

VICTOR LOPRETE COELHO

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA
RETROFITTING E ELETRIFICAÇÃO DE ÔNIBUS DESATIVADOS
NA CIDADE DE SÃO PAULO

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
a obtenção do Diploma de Engenheiro de
Produção.

São Paulo

2025

VICTOR LOPRETE COELHO

ESTUDO DE VIABILIDADE TÉCNICA E ECONÔMICA PARA
RETROFITTING E ELETRIFICAÇÃO DE ÔNIBUS DESATIVADOS
NA CIDADE DE SÃO PAULO

Trabalho de Formatura apresentado à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo para
a obtenção do Diploma de Engenheiro de
Produção.

Orientador: Prof. Dr.

São Paulo

2025

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, que sempre me apoiaram incondicionalmente e me deram todo o suporte necessário em cada etapa da minha trajetória. Este trabalho é dedicado a vocês, que nunca deixaram de acreditar em mim e que são a base de todas as minhas conquistas.

Ao time de handebol da Escola Politécnica, que fez com que a graduação fosse mais leve, divertida e cheia de aprendizado além da sala de aula. A vocês, que se tornaram amigos para a vida inteira, dedico também este trabalho, em reconhecimento a todas as memórias, vitórias, derrotas e momentos compartilhados.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, aos meus pais, pelo amor, incentivo e apoio constantes. Sem a dedicação, o esforço e a confiança de vocês, esta caminhada não teria sido possível.

À minha namorada, pelo carinho, paciência e compreensão em todos os momentos, especialmente nos períodos mais intensos da graduação e na elaboração deste trabalho. Obrigado por estar ao meu lado, mesmo quando eu precisei estar ausente ou sobrecarregado.

Ao meu professor-orientador, pela orientação, disponibilidade e pelas contribuições fundamentais para o desenvolvimento deste trabalho. Seus conselhos, críticas construtivas e confiança foram essenciais para que este projeto se concretizasse.

Por fim, agradeço a todos que, de alguma forma, contribuíram para minha formação e para a realização deste trabalho, seja com uma palavra de apoio, um conselho, uma conversa ou um gesto de amizade.

RESUMO

COELHO, Victor Loprete. **Estudo de Viabilidade Técnica e Econômica para *Retrofitting* e Eletrificação de ônibus desativados na cidade de São Paulo. 2025.** 132 p. Trabalho de Formatura (Diploma de Engenharia de Produção) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2022.

A eletrificação da frota de ônibus de São Paulo e o *retrofit* de veículos desativados configuram um tema de elevada relevância frente às demandas de descarbonização, modernização do transporte coletivo e transição energética justa. E esta monografia tem como objetivo central avaliar a viabilidade técnica, econômica e sistêmica da conversão elétrica, examinando custos, impactos ambientais, efeitos estruturais na rede de distribuição e potenciais de reindustrialização verde. Para este fim, a metodologia adotada compreendeu revisão bibliográfica especializada, análise documental de políticas públicas, leitura técnica de relatórios setoriais e construção de modelos comparativos de custos de ciclo de vida. Como resultado, foi evidenciada a redução significativa de emissões, economia operacional consistente, fortalecimento da infraestrutura elétrica, geração de empregos verdes e ampliação da resiliência urbana. Por fim, conclui-se que o *retrofit* representa uma estratégia eficaz, sustentável e alinhada às metas climáticas da cidade.

Palavras-chave: Eletrificação. *Retrofit*. Mobilidade urbana. Sustentabilidade.

ABSTRACT

The electrification of São Paulo's bus fleet and the retrofitting of decommissioned vehicles are highly relevant issues in light of the demands for decarbonization, modernization of public transport, and a just energy transition. The main objective of this monograph is to assess the technical, economic, and systemic feasibility of electric conversion, examining costs, environmental impacts, structural effects on the distribution network, and potential for green reindustrialization. To this end, the methodology adopted included a specialized literature review, documentary analysis of public policies, technical reading of sector reports, and the construction of comparative life cycle cost models. As a result, a significant reduction in emissions, consistent operational savings, strengthening of the electrical infrastructure, generation of green jobs, and increased urban resilience were evidenced. Finally, it is concluded that retrofitting represents an effective, sustainable strategy that is aligned with the city's climate goals.

Keywords: Electrification. *Retrofitting*. Urban mobility. Sustainability.

LISTA DE QUADROS

| | |
|--|----|
| Quadro 1 - Fluxograma fabricação de ônibus à diesel | 23 |
| Quadro 1 - Fluxograma fabricação de ônibus elétrico | 24 |
| Quadro 3 - Fluxograma de aprovação pós conversão do ônibus | 30 |

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 - Comparação entre países | 19 |
| Tabela 1 - Mapa de impactos do ciclo de vida | 20 |

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Custo por KM ônibus à diesel x ônibus retrofitado

28

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| 1 INTRODUÇÃO | 14 |
| 1.1 Objetivos do trabalho | 14 |
| 1.2 Frota de ônibus da Cidade de São Paulo | 14 |
| 1.3 Histórico da eletrificação dos ônibus | 15 |
| 1.4 Comparação com outros países | 17 |
| 1.5 Sustentabilidade na produção de ônibus | 19 |
| 2 CICLO DE VIDA DOS ÔNIBUS PARA TRANSPORTE PÚBLICO URBANO | 22 |
| 2.1 Ciclo de produção de ônibus a diesel | 22 |
| 2.2 Ciclo de produção de ônibus elétrico | 23 |
| 2.3 Conceito <i>Retrofit</i> e remanufatura | 25 |
| 2.4 <i>Retrofit</i> para ampliação da vida útil | 27 |
| 2.5 Destino dos ônibus retrofitados | 29 |
| CAPÍTULO 3 – VIABILIDADE TÉCNICA DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS DE SÃO PAULO | 31 |
| 3.1 Desafios técnicos prioritários | 31 |
| 3.2 Dimensionamento energético e elétrico | 33 |
| 3.3 Ajustes na rede de distribuição de São Paulo | 36 |
| 3.4 Operação de garagens e layout seguro/eficiente | 39 |
| 3.5 Gestão de riscos | 41 |
| 3.6 Síntese de viabilidade para São Paulo | 44 |
| CAPÍTULO 4 – VIABILIDADE ECONÔMICA DO <i>RETROFIT</i> | 47 |
| 4.1 Estrutura de custos da conversão elétrica de ônibus | 47 |
| 4.2 Custos de infraestrutura elétrica e logística operacional | 49 |
| 4.3 Projeção de ganhos operacionais e redução de custos | 52 |
| 4.4 Modelos de negócio e parcerias operacionais | 55 |
| 4.5 Considerações sobre a viabilidade econômica | 58 |
| 4.6 Potencial de aplicação em São Paulo | 60 |

| | |
|--|-----|
| CAPÍTULO 5 – EFEITOS SISTÊMICOS E ADJACENTES DO <i>RETROFITTING</i> E DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA PAULISTANA | 64 |
| 5.1 Introdução: a transição elétrica como fenômeno urbano e civilizacional | 64 |
| 5.2 Impactos ambientais e ganhos ecológicos da eletrificação | 66 |
| 5.3 Repercussões econômicas: reindustrialização e geração de empregos verdes | 69 |
| 5.4 São Paulo como polo de liderança e inovação em mobilidade elétrica | 72 |
| 5.5 Modernização e fortalecimento da rede elétrica e de distribuição | 75 |
| CAPÍTULO 6 – GOVERNANÇA, REGULAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A ELETROMOBILIDADE | 81 |
| 6.1 Marcos legais brasileiros para a eletrificação do transporte público | 81 |
| 6.2 Papel das agências e instituições públicas (SPTrans, ANTT, ANEEL, CETESB) | 83 |
| 6.3 Modelos internacionais de governança da eletromobilidade | 85 |
| 6.4 Propostas de políticas públicas para acelerar o <i>retrofit</i> em São Paulo | 88 |
| CAPÍTULO 7 – PROJETOS-PILOTO, TECNOLOGIAS EMERGENTES E INOVAÇÕES PARA O FUTURO | 91 |
| 7.1 Panorama dos projetos-piloto existentes no Brasil e no mundo | 91 |
| 7.2 Tecnologias emergentes: baterias, motores, inversores e sistemas de potência | 93 |
| 7.3 Digitalização e inteligência artificial na operação de frotas elétricas | 95 |
| 7.4 Integração com cidades inteligentes (smart cities) | 98 |
| CAPÍTULO 8 – IMPACTOS SOCIAIS, CULTURAIS E TERRITORIAIS DA TRANSIÇÃO ELÉTRICA | 101 |
| 8.1 Justiça ambiental e mobilidade: efeitos distribucionais do <i>retrofit</i> | 101 |
| 8.2 Cultura, percepção pública e aceitação social da eletromobilidade | 103 |
| 8.3 Territorialização da infraestrutura elétrica e impactos nas periferias | 106 |
| 8.4 Transformações no trabalho urbano: novas profissões e reconversão profissional | 108 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 112 |

