveis equivalentes. Este comportamento pode se justificar considerando a dinâmica de tráfego que veículos em trajetos entre municípios percorrem, podendo imprimir velocidades mais altas e evitar paradas em congestionamentos. Dessa forma, a eficiência do consumo de combustíveis é mais elevada e, por isso, a emissão de poluentes é reduzida.

A taxa de área urbanizada apresentou um efeito negativo sobre emissões de CO₂eq, sugerindo que o aumento (proporcional) de áreas urbanizadas, possivelmente associado a maior compactidade, tende a reduzir os volumes de GEE. No caso, mantendo as demais variáveis constantes, estima-se que as emissões sejam reduzidas em 3,255% para cada 1% de aumento na proporção de área urbanizada. A polaridade negativa deste fator corrobora com a teoria clássica da Economia Urbana, indicando que as cidades são arranjos populacionais que aumentam a eficiência de deslocamentos (em termos de tempo, custo financeiro) e reduz custos (neste caso, ambiental). Sendo assim, a disposição da mesma população e da mesma frota em uma área menor pode representar um ambiente urbano mais compacto, podendo estar associado a menor necessidade de deslocamentos longos (usualmente motorizados). Nesse cenário, também é possível a redução na intensidade de uso da frota, que atende toda a população em uma área menor e menos dispersa.

O processo de incentivo à transição energética do transporte público foi iniciado com o programa Novo PAC/REFROTA, que fomentou a introdução de 2.296 ônibus elétricos em diversas regiões do Brasil. Através dessa metodologia de expansão dos resultados dos 18 sistemas analisados para as demais cidades do Brasil, estimamos que esse programa **pode reduzir as emissões de CO₂eq no transporte público em 7,84%**. Em termos absolutos, a substituição de frota reduz as emissões de CO₂eq em 324,6 t por dia ou 81.799,2 t por ano (considerando 252 dias úteis de operação). Com base nos valores do CSC, variando entre US\$ 22,60/tCO₂ (Ipea) e US\$ 25,83/tCO₂ (CEPAL), o CSC diário foi estimado entre US\$ 7.335,96 e US\$ 8.384,42, resultando em uma **economia anual de mais de R\$ 11,6 milhões (US\$ 2.112.873,34) a nível nacional**.

7. RECOMENDAÇÕES

Os resultados extraídos deste estudo permitem apontar para medidas que visam potencializar as políticas públicas de descarbonização do setor de transporte, com o objetivo de maximizar a eficácia do investimento público e os ganhos socioambientais no médio prazo. Os obstáculos encontrados ao longo do percurso e os dados gerados se materializam em propostas de ações que buscam não só viabilizar os projetos de eletromobilidade pelo país, mas também que contribuam para fortalecer a transparência e a gestão dos sistemas de transporte público coletivo (TPC). São elas:

7.1 Aprimorar a gestão e governança de dados e contratos de transporte público coletivo

A maior parte dos sistemas contemplados no escopo da pesquisa não reúne as condições necessárias em termos de disponibilidade de informações e/ou estrutura de dados. A falta de padronização e transparência dos dados que o estudo evidencia é mais um indicador da necessidade de intervenção na matéria pelo Governo Federal.

Nesse contexto, a atuação do governo em nível federal deve sistematizar ações que consolidam uma estratégia macro de aprimoramento do TPC urbano como um todo para além da descarbonização, através de medidas³⁴ como:

- ✓ Disponibilizar minutas de editais, contratos e aditivos contratuais de TPC por ônibus;
- ✓ Definir padrões e protocolos de compartilhamento e consumo de dados brutos entre empresas privadas e entes públicos;
- ✓ Implementar programa contínuo de capacitação para gestores públicos em análise de dados;
- ✓ Condicionar acesso à última parcela de financiamento de infraestrutura ou renovação de frota e/ou fundo federal de custeio da operação de TPC à exigência do ente federativo em aderir ao SIMU e liberar acesso a dados de SBE, programação da rede de TPC, cadastro e monitoramento da frota via API;
- ✓ Criar repositório nacional de dados de GTFS, GPS e SBE associados ao SIMU e geridos por órgão federal;
- ✓ Incentivar o desenvolvimento de modelos de negócios focados na diminuição dos custos de operação (OPEX), com o objetivo de otimizar o orçamento público local para subsidiar o sistema de TPC e ampliar a capacidade de investimento para aquisição de veículos e infraestrutura de recarga (CAPEX).

7.2 Incentivar a adoção de estratégias de recarga alinhadas às demandas operacionais dos sistemas

No estudo proposto, a operação dos veículos é uma das centralidades da discussão envolvendo substituição de frota e descarbonização do transporte público. No entanto, caracterizando produção quilométrica diária e consumo energético diário, é possível tratar de aspectos da eletromobilidade complementares à introdução da frota elétrica, como o planejamento e a operação da infraestrutura de recarga.