1 INTRODUÇÃO

1.1 Objetivos do trabalho

O tema central deste trabalho é o processo de *retrofitting* e eletrificação de ônibus desativados na cidade de São Paulo. Dentro do escopo apresentado, temos como objetivo do trabalho: (i) detalhar da frota de ônibus da cidade de São Paulo, (ii) apresentar um histórico referente à eletrificação dos ônibus, (iii) apresentar e diferenciar os conceitos de *retrofit* e remanufatura, (iv) apresentar o ciclo de vida dos ônibus para transporte público urbano, diferenciando-os entre elétricos e a diesel, comparando com outros países, apresentando possíveis destinos para ônibus retrofitados e fazendo observações do ponto de vista da sustentabilidade, (v) verificar e apresentar a viabilidade técnica do processo de *retrofitting*, abordando de forma profunda todo o processo de *retrofitting* e suas demandas técnicas e de infraestrutura, além de apresentar possíveis alternativas para manter a sustentabilidade no processo.

Prosseguindo, (vi) verificar e apresentar a viabilidade financeira do processo de *retrofitting*, calculando os custos na transformação do ônibus, custos de infraestrutura, e ganho operacional, entre outros., além de comparar e verificar possíveis sinergias com modelos de negócios existentes como por exemplo: Sambaíba, Grupo Ruas, Santa Brígida, entre outros. E, (vii) por fim, apresentar outros efeitos adjacentes ao processo de *retrofitting* como impactos ambientais, movimentação da economia (geração de novos empregos), liderança de São Paulo nessa atividade e melhoria na rede de distribuição elétrica de São Paulo.

1.2 Frota de ônibus da Cidade de São Paulo

De acordo com o Relatório de sustentabilidade da SPTrans (2018) e o portal de Prefeitura de São Paulo, a história do transporte coletivo na cidade começa em

1892 com a introdução do chamado bonde de Sant'Anna, que eram bondes de tração animal, porém ainda era um modelo muito engessado, dado que não fazia curvas o bonde era obrigado a ir e vir na mesma linha. Até que em 1900, os bondes de tração animal evoluíram para elétricos, sob responsabilidade da Light. Em 1946 foi criada a Companhia Municipal de Transporte Coletivos (CMTCC), que comandava 249 bondes, responsáveis por cortar a cidade de norte a sul e leste a oeste, ligando esses veículos aos trens. Também em 1946, surgiu o sistema de transporte paulistano, o trólebus, atualmente essa modalidade de locomoção ainda existe na cidade contando com 201 veículos, que circulam principalmente na região Leste.

O primeiro ônibus movido a diesel em São Paulo, surgiu em 1968, sendo apenas uma etapa inicial, dado que pela demanda crescente por transportes coletivos na capital exigiu cada vez um número maior de veículos e até veículos maiores, surgindo assim os ônibus articulados e biarticulados. Atualmente, a frota de ônibus da cidade de São Paulo conta com 201 trólebus e 13 mil ônibus movidos a diesel divididos em 6 modelos diferentes com diferentes capacidades, além disso como outras opções de meio de transportes público a cidade conta com metrô, monotrilho e uma frota de aproximadamente 37 mil taxis.

A cidade de São Paulo promulgou a Lei nº 14.933/2009, que institui a Política Municipal de Mudança do Clima. Posteriormente, a Lei nº 16.802/2018 estabeleceu metas para a renovação da frota de ônibus, determinando o prazo de 10 anos para a substituição de 50% dos veículos e 20 anos para a renovação completa, com conclusão prevista para 2038. Além disso, foram definidos objetivos ambientais para esse período, incluindo redução de 100% nas emissões de CO₂, 80% na emissão de óxidos de nitrogênio (NOx) e 90% na liberação de material particulado, tomando como referência os níveis de emissão de 2016.

Em 2022, a prefeitura anunciou a proibição da compra de ônibus movidos a diesel e estipulou a meta de que 20% da frota fosse composta por veículos elétricos até 2024. Considerando que os ônibus elétricos possuem um custo de aquisição mais elevado em comparação aos modelos a diesel, a SPTrans implementou medidas financeiras para compensar essa diferença. Em 2019, os primeiros ônibus

elétricos começaram a circular dentro dessas novas diretrizes, marcando o início de um longo processo de descarbonização do transporte público na cidade.

1.3 Histórico da eletrificação dos ônibus

A história da eletrificação dos ônibus começou no final do século XIX, quando surgiram os primeiros experimentos com trólebus e veículos elétricos movidos a bateria. O marco inicial foi em 1882, na cidade de Berlim, com o “Electromote”, criado por Werner von Siemens, fundador do grupo Siemens. Esse veículo era alimentado por cabos aéreos e é considerado o precursor dos trólebus modernos, abrindo caminho para o desenvolvimento do transporte público elétrico. Ver o estudo de caso histórico “Electrification of Public Transport: A Case Study of the Shenzhen Bus Group” (Banco Mundial, 2021), que contextualiza o papel de demonstrações pioneiras como a de Siemens; e a menção institucional da própria Siemens em “Annual Report 2010” sobre o Electromote (1882).

No início do século XX, entretanto, a adoção desse tipo de veículo ainda era bastante limitada. O grande desafio estava na tecnologia das baterias, que eram pesadas, tinham baixa capacidade de armazenamento e pouca autonomia. Assim, os sistemas elétricos de transporte coletivo evoluíram principalmente por meio de trólebus, que dependiam de redes aéreas, ou de modelos híbridos, enquanto os ônibus totalmente elétricos ainda não eram viáveis. Sínteses históricas como “On the Historical Development and Future Prospects of Various Types of Electric Mobility” detalham essas limitações tecnológicas nas primeiras décadas do século XX.

No Brasil, os primeiros registros de ônibus elétricos datam de 1917, quando veículos de origem americana começaram a circular no Rio de Janeiro entre 1918 e 1928. Porém, a utilização mais estruturada desse tipo de transporte só aconteceu décadas depois, com a implantação dos sistemas de trólebus. Nas décadas seguintes, os trólebus se consolidaram em algumas cidades brasileiras, passando por momentos de expansão e retração, influenciados por fatores políticos,

econômicos e tecnológicos. Nos anos 1950 e 1960, houve até mesmo a importação e montagem local desses veículos, mostrando o interesse do país em desenvolver o transporte elétrico. A cronologia paulistana é bem documentada em fontes oficiais: “Relatório de Sustentabilidade 2018 – SPTrans” e o portal da Prefeitura confirma a criação da CMTTC em 1946 (Decreto-Lei nº 365).

Nos últimos anos, a eletrificação dos ônibus tem ganhado força em escala global, impulsionada por preocupações ambientais e pela necessidade de reduzir a poluição urbana e as emissões de gases de efeito estufa. Na América Latina, um estudo realizado pela C40 Cities com 32 cidades revelou metas importantes para a transição energética. Bogotá, na Colômbia, por exemplo, conta com uma frota de 9.540 ônibus, sendo 1.485 elétricos, e pretende alcançar 50% de eletrificação até 2030. Já Santiago, no Chile, possui 5.247 veículos, dos quais 2.000 são elétricos, com previsão de atingir 62% até 2040.

Em cidades menores, os planos são ainda mais ousados: Barranquilla, na Colômbia, com 300 veículos, e São José dos Campos, no Brasil, com 400, querem ter 100% de suas frotas elétricas até 2030, como referenciado no artigo: *Challenges and Opportunities in the Electrification of São Paulo’s Bus Fleet: Towards Sustainable Public Transportation* (RODRIGUES *et al.*, 2025). Ainda no artigo citado acima é relatado que em outros continentes, os avanços também chamam atenção. Em Doha, no Qatar, a frota é composta por 2.150 ônibus a diesel e 900 elétricos, estes últimos adquiridos para atender à demanda da Copa do Mundo de 2022. Os veículos foram fabricados pela Yutong, uma empresa chinesa que chegou a instalar uma fábrica na região para atender ao mercado local. A infraestrutura de recarga ficou a cargo da ABB, com capacidade total de 125 MW.

Apesar desse avanço, cerca de 85% da matriz energética do Qatar ainda depende de combustíveis fósseis, principalmente gás natural. Como parte da estratégia Qatar Vision 2030, o país estabeleceu metas para que 20% da energia elétrica venha de fontes solares. Um destaque da frota catariana é o uso de baterias de estado sólido, que possibilitam recargas extremamente rápidas, entre 10 e 20 minutos. Na China, a cidade de Shenzhen se tornou referência mundial, sendo a primeira a eletrificar totalmente sua frota de ônibus urbanos, que hoje conta com

16.759 veículos, distribuídos em seis modelos diferentes, projetados para atender diversas demandas de transporte.

Entre 2009 e 2018, a cidade passou por uma rápida transformação tecnológica, resultado de políticas públicas de incentivo e de uma série de projetos-piloto que permitiram testar e implementar soluções inovadoras em grande escala. Esse esforço reduziu em cerca de 194.000 toneladas as emissões anuais de CO₂ equivalente e diminuiu significativamente a emissão de poluentes como CO, NO_x, VOC, PM_{2.5} e PM₁₀. Por outro lado, houve aumento na emissão de SO₂, reflexo do uso de usinas a carvão na geração de energia elétrica.

O caso de Shenzhen é especialmente relevante para São Paulo, já que as duas cidades possuem frotas de tamanho semelhante, tornando a experiência chinesa uma referência importante para o planejamento da capital paulista. Todos esses resultados constam do relatório do Banco Mundial “Electrification of Public Transport: A Case Study of the Shenzhen Bus Group” (2021) e de notas técnicas associadas do IEA sobre o caso Shenzhen.

1.4 Comparação com outros países

A análise comparativa internacional permite contextualizar a experiência paulistana em relação a outras cidades. Bogotá (Colômbia) possui uma frota de 9.540 ônibus, dos quais 1.485 são elétricos, com meta de 50 % de eletrificação até 2030 (CAÑAS *et al.*, 2023). Santiago (Chile) conta com 5.247 ônibus, sendo cerca de 2.000 elétricos, e planeja atingir 62 % de frota elétrica até 2040 (MINISTERIO DE TRANSPORTE DE CHILE, 2023). Barranquilla (Colômbia) e São José dos Campos (Brasil) pretendem alcançar 100 % de ônibus elétricos até 2030, apesar de operarem frotas menores (cerca de 300 e 400 veículos, respectivamente).

Doha (Catar) está implementando baterias de estado sólido em 900 ônibus elétricos, suportadas por infraestrutura de recarga de 125 MW e com meta de operar 20 % da energia proveniente de fonte solar até 2030. Shenzhen (China), por sua vez, eletrificou 16.759 ônibus entre 2009 e 2018, tornando-se referência global e

reduzindo 194 mil toneladas de CO₂e por ano. No caso de Los Angeles (Estados Unidos), a transição para ônibus de emissão zero está em curso. O Departamento de Transporte de Los Angeles (LADOT) é o segundo maior operador da região e contava, em 2023, com 415 ônibus operando com combustíveis como GNV, propano, gasolina e eletricidade; a meta é converter toda a frota para veículos de emissão zero até 2030, seguindo as exigências do Innovative Clean Transit Regulation da Califórnia (CARB, 2023).

O plano estabelece que todas as novas aquisições sejam de ônibus elétricos a partir de 2029. Paralelamente, a Autoridade Metropolitana de Transportes de Los Angeles (LA Metro) operava 566 ônibus elétricos em 2022, tornando-se a maior frota de ônibus elétricos de tamanho completo nos Estados Unidos. Os operadores de Los Angeles planejam atingir a meta de 100 % de ônibus elétricos em 2030, dez anos antes da obrigatoriedade estadual. Relatórios de desempenho da LA Metro indicam que, em corredor específico (Linha G), o consumo médio de energia é de 3,0 kWh/milha (1,86 kWh/km) e a autonomia média é de 106 milhas, com disponibilidade de frota variando entre 70 % e 85 %.

Estudo do National Renewable Energy Laboratory (NREL) sobre a operação de 12 ônibus elétricos da Foothill Transit (condado de Los Angeles) mostra custo operacional de US\$ 0,43 por milha (0,27 US/km), considerando o preço médio da eletricidade de US 0,179/kWh; o custo operacional de ônibus a GNV no mesmo corredor atingiu US\$ 0,54 por milha (0,34 US/km), cerca de 25 % mais caro para ônibus elétricos de 35ft contra US\$ 0,42/mi para veículos a GNV. Esses indicadores demonstram que, apesar do maior custo de aquisição, o custo operacional por quilômetro tende a ser menor para ônibus elétricos e que a disponibilidade se encontra em níveis intermediários. Os dados comparativos são sintetizados na tabela abaixo, incluindo percentuais de eletrificação, custos por quilômetro e notas sobre políticas públicas e matriz elétrica.

Tabela 1 - Comparação entre países

Fonte:

As lições aplicáveis à realidade de São Paulo incluem a necessidade de

| Cidade/País | % elétricos | Custo/km (R\$/km) | Disponibilidade | Matriz elétrica | Notas |
|-----------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Bogotá/Colômbia | 15% | 1.50 R\$/km | Alta | Matriz hidrelétrica | Meta 50% em 2030 |
| Santiago/Chile | 38% | 2.00 R\$/km | Alta | Matriz solar/hidrelétrica | Meta 62% em 2040 |
| Barranquilla/Colômbia | 100% | 1.80 R\$/km | Média | Matriz térmica | Objetivo 100% em 2030 |
| Doha/Qatar | 30% | 2.50 R\$/km | Alta | Matriz gás natural | Baterias estado sólido |
| Shenzhen/China | 100% | 1.20 R\$/km | Média | Matriz carvão/solar | Frota totalmente elétrica desde 2018 |
| Los Angeles/EUA | ≈25% (LADOT) e 30% (LA Metro) | 1.50 (BEB) e 1.87 (CNG) | 70–85% | Matriz mista (solar, gás, renovável) | Meta 100% ZEB em 2030 |

planejamento de infraestrutura de recarga, adoção gradual com apoio de subsídios públicos e a importância de estratégias de manutenção para garantir disponibilidade. Também evidencia-se que as metas ambiciosas (como a de Shenzhen e Los Angeles) requerem cooperação entre órgãos de transporte, concessionárias de energia e fabricantes para garantir escala e estabilidade de fornecimento.

1.5 Sustentabilidade na produção de ônibus

A avaliação do ciclo de vida (LCA) é uma ferramenta fundamental para analisar a sustentabilidade na produção de ônibus. Os limites de sistema incluem desde a extração de matérias-primas (aço, alumínio, polímeros, lítio) até o fim de vida. Para veículos a diesel, os maiores *hotspots* de emissões concentram-se na queima de combustível durante a operação, representando mais de 90 % das emissões totais de CO₂. Já para veículos elétricos, embora a produção das baterias consuma grande quantidade de energia (estimada em 20.000 kWh por conjunto) e tenha impactos ambientais (mineração de lítio, níquel e cobalto), a fase de operação apresenta emissões praticamente nulas quando a energia é de origem renovável (SANTOS *et al.*, 2024). O mapa de impactos do ciclo de vida, apresentado na aba, destaca os indicadores relevantes em cada fase.