Na prática, os parâmetros discutidos neste estudo são representativos do volume de energia a ser consumido pelo sistema e proxies do custo associado a sua operação. No entanto, um componente ainda relevante sobre o custo total de sistemas de transporte elétrico consiste na infraestrutura, demandando ainda articulação com entidades distribuidoras de energia para viabilizar tecnicamente a operação da mobilidade elétrica. Sendo assim, é relevante que, em instância federal, sejam postos mecanismos de cooperação entre estes atores.

Além disso, considerando a caracterização operacional disposta neste estudo, o estabelecimento de diretrizes visando eficiência nos investimentos das infraestruturas de recarga mostra-se fundamental para que a política pública, em nível nacional, seja viável e racionalizada diante do volume de recursos necessários. Esta ação pode ser tomada a partir de instrumentos ou condicionalidades associadas à participação em programas já estabelecidos, como o financiamento via Novo PAC/REFROTA.

³⁴ Ver mais em: SERRA, B.; BASSI, R.; MELLO, A.; BITTENCOURT, T. Insumos para a Estratégia Nacional de Mobilidade Urbana. ITDP Brasil, 2024. Disponível em: itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2024/10/Insumos-para-Estrategia-Nacional-de-Mob-Urbana.pdf. Acessado em 28 out. 2024

Cabe destacar que, neste estudo, a abordagem para focalização discute a substituição de veículo cuja demanda energética seja inferior ao que uma bateria usualmente disponível nos modelos elétricos pode fornecer. Sendo assim, a focalização proposta é uma abordagem que promove ganhos no curto prazo, por não demandar incrementos na frota de ônibus e permitir estratégias de recarga mais flexíveis (incluindo a recarga fora de horário útil, tipicamente denominada de recarga *overnight*).

Nesse sentido, a atuação do Governo Federal pode ser catalisadora de:

- Definir diretrizes a respeito do planejamento e do dimensionamento de infraestruturas de recarga, visando maximizar a circulação de veículos elétricos a partir da provisão racionalizada de carregadores;
- Apoiar tecnicamente a concepção dos projetos de eletrificação, colocando em relevo os principais aspectos estratégicos a serem considerados para a eficácia dos empreendimentos, como, por exemplo, cálculo do Custo Total de Propriedade (TCO) e o dimensionamento da demanda energética dos sistemas em operação;
- Prever linha de financiamento específica no processo de renovação de frota propiciado pelo Novo PAC para estudos específicos relacionados à infraestrutura de recarga.

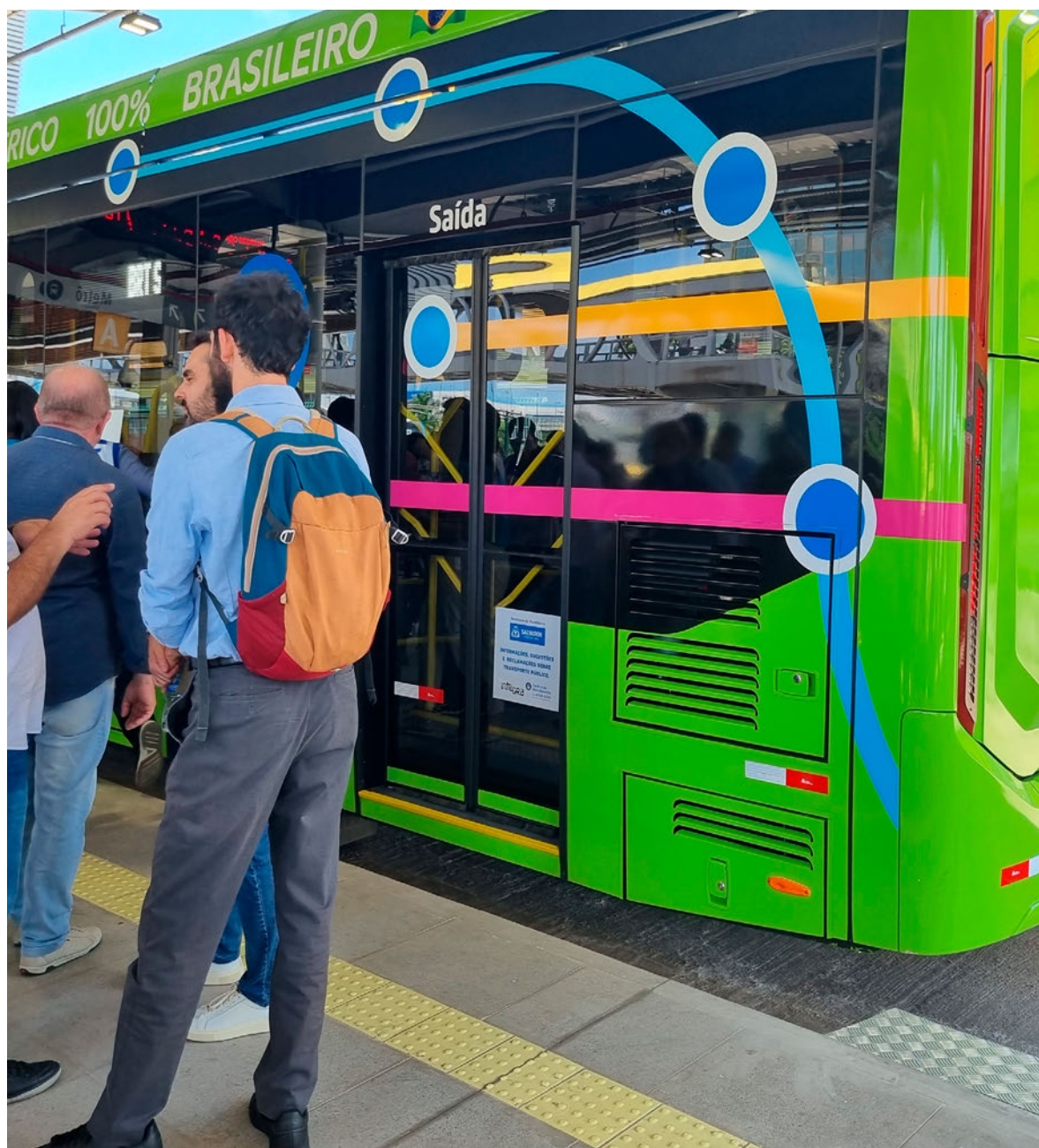
7.3 Coordenar a compra de ônibus elétricos por municípios e estados que solicitam recursos à União