Tabela 1 - Mapa de impactos do ciclo de vida

| Fase | Indicador | Unidade | Valor estimado |
|--------------------------|--------------------------------|-----------------|----------------|
| Produção do chassi | Emissões de CO2 | kg CO2e/unidade | 4000 |
| Produção das baterias | Consumo de energia | kWh | 20000 |
| Operação (diesel) | Emissões de NOx | g/km | 7,5 |
| Operação (elétrico) | Consumo de energia | kWh/km | 1,2 |
| Fim de vida (reciclagem) | Taxa de reciclagem de baterias | % | 85 |

Fonte:

Na produção de ônibus elétricos, materiais críticos incluem lítio, níquel e cobalto, cujas cadeias de suprimento apresentam riscos geopolíticos e ambientais. Iniciativas de reciclagem de baterias, como as implementadas na União Europeia e na China, buscam atingir taxas de reciclagem superiores a 85 %, recuperando metais e reduzindo impactos ambientais. Adicionalmente, a remanufatura de módulos de bateria de veículos fora de uso para aplicação em sistemas estacionários de armazenamento contribui para a economia circular.

No contexto do *retrofit*, a sustentabilidade advém do reuso de estruturas de ônibus existentes, reduzindo a demanda por novas carrocerias e componentes e, conseqüentemente, as emissões associadas à produção. O processo gera economia de materiais e diminuição de sucata. A logística reversa de componentes retirados (por exemplo, motores a combustão e tanques de combustível) deve ser planejada para reaproveitamento ou reciclagem. A combinação de *retrofit* e remanufatura é, portanto, alinhada à política municipal de economia circular e à estratégia de descarbonização da mobilidade urbana.

Em síntese, o ciclo de vida dos ônibus urbanos envolve complexas etapas de fabricação, operação, manutenção e fim de vida. A transição para propulsão elétrica e a adoção de *retrofit*/remanufatura representam oportunidades para reduzir emissões e custos operacionais, desde que acompanhadas de planejamento de infraestrutura e políticas públicas adequadas. A comparação internacional evidencia que metas ambiciosas são viáveis quando há coordenação entre stakeholders e investimento em tecnologia. A adoção de modelos sustentáveis na produção e no ciclo de vida dos ônibus é indispensável para alcançar as metas de descarbonização estabelecidas para São Paulo.

A infraestrutura externa de recarga constitui parte integrante do ciclo de vida dos ônibus elétricos. Existem dois tipos principais de recarga: a “*opportunity charging*” (carregamento rápido durante a operação, geralmente com pantógrafo de 450 a 600 kW) e a recarga noturna em depósito (*depot charging*) com potência de 50 a 150 kW por veículo. A distribuidora ENEL estabelece que cargas acima de 2,5 MW devem ser atendidas por linhas de subtransmissão; para uma frota de 100 veículos, a

potência de pico pode atingir 10 MW, exigindo subestações dedicadas (ENEL, 2021). Estudos mostram consumo médio de 1,2 kWh/km para ônibus elétricos em operação em São Paulo, garantindo autonomia para um dia com recarga predominantemente noturna (SOUZA *et al.*, 2024).

2 CICLO DE VIDA DOS ÔNIBUS PARA TRANSPORTE PÚBLICO URBANO

2.1 Ciclo de produção de ônibus a diesel

A cadeia de produção de um ônibus a diesel envolve diversas fases industriais que vão do recebimento do chassi até os testes finais. Na fase inicial, o chassi é fornecido por grandes montadoras e passa por inspeção de qualidade e conformidade com normas de fabricação. Em seguida, o *powertrain* (motor a combustão, sistema de transmissão, eixos e tanque de combustível) é instalado de forma integrada à estrutura. Após a preparação do chassi, a carroceria é montada por encarroçadoras certificadas; esta etapa inclui o encaixe estrutural, instalação de sistemas elétrico e eletrônico, suspensão, freios e climatização (HVAC).

Segue-se a etapa de pintura, na qual se aplicam primer, revestimentos anticorrosivos e tintas de acabamento em cores neutras, garantindo proteção à carroceria. O acabamento interno inclui a instalação de assentos, revestimentos, sistemas de iluminação, comunicação e sinalização. Por fim, os testes finais avaliam o desempenho dinâmico, a conformidade com as normas de segurança (como a NBR 15570 e a resolução CONAMA sobre emissões) e a integridade do veículo.

Os custos e impactos de produção de ônibus a diesel são elevados em termos de energia incorporada e emissões de gases de efeito estufa. Estudos de inventário de ciclo de vida estimam que a fabricação de um chassi gera cerca de 4.000 kg CO₂e por unidade, enquanto a produção dos componentes e carroceria adiciona emissões relacionadas a aço, alumínio e compósitos (OLIVEIRA *et al.*, 2021). Além disso, o processo de pintura é uma das etapas mais críticas em termos de emissões de compostos orgânicos voláteis (COV), demandando sistemas de exaustão e filtragem adequados.

Os pontos de controle de qualidade incluem ensaios de solda, inspeções dimensionais e testes de sistemas (elétrico, suspensão, freios e HVAC). A interface entre OEM e encarroçadora exige especificações técnicas claras e cooperação em padrões de montagem, bem como cumprimento das normas brasileiras de

segurança veicular (CONTRAN). Os riscos de saúde, segurança e meio ambiente (HSE) envolvem exposição a ruído, vibrações e substâncias químicas, o que requer equipamentos de proteção individual e sistemas de gestão ambiental nas fábricas (ABNT, 2020).

Quadro 1 - Fluxograma fabricação de ônibus à diesel

| Etapa | Descrição | Responsável | Saída |
|--------------------------|---|----------------------|-------------------------------|
| Recebimento de chassi | Entrega do chassi e inspeção inicial | Montadora de chassi | Chassi aprovado |
| Preparação do chassi | Instalação do <i>powertrain</i> e componentes | OEM | Chassi pronto para carroceria |
| Construção da carroceria | Montagem estrutural e aplicação de sistemas (elétrico, suspensão) | Encarroçador a | Carroceria montada |
| Pintura | Aplicação de primeira mão, pintura e acabamento externo | Encarroçador a | Unidade pintada |
| Acabamento interno | Instalação de assentos, sistemas HVAC, revestimentos | Encarroçador a | Ônibus finalizado |
| Testes finais | Ensaio de funcionamento, segurança e qualidade | OEM / Encarroçador a | Ônibus pronto para entrega |

Fonte: Autoria própria (2025)

2.2 Ciclo de produção de ônibus elétrico

A produção de ônibus elétricos difere da de veículos a diesel, principalmente pela arquitetura de propulsão. O motor elétrico, geralmente do tipo síncrono de ímãs permanentes, trabalha em conjunto com um inversor que converte corrente contínua das baterias em corrente alternada trifásica. As baterias de íons de lítio (NMC, LFP ou baterias de estado sólido em projetos mais recentes) são dimensionadas para autônias de 200 a 300 km, com capacidades entre 200 kWh e 600 kWh, dependendo da aplicação. O sistema de gerenciamento de baterias (BMS) monitora tensão, temperatura e estado de carga, garantindo segurança e prolongando a vida útil (COSTA *et al.*, 2020).

A integração elétrica com a carroçaria requer reforço estrutural para acomodar o peso das baterias, instalação de cabos de alta tensão protegidos (grau IP67 ou superior) e dispositivos de corte de emergência. Os testes de isolamento, resistência dielétrica e conformidade com normas de alta tensão (IEC 60664) são imprescindíveis. Além disso, no ônibus à diesel o sistema de ar utiliza energia mecânica, enquanto neste ônibus a energia precisa ser elétrica. As etapas de montagem, pintura e acabamento são similares às do ônibus a diesel, porém com calibração específica do *software* de controle do *powertrain*.

Os requisitos de validação e segurança abrangem testes de colisão, validação do BMS, ensaios de *crash* das baterias, certificação IP de componentes, além dos ensaios EMC/EMI. (EMC — Compatibilidade Eletromagnética: Capacidade de um equipamento ou sistema operar satisfatoriamente no seu ambiente eletromagnético sem introduzir perturbações intoleráveis a outros elementos desse ambiente. EMI — Interferência Eletromagnética: Degradação do desempenho de um equipamento, canal de transmissão ou sistema causada por uma perturbação eletromagnética (conduzida ou irradiada).) Comparativamente ao processo de produção de ônibus a diesel, as etapas críticas de montagem estão concentradas na integração elétrica e eletrônica, teste de isolamento e calibração do BMS.

Quadro 1 - Fluxograma fabricação de ônibus elétrico

| Etapas | Descrição | Responsável | Saída |
|--|---|-------------------------------------|----------------------------------|
| Recebimento do chassi/plataforma | Entrega do chassi/plataforma e inspeção inicial | Montadora de chassi / Encarroçadora | Chassi/plataforma aprovado |
| Preparação estrutural | Reforços na carroçaria/chassi para <i>packs</i> de baterias e passagens de cabos HV | Encarroçadora | Estrutura pronta para integração |
| Integração do <i>powertrain</i> elétrico | Instalação de motor síncrono (PMSM), inversor e redutor/eixo elétrico | OEM do <i>powertrain</i> | <i>Powertrain</i> instalado |

| | | | |
|-------------------------------|---|------------------------------|---|
| Sistema de baterias e BMS | Fixação dos <i>packs</i> (200–600 kWh), conexão de arrefecimento e comissionamento do BMS | OEM de baterias / Integrador | Bancos de baterias instalados e BMS ativo |
| Circuito HV e segurança | Cabeamento HV com grau IP67+, seccionadoras/botão de emergência e intertravamentos | Integrador elétrico | Sistema HV seguro e certificado |
| Auxiliares elétricos | Conversor DC/DC, carregador de bordo/porta pantógrafo, HVAC elétrico, compressor de ar e direção elétrica | Integrador / Encarroçadora | Sistemas auxiliares operacionais |
| Construção da carroceria | Montagem estrutural e aplicação de sistemas (elétrico 12/24 V, suspensão, portas) | Encarroçadora | Carroceria montada |
| Pintura | Primer, pintura e acabamento externo | Encarroçadora | Unidade pintada |
| Acabamento interno | Instalação de bancos, revestimentos e sistemas de informação ao passageiro | Encarroçadora | Ônibus finalizado (interior) |
| Calibração de <i>software</i> | Parametrização do inversor, estratégias de torque/frenagem regenerativa e gestão de energia | OEM / Integrador | <i>Powertrain</i> calibrado |
| Ensaio elétricos e segurança | Testes de isolamento/rigidez dielétrica (IEC 60664), IP de componentes, EMC/EMI, validação do BMS e <i>crash</i> das baterias | OEM / Lab acreditado | Conformidade e laudos de segurança |

| | | | |
|---|--|--|---|
| Testes dinâmicos e aceitação | Funcionalidade, autonomia ($\approx 1,2$ kWh/km de referência), desempenho e qualidade | OEM / Encarroçadora | Ônibus aprovado para entrega |
| Interface de recarga | Comissionamento com carregadores (pantógrafo 450–600 kW e/ou <i>depot</i> 50–150 kW) e verificação de protocolos | Operadora / Fornecedor de carregadores | Recarga validada |
| Infraestrutura externa (quando aplicável) | Verificação de capacidade elétrica do pátio (ex.: $>2,5$ MW \rightarrow subtransmissão) e testes de subestação | Operadora / Concessionária (ex.: ENEL) | Pátio energizado e pronto para operação |

Fonte: Autoria própria (2025)

2.3 Conceito *Retrofit* e remanufatura

Antes de prosseguir para o aprofundamento e desenvolvimento deste trabalho é importante estabelecer os conceitos de *retrofit* e remanufatura e suas diferenças, que muitas vezes são utilizados como sinônimos, porém isso não é correto. Nos últimos anos, com o aumento das preocupações ambientais e a busca por maior eficiência nos processos produtivos, termos como *retrofit* e remanufatura têm ganhado destaque em diversas indústrias, principalmente nos setores de transporte, maquinário industrial e equipamentos elétricos. Apesar de muitas vezes serem utilizados como sinônimos, esses conceitos possuem características e objetivos diferentes. Essa diferenciação é consistente com a literatura de economia circular e engenharia de produção, que trata *retrofit* como modernização/atualização e remanufatura como um processo industrial padronizado de “retorno a condição de novo” (IJOMAH; CHILDE; MCMAHON, 2004; SPRINGER, 2017; REMANUFACTURING INDUSTRIES COUNCIL, 2021).

O *retrofit* pode ser entendido como um processo de modernização de equipamentos ou veículos que já estão em uso. Em vez de simplesmente substituir o bem por um novo, realiza-se uma atualização, incorporando tecnologias mais recentes, melhorias de desempenho e, muitas vezes, adequações a normas ambientais ou de segurança mais atuais. No contexto veicular, a literatura descreve *retrofit* “*conversion*” como a substituição do trem de força a combustão por sistemas elétricos (motor, baterias, eletrônica de potência), prática reconhecida como via de transição para mobilidade de baixas emissões (HOEFT *et al.*, 2021; GGGI, 2023; KOZŁOWSKI *et al.*, 2023).

Um exemplo comum é a adaptação de ônibus urbanos movidos a diesel para sistemas elétricos ou híbridos, prática que tem se tornado cada vez mais relevante nas discussões sobre mobilidade sustentável. Nesse caso, o veículo mantém parte da sua estrutura original, mas recebe novos sistemas e componentes, prolongando sua vida útil e reduzindo custos quando comparado à aquisição de um ônibus completamente novo. O *retrofit*, portanto, é uma forma de dar uma “segunda vida” ao bem, tornando-o mais moderno e eficiente, mas sem descaracterizá-lo totalmente. Estudos de caso e revisões mostram ganhos ambientais e potenciais reduções de custo operacional quando a conversão é tecnicamente bem dimensionada (TODORUȚ *et al.*, 2019; HOEFT *et al.*, 2021; KOZŁOWSKI *et al.*, 2023).

Já a remanufatura é um processo mais profundo e padronizado, no qual o produto usado é desmontado por completo, suas peças são inspecionadas, restauradas ou substituídas, e o item é remontado, passando por testes rigorosos de qualidade. O resultado é um produto que volta a ter características muito próximas às de um equipamento novo, inclusive podendo receber nova garantia de fábrica. Essa definição segue o padrão internacional RIC001 e a literatura clássica da área (REMANUFACTURING INDUSTRIES COUNCIL, 2021; IJOMAH; CHILDE; MCMAHON, 2004; SPRINGER, 2017; GEIST *et al.*, 2024).

De acordo com Ijomah, Childe e McMahon (2004) esse processo é muito utilizado na indústria automotiva, por exemplo, na remanufatura de motores, caixas de câmbio e componentes eletrônicos. Geist *et al.* (2024) argumentam que além de oferecer uma alternativa mais econômica, a remanufatura tem forte apelo ambiental,

pois reduz o consumo de matérias-primas e diminui a geração de resíduos. A literatura a posiciona como estratégia central de manufatura sustentável (“like-new” com garantia, desempenho e qualidade equivalentes).

Em resumo, a principal diferença entre *retrofit* e remanufatura está na profundidade da intervenção: enquanto o *retrofit* foca na atualização e modernização do equipamento, aproveitando boa parte da estrutura original, a remanufatura busca restaurar o produto a um estado semelhante ao de novo, seguindo processos padronizados e rigorosos. Ambos contribuem para a economia circular, reduzindo impactos ambientais e custos, mas atendem a necessidades diferentes dentro da gestão de ativos e da manutenção industrial. Essa síntese alinha-se às definições de referência e aos guias técnicos de conversão/*retrofit* para eletrificação no transporte (REMANUFACTURING INDUSTRIES COUNCIL, 2021; HOEFT *et al.*, 2021; GGGI, 2023).