O presente estudo estima que 68,8% dos veículos dos sistemas analisados são do tipo convencional (*padron* ou básico), o que se alinha com a demanda das cidades que recorreram ao Novo PAC/REFROTA 2023, onde mais de 80% dos veículos elétricos contemplados possuem tais tipologias.

Considerando o alto valor de CAPEX investido recentemente pelas cidades para aquisição de veículos elétricos, variando de R\$ 2,3 milhões até R\$ 3,8 milhões segundo as últimas aquisições de frota praticadas no Brasil, e a necessidade latente de renovação de frota dos sistemas analisados, a coordenação pelo Governo Federal para adquirir esses veículos torna-se fundamental para que os projetos de descarbonização das frotas dos sistemas de TPC sejam viáveis para cada vez mais municípios, tornando a política mais democrática e eficiente.

Da mesma forma, a padronização das especificações de frota que considera as necessidades da maior parte dos sistemas brasileiros de TPC ajuda a desenvolver a indústria de ônibus no país, bem como aprimora a gestão da frota de ônibus elétrico e confere vantajosidade aos projetos de eletrificação dos sistemas, a partir da:

- Diminuição dos custos de manutenção e aquisição de peças e componentes no médio prazo;
- Diminuição dos custos de aquisição dos veículos elétricos no médio prazo ao evitar a fragmentação das compras;
- + Aumento da possibilidade de realocação de frota;
- + Facilitação da fiscalização dos veículos e o atendimento aos padrões de segurança e qualidade estabelecidos;
- + Melhora na qualidade do serviço prestado para o usuário.



Ônibus da frota elétrica do BRT de Salvador, Brasil.
FONTE: ITDP Brasil.

8. CONCLUSÃO

A transição energética do transporte público por ônibus é um processo que fundamentalmente qualifica o transporte público e reduz as emissões de GEE relacionados ao transporte. Nesse sentido, o presente estudo estabelece um panorama a respeito da frota e da operação de ônibus em 18 sistemas de transporte no Brasil, fornecendo insumos para basear o desenho de políticas de incentivo à mobilidade elétrica em âmbito nacional.

Mais especificamente, este estudo identifica a quantidade de ônibus elétricos que poderiam ser implementados nas cidades, no curto prazo, com menor impacto operacional possível. Ou seja, identificam-se veículos a diesel em operação que percorrem diariamente distâncias compatíveis com a autonomia dos ônibus elétricos disponíveis atualmente no mercado. Dessa forma, não há necessidade de aumento de frota para complemento da operação, viabilizando ainda a recarga fora dos horários de maior demanda (podendo ser realizada durante a noite, na modalidade *overnight*, por exemplo).

Nesse sentido, o estudo tem as frotas de ônibus como objetos principais de análise. Este escopo limita a discussão quanto ao planejamento e instalação de infraestrutura de recarga, uma vez que não avalia questões relativas à rede de distribuição de energia elétrica e custo de consumo energético. Este aspecto demonstra-se essencial para caracterizar a viabilidade da mobilidade elétrica, especialmente quando consideram-se os custos de implantação da infraestrutura de recarga e a dinâmica de carregamento adotada pelos veículos.

Além disso, este estudo considera que a operação verificada nas redes (especificamente nas análises conduzidas a partir de GPS) é o cenário base para a operação futura dos veículos elétricos. Na prática, a análise conduzida não considera otimizações e/ou alterações na prestação dos serviços atualmente monitorados. No entanto, diante de alterações contratuais (especialmente em novas concessões de operação do transporte público), os recursos necessários para operação da rede podem se alterar frente às mudanças previstas na programação dos serviços ou na tipologia de veículos empregada em uma rota.