2.4 *Retrofit* para ampliação da vida útil

Retrofit refere-se à modernização de ônibus existentes, substituindo o *powertrain* a combustão por um trem de força elétrico e incorporando tecnologias mais eficientes. Conforme discutido na Introdução, o *retrofit* diferencia-se da remanufatura: esta consiste na desmontagem completa, inspeção e restauração de componentes para condição de “como novo”, enquanto o *retrofit* enfatiza a conversão tecnológica (NREL, 2020; MORAIS *et al.*, 2022).

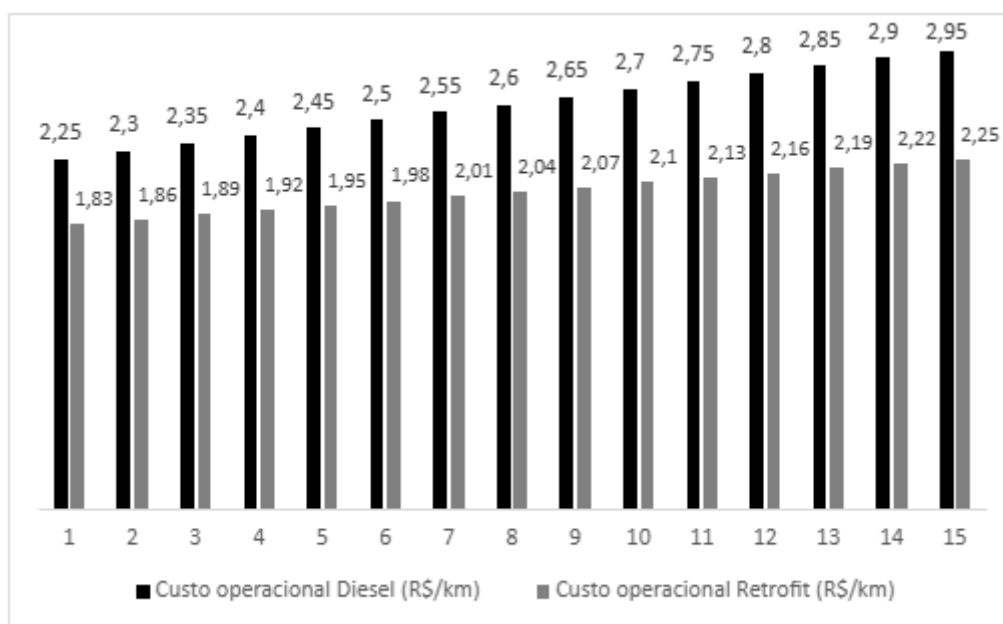
Os critérios técnicos para elegibilidade de um chassi/carroceria a *retrofit* incluem idade inferior a dez anos, integridade estrutural sem sinais de fadiga ou corrosão severa, conformidade documental e histórico de manutenção. A engenharia de conversão exige dimensionamento adequado do trem de força elétrico (potência, torque e capacidade das baterias) de acordo com o peso bruto total (PBT) e o ciclo de operação da linha. A integração mecânica envolve a fixação de motores de tração nos eixos, adaptação de suportes para baterias, projeto de sistemas de

arrefecimento líquido (para baterias e inversores) e integração do freio regenerativo ao sistema de freios pneumáticos existentes.

A calibração eletrônica é necessária para coordenar aceleração, frenagem regenerativa e gestão de energia (Frenagem regenerativa: Forma de frenagem eletrodinâmica em que o motor de tração atua como gerador, convertendo a energia cinética do veículo em energia elétrica e devolvendo-a ao sistema (rede de tração) ou armazenando-a a bordo (bateria, supercapacitor, *flywheel*). O recurso reduz uso dos freios por atrito e melhora a eficiência energética, mas normalmente é combinado com frenagem convencional para parada completa e controle de segurança).

Os custos e prazos de *retrofit* variam conforme o escopo. Em geral, a conversão de um ônibus pode custar entre 30 % e 50 % do valor de um veículo novo, com lead-time de 4 a 6 meses. Este custo inclui aquisição de baterias, motores, inversores, BMS e atualização de sistemas auxiliares. Comparativamente, o investimento (CAPEX) é menor que a compra de um ônibus elétrico novo, porém exige cuidados com a garantia e a expectativa de vida das baterias. O gráfico 1 apresentado abaixo ilustra a tendência de custos operacionais por quilômetro em função da idade do veículo, evidenciando que, após a conversão, o custo operacional decai devido à energia elétrica mais barata e menor manutenção (CONCEIÇÃO *et al.*, 2021).

Gráfico 1 - Custo por KM ônibus à diesel x ônibus retrofitado



Fonte: Autoria própria (2025).

Entre os principais riscos identificados na conversão estão a possível subdimensionamento da capacidade da bateria, a compatibilidade eletromagnética, o peso adicional e a necessidade de reforço estrutural. A mitigação envolve simulação dinâmica, ensaios de protótipo e certificação por órgãos competentes (INMETRO e SPTrans).

2.5 Destino dos ônibus retrofitados

Ônibus retrofitado é um Ônibus cuja configuração original foi modificada após a fabricação para atender novos requisitos técnicos ou ambientais — por exemplo, instalação de tecnologias de pós-tratamento (SCR, filtros) para reduzir NOx/MP ou repotencialização elétrica (“*repower*”), com substituição do trem de força a combustão por *powertrain* elétrico (BEV). Em ambos os casos, busca-se prolongar a vida útil e adequar o veículo a padrões atuais de desempenho e emissões

Após a conversão para propulsão elétrica, os ônibus retrofitados são submetidos a um conjunto de ensaios de aprovação. Primeiramente, realizam-se ensaios laboratoriais de componentes (baterias, inversores, motores) para verificar

conformidade com normas de segurança elétrica e térmica. Em seguida, a inspeção técnica veicular avalia a integridade estrutural, a fixação de baterias e cablagens e a conformidade com o Código de Trânsito Brasileiro. Há também a homologação dos componentes de alta tensão pelo INMETRO.

A fase seguinte compreende testes em estrada, nos quais o veículo opera em circuitos controlados sob diferentes cargas e percursos, verificando autonomia, comportamento dinâmico, eficiência do freio regenerativo e robustez dos sistemas. Uma vez cumpridos os requisitos, o veículo passa pelo licenciamento e registro junto ao DETRAN e à SPTrans, para então receber autorização de operação em linhas definidas.

Quadro 3 - Fluxograma de aprovação pós conversão do ônibus

| Fase | Critério de aprovação | Órgão/Responsável |
|----------------------------|---|--------------------------|
| Ensaaios laboratoriais | Conformidade com normas de segurança elétrica | Laboratório credenciado |
| Inspeção técnica veicular | Verificação de integridade estrutural e funcional | INMETRO / DETRAN |
| Homologação de componentes | Certificação de baterias e sistemas de alta tensão | INMETRO |
| Teste em estrada | Avaliação de desempenho em condições reais | SPTrans / Operadora |
| Licenciamento e registro | Emissão de documentação para circulação | DETRAN / SPTrans |
| Autorização para operação | Liberação para entrada em serviço em linhas definidas | SPTrans |

Fonte: Autoria própria (2025)

Do ponto de vista operacional, a estratégia de uso desses veículos considera a autonomia alcançada, a topografia das linhas e a disponibilidade de pontos de recarga. Linhas planas e de curta extensão são as primeiras a receber veículos retrofitados; no caso de percursos mais longos ou com aclives, pode-se adotar recarga de oportunidade. O acompanhamento de indicadores de desempenho (energia consumida por quilômetro, disponibilidade, custo operacional) é essencial para avaliar a viabilidade do *retrofit* e, se necessário, ajustar parâmetros de operação.

CAPÍTULO 3 – VIABILIDADE TÉCNICA DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS DE SÃO PAULO

3.1 Desafios técnicos prioritários

A eletrificação da frota de ônibus de São Paulo demanda uma reconfiguração estrutural que ultrapassa a mera substituição tecnológica dos veículos. Andrade *et al.* (2023) destacam que a transição para a mobilidade elétrica implica um redesenho sistêmico das infraestruturas urbanas e das práticas de gestão da mobilidade. De modo semelhante, Sclar *et al.* (2020) demonstram que as cidades latino-americanas enfrentam barreiras operacionais significativas, como a falta de integração entre planejamento de transporte e planejamento energético, o que fragiliza a sustentabilidade técnica do processo, assim, o desafio não é apenas tecnológico, mas institucional e estratégico, envolvendo a articulação entre setores público e privado.