Primeiramente, esta pesquisa **apresenta as topologias e fabricantes disponíveis no mercado brasileiro**, visando a constituição de uma estratégia de eletrificação do transporte público que considere a oferta de ônibus do mercado. Nota-se que as tipologias com maior oferta no mercado de ônibus elétrico brasileiro são as tipologias básico e *padron*, totalizando 16 modelos diferentes de 9 fabricantes.

A segunda etapa do estudo consistiu na **análise de dados operacionais** de 18 sistemas para avaliar a operação de cada veículo a fim de determinar seu consumo energético e seu potencial de substituição por ônibus elétricos. Destaca-se que esta é a primeira vez em que um estudo utiliza-se de dados operacionais e inclui sistemas (municipais e intermunicipais) das regiões Nordeste, Centro-Oeste, Sul e Sudeste brasileiras.

A partir de análises empíricas, foi determinado o **potencial de eletrificação** de cada sistema analisado. Ele é definido, portanto, como a quantidade de veículos, de tecnologias mais poluentes, e tipologia convencional, que pode ser substituída por veículos elétricos com impactos mínimos no dimensionamento de frota e em sua respectiva operação, possibilitando inclusive estratégia de recarga noturna.

Somando os veículos de cada uma dos 18 sistemas analisados, o potencial de eletrificação estimado contempla **14.146 ônibus** convencionais. Analisando cada região, São Paulo, Rio de Janeiro, Goiânia e Belo Horizonte são os sistemas com maior potencial de eletrificação em valores absolutos. Isso decorre do fato de essas regiões concentrarem as maiores frotas de transporte público do Brasil aliado a uma alta idade média da frota. Belo Horizonte (N e RM), Curitiba (N e RM), Florianópolis (N), Goiânia (RM), Porto Alegre (N) e Rio de Janeiro (N e RM) são as regiões que podem ter a maior parcela de suas frotas substituída por ônibus elétrico em termos relativos.

TABELA 8
Resumo dos
quantitativos de
veículos analisados
FONTE: Elaboração
própria

Frota cadastrada	46.236
Frota em circulação	37.395
Frota percorrendo, em média, menos que 200 km/dia	22.245
Frota consumindo, em média, menos que 264 kWh/dia	26.151
Frota convencional em circulação	26.192
Frota convencional mais poluente (Euro III e Euro V 5+) cadastrada	23.224
Frota convencional mais poluente (Euro III e Euro V 5+) em circulação	19.278
Frota convencional mais poluente (Euro III e Euro V 5+) em circulação com consumo energético inferior a 264 kWh	14.146

Um aspecto a ser considerado em processos de introdução da tecnologia elétrica consiste na focalização da operação. Focalizar a substituição da frota a diesel nos veículos mais poluentes maximiza o potencial de redução de emissões por dois motivos: i) como esses veículos são menos eficientes e geram mais emissões, substituí-los por uma tecnologia zero emissões traz os maiores benefícios e ii) esses veículos são geralmente mais antigos e deverão ser renovados no curto prazo para cumprir normas e cláusulas contratuais.

Nesse sentido, a terceira etapa do estudo consistiu na estimativa, em termos de **redução de emissões e seu respectivo impacto econômico da substituição de frota** proposta. Foi possível identificar que 24,64% das emissões de GEE dos sistemas de transporte público analisados são provenientes de veículos com tecnologia Euro III e Euro V 5+, com consumo diário inferior à capacidade de uma bateria. Nesse sentido, estima-se que a substituição da frota de tecnologia Euro III e Euro V 5+ poderia evitar um total de 437,7 kt de CO₂eq por ano, e uma respectiva economia, considerando o CSC entre **R\$54,4 milhões** (US\$9.891.973,24) e **R\$62,2 milhões** (US\$11.305.737,56) por ano.

No passo seguinte, a metodologia de análise de impacto foi expandida para as demais cidades brasileiras que não possuem dados operacionais de frota, a fim de estimar os impactos positivos do programa Novo PAC/REFROTA. Os investimentos realizados na primeira fase do programa contemplam a introdução 2.296 veículos elétricos, podendo reduzir as emissões de CO₂eq no transporte público em 8,8 kton por ano (7,9% em relação aos níveis atuais). Em termos socioeconômicos, esta operação de substituição de frota pode reduzir custos associados às emissões da ordem de R\$ 11,6 milhões por ano.

Finalmente, foram apontadas medidas que visam potencializar as políticas públicas de descarbonização por eletrificação, no médio prazo, do setor de transporte, com o objetivo de maximizar a eficácia do investimento público e os ganhos socioambientais correlatos. Essas propostas de ações buscam não apenas viabilizar os projetos de eletromobilidade no Brasil, mas sobremaneira contribuir para repensar e fortalecer os sistemas de transporte público coletivo do país, aprofundando a política de descarbonização, qualificando os sistemas para lhes conferir atratividade e fidelização de usuários.