Diab, Mouli e Bauer (2022) afirmam que as limitações da rede elétrica e o gerenciamento de demanda são os principais entraves para a eletrificação em larga escala, exigindo o desenvolvimento de redes inteligentes capazes de suportar variações de carga em tempo real. Sadrani *et al.* (2024) complementam essa análise ao apontar que a instabilidade da rede e o carregamento simultâneo de grandes frotas urbanas produzem riscos de sobrecarga e perdas energéticas substanciais. A mitigação desses riscos requer a incorporação de sistemas de armazenamento estacionário, integração com energias renováveis e estratégias de carregamento escalonado, o que eleva a complexidade técnica e financeira do empreendimento.

Além das limitações elétricas, Canitez (2025) enfatiza que os aspectos logísticos da eletrificação constituem um obstáculo estrutural, pois demandam a reformulação completa dos depósitos e garagens, incluindo a instalação de transformadores, subestações e carregadores de alta potência. Schiavi e Hoffmann (2025) corroboram essa visão ao afirmar que a carência de infraestrutura tecnológica e científica no Brasil acarreta dependência externa em componentes críticos, como baterias e inversores, limitando a autonomia técnica e aumentando o custo de implantação. Nesse contexto, a eletrificação de frotas públicas

paulistanas requer planejamento de longo prazo e uma política nacional de inovação integrada.

A eletrificação de frotas de transporte coletivo não pode ser reduzida a um problema de substituição de motores, mas deve ser compreendida como uma transformação estrutural que envolve a reconfiguração do espaço urbano, a capacitação técnica dos agentes e a criação de novos sistemas de gestão energética. Sem políticas integradas de inovação, a dependência tecnológica perpetua o subdesenvolvimento industrial e compromete a soberania energética das cidades (SCHIAVI; HOFFMANN, 2025, p. 7).

A dimensão econômica dos desafios técnicos também é decisiva, considerando que que o alto custo inicial de aquisição de ônibus elétricos e de instalação de infraestrutura de recarga é o principal fator limitante, sobretudo em países em desenvolvimento (SADRANI *et al.*, 2024). Andrade *et al.* (2023) argumentam que essa barreira financeira deve ser enfrentada por meio de políticas públicas de incentivo e pela adoção de modelos de financiamento híbrido, que envolvam capital público e privado. A experiência de Bogotá, analisada por Sclar *et al.* (2020), ilustra como instrumentos de análise custo-benefício podem guiar decisões mais racionais, identificando os pontos de maior retorno ambiental e social.

Do ponto de vista tecnológico, Diab, Mouli e Bauer (2022) e Canitez (2025) destacam que a escolha das tecnologias de carregamento, entre carregamento noturno, rápido ou por oportunidade, afeta profundamente o planejamento operacional e a eficiência energética, sendo acrescentado por Sadrani *et al.* (2024) que a ausência de padronização entre fabricantes gera incompatibilidades técnicas e reduz a interoperabilidade dos sistemas. Cabe destacar que tais fatores indicam que a eletrificação da frota paulistana deve ser precedida por um estudo de padronização tecnológica e pela criação de normas de integração de sistemas, garantindo a viabilidade operacional em médio prazo.

A eletrificação do transporte urbano requer a definição clara de padrões tecnológicos e de protocolos de interoperabilidade entre fabricantes, concessionárias e operadores. A falta de integração entre infraestrutura elétrica e operação veicular resulta em ineficiência, custos elevados e risco de descontinuidade dos serviços. Assim, o planejamento energético deve ser concebido em sinergia com o planejamento urbano e o desenvolvimento industrial (DIAB; MOULI; BAUER, 2022, p. 4).

Schiavi e Hoffmann (2025) associam tais dificuldades à fragilidade dos sistemas nacionais de inovação, nos quais a pesquisa científica não dialoga adequadamente com a indústria. Essa desconexão, também apontada por Andrade *et al.* (2023), impede o surgimento

de soluções tecnológicas adaptadas às condições brasileiras, como sistemas de recarga modular ou baterias de baixo custo produzidas localmente. Canitez (2025), por sua vez, reforça que o desenvolvimento tecnológico nacional é condição indispensável para reduzir a dependência de importações e assegurar a sustentabilidade econômica da transição energética em longo prazo.

A adaptação das tecnologias à realidade paulistana requer atenção especial aos fatores geográficos e climáticos, sendo identificado por Sadrani *et al.* (2024) que a topografia acidentada e as temperaturas elevadas aumentam o consumo energético por quilômetro, exigindo o dimensionamento preciso da capacidade de baterias e sistemas de refrigeração, e Diab, Mouli e Bauer (2022) sugerem o uso de modelagens dinâmicas para prever o comportamento energético em condições variáveis, o que pode otimizar a eficiência e reduzir custos operacionais.

Neste aspecto, compreende-se que esse tipo de abordagem deve orientar o desenho dos corredores elétricos e o planejamento das garagens da SPTrans. Andrade *et al.* (2023) ressaltam que a transição para a mobilidade elétrica implica a requalificação dos profissionais de manutenção, operação e gestão de energia, sendo evidenciado por Sclar *et al.* (2020) que, em Bogotá, a criação de programas de capacitação técnica foi decisiva para o êxito da eletrificação parcial da frota, reduzindo falhas e otimizando a vida útil dos veículos.

Schiavi e Hoffmann (2025) advogam que o Brasil carece de políticas educacionais voltadas para a engenharia elétrica aplicada ao transporte, o que limita a disseminação de conhecimento técnico especializado. Sadrani *et al.* (2024) e Canitez (2025) enfatizam que a transição energética no transporte urbano deve ser tratada como um projeto de Estado, não apenas de governo, articulando políticas de longo prazo com incentivos econômicos, científicos e ambientais. De acordo com Andrade *et al.* (2023) a eletrificação do transporte público, quando conduzida de forma integrada, pode converter-se em vetor de desenvolvimento tecnológico e de justiça socioambiental.

3.2 Dimensionamento energético e elétrico

O dimensionamento energético e elétrico da frota de ônibus elétricos de São Paulo constitui um dos eixos mais críticos da viabilidade técnica da eletrificação urbana. Segundo

Campos, Mensión e Estrada (2021), a operação de frotas de ônibus elétricos exige um equilíbrio entre a autonomia veicular, a capacidade das baterias e o perfil de recarga, sendo o carregamento noturno na garagem uma das estratégias mais adotadas pela robustez operacional, e Damas *et al.* (2024) reforçam que o dimensionamento energético deve considerar não apenas a demanda total da frota, mas também o impacto simultâneo de múltiplas recargas na rede de distribuição.

A modelagem computacional, como a realizada em MATLAB, revela que a carga simultânea de até dezesseis ônibus não compromete a estabilidade da rede, mas requer planejamento de potência e mitigação de picos de demanda (DAMAS *et al.*, 2024). Em seu artigo, Di Martino *et al.* (2023) propõem um modelo de previsão de consumo energético para frotas de transporte público, integrando perfis reais de condução, inclinação do terreno e temperatura ambiente, caracterizando uma abordagem baseada em simulações de linhas reais, e que evidencia que o consumo total e o estado de carga (SOC) das baterias variam de acordo com o tráfego, a topografia e o estilo de condução.

McGrath *et al.* (2022) complementam essa análise ao demonstrar que fatores ambientais, como temperatura e sazonalidade, influenciam diretamente na degradação das baterias, reduzindo a autonomia em até 26% ao longo do ciclo de vida útil. Assim, o dimensionamento energético deve incorporar margens de segurança para compensar a degradação natural e as variações térmicas regionais.

A previsão da demanda energética em frotas elétricas urbanas depende de variáveis interconectadas — clima, topografia, padrão de tráfego e eficiência das baterias. Ignorar tais fatores implica em subdimensionamento da infraestrutura, resultando em sobrecargas operacionais e custos desproporcionais (DI MARTINO *et al.*, 2023, p. 52185).

O modelo proposto por Damas *et al.* (2024) destaca a necessidade de integração entre o dimensionamento elétrico da frota e o gerenciamento da rede de distribuição. A simultaneidade do carregamento representa um desafio, exigindo controle de demanda e sistemas de agendamento automático para evitar picos de consumo. Szürke, Saly e Lakatos (2024) corroboram essa necessidade ao apontar que a variação do consumo entre diferentes rotas pode alcançar até três vezes o valor médio, devido a diferenças no relevo e no comportamento dos motoristas, e sublinham a importância do monitoramento de células

individuais nas baterias, uma vez que falhas localizadas podem comprometer todo o sistema energético do veículo e elevar significativamente os custos de manutenção.

Os autores Campos, Mensión e Estrada (2021) e McGrath *et al.* (2022) convergem ao indicar que o carregamento noturno em garagens, com a presença de baterias de maior capacidade e tempo de recarga prolongado, é a abordagem mais adequada a cidades densas, embora requeira layout elétrico e físico específicos. A experiência europeia mostra que a escolha entre carregamento por oportunidade e carregamento noturno deve estar vinculada ao perfil de operação de cada linha, sendo a autonomia média de 200 a 250 km um parâmetro comum. A partir dessa faixa, o planejamento elétrico deve prever o uso de transformadores dedicados, cabos de alta seção e sistemas de ventilação que assegurem a estabilidade térmica durante as recargas.

O desempenho energético dos ônibus elétricos está intrinsecamente ligado ao perfil de operação e às condições ambientais. Em temperaturas abaixo de zero, o consumo energético pode duplicar, e a carga térmica dos sistemas de aquecimento chega a representar até 70% da energia total utilizada em trajetos urbanos (SZÜRKE; SALY; LAKATOS, 2024, p. 3).

Di Martino *et al.* (2023) e Vepsäläinen *et al.* (2019) indicam que a previsão de demanda energética deve adotar modelos híbridos que combinem simulações determinísticas e modelos probabilísticos de variação, e especificamente o método de análise de sensibilidade empregado por Vepsäläinen *et al.* (2019) revela que temperatura ambiente, resistência ao rolamento e carga útil são os fatores que mais contribuem para as flutuações de consumo. Assim, um dimensionamento eficiente deve contemplar a incerteza operacional e evitar superdimensionamentos, que elevam o peso e o consumo energético global. A utilização de modelos computacionais rápidos, *surrogate models*, permite ajustar parâmetros em tempo real, otimizando o consumo por rota.

Damas *et al.* (2024) demonstram, em seus testes, que o aumento progressivo do número de ônibus conectados simultaneamente não altera o espectro de frequências da rede, indicando que o impacto técnico da eletrificação é mais um desafio de planejamento do que de capacidade elétrica intrínseca. Contudo, McGrath *et al.* (2022) advertem que a degradação das baterias, associada à sobrecarga térmica e ao uso intensivo, altera a eficiência energética ao longo do tempo, tornando essencial a incorporação de algoritmos de gestão de energia baseados no estado de saúde das baterias (SoH). Partindo destas considerações,

compreende-se que a falta de monitoramento inteligente pode reduzir significativamente a vida útil das baterias e aumentar os custos totais de operação.

Campos, Mención e Estrada (2021) ressaltam que o dimensionamento elétrico adequado de uma frota urbana deve conciliar três variáveis críticas: potência instalada, tempo de recarga e eficiência de uso da infraestrutura, sendo reforçado por Szürke, Saly e Lakatos (2024) que a supervisão de baterias e o controle de eficiência energética devem ser contínuos, com diagnósticos de célula e sistemas de alerta precoce. Cabe destacar que essa sinergia entre engenharia elétrica e inteligência de dados configura a base para a operação estável e segura das garagens de ônibus eletrificados.

McGrath *et al.* (2022) e Di Martino *et al.* (2023) assinalam que o planejamento energético urbano deve considerar a sazonalidade da oferta elétrica e as oscilações tarifárias horárias, considerando que a operação em horários de menor custo energético pode reduzir o gasto total em até 20%, enquanto a recarga em horários de pico representa um impacto expressivo sobre a rede de distribuição. Tais elementos tornam indispensável o uso de sistemas de agendamento automático e integração com redes inteligentes (*smart grids*), capazes de balancear a demanda em tempo real.

De acordo com Vepsäläinen *et al.* (2019) o dimensionamento energético e elétrico não é um processo estático, mas dinâmico e adaptativo. A frota de São Paulo, pela sua magnitude, exige um sistema de planejamento digital contínuo, capaz de recalcular parâmetros de carga, temperatura e degradação (DAMAS *et al.*, 2024). Esse modelo de gestão energética, inspirado em experiências europeias e asiáticas, deve ser incorporado ao planejamento municipal como instrumento permanente de modernização e estabilidade elétrica da mobilidade urbana.

3.3 Ajustes na rede de distribuição de São Paulo

A eletrificação da frota de ônibus paulistana requer profundas transformações na rede de distribuição elétrica da metrópole, sendo demonstrado por Damas *et al.* (2024) que a incorporação de carregadores de alta potência em garagens e terminais representa um desafio para a estabilidade do sistema, demandando reforço em subestações e reconfiguração de circuitos alimentadores. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) acrescentam que a urbanização intensa e a concentração de demanda na capital paulista pressionam a

infraestrutura existente, tornando indispensável o redesenho da rede de distribuição em consonância com o crescimento da mobilidade elétrica. Destaca-se que ambos os estudos convergem ao reconhecer que a eletrificação dos transportes não é apenas uma questão veicular, mas de planejamento energético urbano.

De Souza Lima e Brizon (2019) indicam que o Brasil possui uma vantagem estrutural relevante, uma matriz elétrica predominantemente limpa, o que confere à eletrificação dos transportes caráter ainda mais estratégico. No entanto, a ausência de infraestrutura adequada para carregamento de grande escala, como ocorre nas garagens de ônibus, compromete o potencial ambiental da transição. Damas *et al.* (2024) verificaram, por meio de simulações em MATLAB, que o carregamento simultâneo de até dezesseis ônibus não alterou significativamente a qualidade da energia, mas alertam que, em contextos urbanos densos, o impacto cumulativo de milhares de veículos pode provocar quedas de tensão e sobrecarga de transformadores. A expansão da rede, portanto, deve ser acompanhada de investimentos em monitoramento e controle automatizado de demanda.

O aumento da utilização de veículos elétricos representa um novo tipo de carga a ser inserido na rede de distribuição. Essa nova carga altera as condições de operação, aumentando a potência de ponta demandada e podendo causar variações de tensão fora do padrão, sobrecarga de condutores e colapso da rede se não houver planejamento adequado (DAMAS *et al.*, 2024, p. 3).

Dos Santos *et al.* (2019) compreendem a eletrificação como parte de uma transformação mais ampla da infraestrutura urbana, relacionada ao conceito de cidades inteligentes e ao cumprimento do Estado de Direito Ambiental. Em sua argumentação, os autores defendem que a reestruturação da rede de distribuição deve ocorrer em paralelo ao desenvolvimento de fontes renováveis e tecnologias digitais, capazes de integrar transporte, energia e informação em um mesmo sistema, e Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) reforçam que o processo de descarbonização em São Paulo é um fenômeno espacial e social, exigindo políticas públicas que descentralizem a infraestrutura de recarga, de modo a evitar desigualdades socioambientais na distribuição da energia limpa e no acesso à mobilidade sustentável.

Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) destacam que a cidade de São Paulo já dispõe de uma experiência consolidada de transporte elétrico por meio do sistema de trólebus, cuja rede aérea e subestações de alimentação representam um patrimônio técnico subutilizado, e a

decisão de substituir esse sistema por ônibus a bateria, embora inovadora, ignora o potencial de aproveitamento das infraestruturas existentes. Luppi e