9. REFERÊNCIAS

ALATORRE, J. E.; CABALLERO, K.; FERRER, J.; GALINDO, L. M. **El costo social del carbono: una visión agregada desde América Latina**. Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2019. Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/471ab218-0a3a-475a-bedd-097ec0b58b30/content>. Acesso em: 31 out. 2024.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 15570: Fabricação de veículos acessíveis de categoria M3 com características urbanas para transporte coletivo de passageiros – Especificações técnicas 2021**. Disponível em: [https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/pessoa_com_deficiencia/ABNT%2015570%20-%2030%207%202021\(1\).pdf](https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/pessoa_com_deficiencia/ABNT%2015570%20-%2030%207%202021(1).pdf). Acesso em: 10 out. 2024.

Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos (NTU). **Anuário NTU 2023 - 2024**. Brasília: NTU, 2024. Disponível em: <https://ntu.org.br/novo/upload/Publicacao/Pub638573500081945042.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

BARASSA, E. et al. **Oferta de ônibus elétrico no Brasil em um cenário de recuperação econômica de baixo carbono**. Santiago: Comissão Econômica para a América Latina e o Caribe (CEPAL), 2022. Disponível em: <https://repositorio.cepal.org/server/api/core/bitstreams/5f891b54-d6a5-4be9-8278-e67908fb2ce3/content>. Acesso em: 22 out. 2024.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR). **Guia para a eletromobilidade: recomendações para o planejamento da eletromobilidade urbana no Brasil**. Brasília: MDR, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/Guia_Eletromobilidade.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento (MPO). **Anexo de indicadores da dimensão estratégica do PPA 2024-2027**. Brasília: MPO, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/planejamento/plano-plurianual/copy_of_arquivos/anexo-de-indicadores-da-dimensao-estrategica-do-ppa-2024-2027.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

BRASIL. Ministério do Planejamento e Orçamento (MPO). **Planejamento orientado à Agenda 2030**. Brasília: MPO, 2023. Disponível em: https://www.gov.br/planejamento/pt-br/assuntos/planejamento/plano-plurianual/copy_of_arquivos/planejamento-orientado-a-agenda-2030.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

BRASIL, Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR); BANCO MUNDIAL. **Projeto de financiamento de ônibus elétrico em Belo Horizonte**. Brasília: MDR, 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/cidades/pt-br/central-de-conteudos/publicacoes/mobilidade-urbana/arquivos/projeto-de-financiamento-de-onibus-eletrico-em-belo-horizonte-portugues.pdf>. Acesso em: 21 out. 2024.

CAMPOLI, J. S.; FEIJÓ, J. R. **Preço do Carbono para Projetos de Investimentos de Infraestrutura no Brasil**. IPEA - Nota Técnica, 2022. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/11449/1/NT_102_Diset_Preco_Carbono.pdf. Acessado em 31 out. 2024.

CARVALHO, C. H. R. **Emissões relativas de poluentes do transporte motorizado de passageiros nos grandes centros urbanos brasileiros**. Brasília: IPEA, 2011. Disponível em: https://repositorio.ipea.gov.br/bitstream/11058/1578/1/td_1606.pdf. Acesso em: 22 out. 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Fatores de emissão veicular 2023**. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2024/07/Fator-de-emissao-2023.xlsx>. Acesso em: 10 out. 2024.

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). **Relatório de emissões veiculares no Estado de São Paulo 2021**. 2021. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2023/01/Relatorio-Emissoes-2021-completo.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

EMPRESA DE PLANEJAMENTO E LOGÍSTICA (EPL); INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Metodologia EPL-IEMA para emissões de GEE e poluentes locais**. 2015. Disponível em: https://energiaambiente.org.br/wp-content/uploads/2023/11/20210628_EPL_IEMA.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

EUFRÁSIO, A.; DANIEL, J.; DELGADO, O. **Análise operacional de ônibus elétricos a bateria em São Paulo**. International Council on Clean Transportation (ICCT), 2022. Disponível em: <https://www.theicct.org/publications/sao-paulo-electric-buses-analysis-2022>. Acesso em: 10 out. 2024.

FONG, W. K. et al. **Global Protocol for Community-Scale Greenhouse Gas Emission Inventories**. An Accounting and Reporting Standard for Cities version 1.1. Greenhouse Gas Protocol, 2021. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/standards/GPC_Full_MASTER_RW_v7.pdf. Acesso em: 31 out. 2024.

GAO, Z. et. al. **Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service**. Energy, v. 122, p. 588-600, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>. Acesso em: 10 out. 2024.

GHG PROTOCOL. **IPCC Global Warming Potential Values**. Agosto de 2024. Disponível em: <https://ghgprotocol.org/sites/default/files/2024-08/Global-Warming-Potential-Values%20%28August%2024%29.pdf>. Acesso em: 11 out. 2024.

HJELKREM, O. A. et al. **A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway**. Transportation Research Part D: Transport and Environment, v. 94, p. 102804, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102804>. Acesso em: 10 out. 2024.

INSTITUTO DE ENERGIA E MEIO AMBIENTE (IEMA). **Inventário Nacional de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores Rodoviários 2013: ano-base 2012**. Disponível em: <https://energiaeambiente.org.br/produto/inventario-nacional-de-emissoes-atmosfericas-por-veiculos-automotores-rodoviaros-2013-ano-base-2012>. Acesso em: 10 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Cidades e Estados**. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/>. Acesso em: 10 out. 2024.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malha de setores censitários – Brasil: 2021**. Disponível em: [https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios/divisoes_intramunicipais/2021/Malha_de_setores_\(shp\)_Brasil](https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html?caminho=organizacao_do_territorio/malhas_territoriais/malhas_de_setores_censitarios/divisoes_intramunicipais/2021/Malha_de_setores_(shp)_Brasil). Acesso em: 10 out. 2024.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION. IPCC. **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change** [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasijsa, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926

INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO. ITDP BRASIL. **Soluções para incentivar a gestão de dados no transporte público**. 2024. Disponível em: <https://itdpbrasil.org/solucoes-para-incentivar-a-gestao-de-dados-no-transporte-publico/>. Acesso em: 22 out. 2024.

Laboratório de Transporte de Carga – LTC/PET/COPPE/UFRJ. **Inventário de Emissões Atmosféricas por Veículos Automotores do Estado do Rio de Janeiro**. 2011. Disponível em: https://www.ltc.coppe.ufrj.br/src/uploads/2020/05/relatorio_inventario_2011.pdf. Acesso em: 11 out. 2024.

SÃO PAULO TRANSPORTE S.A. (SPTrans). **Instrução técnica: metodologia para cálculo de emissões de poluentes**. 2023. Disponível em: <https://www.sptrans.com.br/media/13527/instrucao-tecnica-emissao-poluente.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

SEEG. **Análise das emissões de gases de efeito estufa e suas implicações para as metas climáticas do Brasil**. Sistema de Estimativas de Emissões e Remoções de Gases de Efeito Estufa, 2024. Disponível em: <https://seeg.eco.br/wp-content/uploads/2024/11/SEEG-RELATORIO-ANALITICO-12.pdf>. Acesso em: 06 nov. 2024.

SERRA, B.; BASSI, R.; MELLO, A.; BITTENCOURT, T. **Insumos para a Estratégia Nacional de Mobilidade Urbana**. ITDP Brasil, 2024. Disponível em: itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2024/10/Insumos-para-Estrategia-Nacional-de-Mob.-Urbana.pdf. Acessado em 28 out. 2024.

URBS – Urbanização de Curitiba S.A. **Relatório técnico dos testes operacionais do chamamento público para a demonstração de ônibus elétricos em Curitiba**. Edital 001/2022. Curitiba, 2022. Disponível em: <https://transformative-mobility.org/wp-content/uploads/2024/02/URBS-report.pdf>. Acesso em: 10 out. 2024.

WORLD RESOURCES INSTITUTE; C40 CITIES CLIMATE LEADERSHIP GROUP; ICLEI – Local Governments for Sustainability. **Global protocol for community-scale greenhouse gas emission inventories: an accounting and reporting standard for cities**. 2014. Disponível em: https://ghgprotocol.org/sites/default/files/ghgp/standards/GHGP_GPC_0.pdf. Acesso em: 10 out. 2024.

10. ANEXOS

10.1 Catálogos de veículos elétricos

Fabricante	Modelo	Comprimento	Capacidade	PBT¹	Capacidade da bateria	Autonomia	Tempo de carregamento	Tipo NBR	Tipo
BYD	D9A	Até 13 m	NA	19,5 t	344 kwh	Até 250 km	2 a 3 horas	4_Padron	Padron (piso alto)
BYD	D9W	Até 13 m	NA	20,3 t	344 kwh	Até 250 km	2 a 3 horas	4_Padron	Padron (piso baixo)
BYD	D11A	Até 23 m	NA	41 t	516 kwh	Até 250 km	2 a 3 horas	5_Articulado	Articulado (piso alto)
BYD	D11B	Até 22 m	NA	41 t	590 kwh	Até 250 km	2 a 3 horas	5_Articulado	Articulado (piso baixo)
Marcopolo	Attivi	Até 13 m	80	20,6 t	396 kwh	Entre 250 e 280 km	Até 4 horas	4_Padron	Padron (piso baixo)
Mercedes-Benz	eO500U	Até 13,2 m	80	21,2 t	588 kWh	Até 250 km	Até 3 horas	4_Padron	Padron (piso baixo)
Higer	AZURE A12BR Padron	12,5 m	80	21 t	385 kwh	Até 270 km	Até 3 horas	4_Padron	Padron (piso baixo)
Higer	Azure A18BR	18,7 m	154	-	560 kwh	Até 270 km	Até 4 horas	5_Articulado	Articulado (piso baixo)
Eletra	E-BUS 10M MIDI	9,9 m	56	17 t	-	Até 250 km	-	3_Midiônibus	Midiônibus (piso alto)
Eletra	E-BUS 21,5M ARTICULADO	21,5 m	143	38 t	-	Até 180 km	-	5_Articulado	Articulado (piso baixo)
Eletra	E-BUS 15M – PADRON	15 m	93	26,2 t	-	Até 250 km	-	4_Padron	Padron (piso baixo)
Eletra	E-BUS 12,8M PADRON	12,8 m	78	20,7 t	-	Até 160 km	-	4_Padron	Padron (piso baixo)
Eletra	E-BUS 12,1M	12,1 m	69	20,7 t	-	Até 250 km	-	4_Básico	Padron (piso baixo)
Volvo	BZL (de 9 a 13,2 m)	-	-	-	-	-	-	4_Padron	-
SHC Ankai	OE-6	6,6 m	9 (sentados)	9 t	Entre 141 e 163 kWh	Entre 250 e 350 km	Entre 50 m a 1h10	1_Micro-ônibus	Micro
SHC Ankai	OE-8	8,7 m	19 (sentados)	14,7 t	Entre 210 e 269 kWh	Entre 250 e 350 km	Entre 1h15 e 1h35	2_Miniônibus	Mini
SHC Ankai	OE-10	10,5 m	24 (sentados)	18 t	Entre 282 e 338 kWh	Entre 250 a 350 km	Entre 1h40 a 2h	3_Midiônibus	Midiônibus (piso baixo)
SHC Ankai	OE-12	12 m	32 (sentados)	19 t	Entre 300 e 423 kWh	Entre 250 e 350 km	Entre 1h45 e 2h30	4_Básico	Básico
Higer	AZURE A9 (9m)	8,8 m	50	-	268 kwh	Até 180 km	Até 1 hora	2_Miniônibus	-
Higer	AZURE A10 (10m)	-	-	-	-	-	-	4_Básico	-
Volvo	BZL	11,8 m	NA	20 t	Entre 282 e 470 kWh	-	-	4_Padron	-
Higer	AZURE A13BR (13m)	-	-	-	-	-	-	4_Padron	-
Volvo	BZL Elétrico 4x2	9,5 m – 13,2 m	NA	20,2 t	Entre 360 e 450 kWh	-	-	4_Padron	-
Higer	KLQ6122 Ultra Capacitor ³	-	-	-	-	-	-	-	-
Higer	PRO BLUE ³	-	-	-	-	-	-	-	-
Volkswagen	e-Volksbus	-	-	-	-	-	-	4_Padron	Padron (piso baixo)

TABELA 9
Pesquisa de mercado de ônibus elétricos
FONTE: Elaboração própria

1 Todos as especificações de frota analisadas podem ser acessadas na Biblioteca do Ciclo de Capacitação para Descarbonização das Frotas de Ônibus das Cidades Brasileiras. Disponível em: <https://www.redus.org.br/ciclo-de-capacitacao-semob/biblioteca/pasta/e86ae123-7cbd-4601-965b-35f329e81647>.
2 Modelos que não se enquadram nas tipologias analisadas neste estudo

10.2 Estimativa de demanda energética por rota

A estimativa de demanda energética por rota teve como referência o modelo de dinâmica de deslocamento longitudinal, adotado nos trabalhos *A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway*³⁵ e *Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service*³⁶.

Independentemente da fonte (baterias ou combustíveis fósseis), o consumo de energia é impactado por diversos fatores, como topografia, características do veículo e condições operacionais no trajeto. No modelo utilizado, as informações relativas aos trajetos são adquiridas através do GTFS ou arquivos georreferenciados.

Os trajetos analisados são complementados por informações de altimetria extraídas de arquivos raster disponibilizados pela plataforma SRTM³⁷. Estas bases são utilizadas em conjunto quanto se interpolam as altitudes consultadas na região para os pontos contidos nos traçados das rotas. Em seguida, são determinadas as declividades dos trechos entre dois pontos consecutivos ao longo da rota.

A potência demandada sobre o motor é calculada pela combinação da incidência das forças e velocidades ao longo dos percursos realizados. Assim, é criado um perfil de uso do motor resultante das características do traçado e da operação. Esse resultado é comparado com os valores catalogados de potência nominal e máxima do motor, avaliando se estão compatíveis. Com as potências calculadas ao longo da rota, é possível estimar o consumo de energia elétrica por viagem. O procedimento é realizado para o período de disponibilidade dos dados para cada sistema. Os parâmetros aplicados nesta etapa estão apontados na Tabela 10.

TABELA 10
Parâmetros da
operação para
estimativa de consumo
energético.
FONTE: Elaboração
própria

Parâmetro	Valor	Unidade
Coeficiente de arrasto aerodinâmico [Cd]	0,79	-
Coeficiente de atrito pavimento [Cr]	0,0098	-
Aceleração da gravidade [g]	9,81	m/s ²
Densidade do ar [ρ]	1,2	kg/m ³

No regime de tráfego real, podem ocorrer ineficiências resultantes da dinâmica de aceleração e desaceleração, não estimadas pela metodologia. Em 2023, a cidade de Curitiba realizou um teste-piloto analisando diferentes modelos de veículos - um articulado, de prefixo XY042, e cinco *padrons*. Mesmo em operação semelhante, circulando sem passageiros e com climatização, o consumo de bateria apresentou diferenças significativas entre os modelos. São observadas diferenças também nas especificações dos veículos, principalmente em relação à potência máxima de cada motor. As especificações estão apresentadas na Figura 14 e, na Figura 15, os resultados de consumo energético e autonomia da bateria após testes.

FIGURA 14
Parâmetros dos
veículos avaliados
no teste-piloto em
Curitiba
FONTE: URBS, 2023.



PADRON					
Prefixo	XY043	XY044	XY045	XY046	XY047
Marca	Eletra	Marcopolo	Eletra	Volvo	Marcopolo
Modelo	eBus	Attivi Integral	eBus	BZL	Attivi Integral
Capacidade de passageiros	Até 70 passageiros	Até 90 passageiros	Até 95 passageiros	Até 90 passageiros	Até 85 passageiros
Dimensões C x L x A (m)	12,16 x 2,50 x 3,45	12,95 x 2,55 x 3,64	15,00 x 2,50 x 3,55	12,58 x 2,55 x 3,64	12,95 x 2,55 x 3,64
Potência (cv)	544	523	544	272	523
Torque (N.m)	3.260	2.800	3.260	425	2.800
Capacidade das Baterias (kWh)	360	398	508	376 (319)*	398

³⁵ HJELKREM, O. A. et al. A battery electric bus energy consumption model for strategic purposes: Validation of a proposed model structure with data from bus fleets in China and Norway. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 94, p. 102804, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102804>. Acesso em: 10 out. 2024.

³⁶ GAO, Z. et. al. Battery capacity and recharging needs for electric buses in city transit service. *Energy*, v. 122, p. 588-600, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.01.101>. Acesso em: 11 out. 2024.

³⁷ <https://portal.opentopography.org/raster?opentopoid=OTSRTM.082015.4326.1>.

FIGURA 15
Resultados do teste-
piloto em Curitiba
(quanto à eficiência e
autonomia)
FONTE: URBS, 2023.



10.3 Detalhamento dos Cálculos de Emissões

10.3.1 Fatores de Emissão

Os fatores de emissão foram aplicados segundo o ano de fabricação do veículo. Para os poluentes analisados, as fontes principais de referência foram:

- **NO_x, MP, N₂O e CH₄:** extraídos da tabela da CETESB³⁸ e variam conforme o ano de fabricação do veículo. Esses fatores são expressos em gramas por quilômetro (g/km).
- **Autonomia do ônibus:** extraído da tabela da CETESB e varia conforme o ano de fabricação do veículo. Expresso em quilômetro por litro de combustível (km/l).
- **CO₂:** O fator de emissão para CO₂ foi definido em 2,603 kg/l de diesel. Este fator não considera o ano de fabricação do veículo, mas as características do combustível no ano estudado.

Para cada veículo, este fator foi ajustado com base na autonomia do ônibus (km/l) e considerando o teor de biodiesel de 13% no diesel. Sendo assim, fator de emissão por quilômetro (kg/km) foi obtido conforme a fórmula:

$$\text{Fator de Emissão CO}_2(\text{kg/km}) = 2,603 \text{ kg/l} \times \text{Autonomia (km/l)} \times (1 - 0,13)$$

- **CO₂ equivalente (CO₂eq):** O cálculo do CO₂eq seguiu a metodologia do IPCC que considera

TABELA 11
Fatores de conversão
de CO₂eq
FONTE: GHG
PROTOCOL, 2024

GEE	CO ₂ eq
CO2	1
CH4	28
N2O	265

³⁸ COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Fatores de emissão veicular 2023. 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/wp-content/uploads/sites/6/2024/07/Fator-de-emissao-2023.xlsx>. Acesso em: 10 out. 2024

Assim, o cálculo final do fator de emissão de CO₂eq foi feito com base na seguinte fórmula:

$$CO_2eq \text{ (kg/km)} = CO_2 \text{ (kg/km)} + 28 \times CH_4 \text{ (kg/km)} + 265 \times N_2O \text{ (kg/km)}$$

10.3.2 Cálculo das Emissões Diárias

Com essas três bases de dados associadas — informações do veículo, quilometragem diária e fatores de emissão — o cálculo das emissões de cada poluente pode ser realizado. Para cada veículo e para cada dia, as emissões de NO_x, MP e CO₂eq são calculadas conforme a fórmula geral:

$$Emissão \text{ (kg)} = Fator \text{ de emissão (kg/km)} \times Quilometragem \text{ Diária (km/dia)}$$

Para cada cidade analisada, esse cálculo é realizado individualmente para cada veículo, considerando seu ano de fabricação e quilometragem diária específica. Ao final, as emissões totais de cada poluente podem ser somadas para obter os resultados agregados por dia.



AGOSTO DE 2025

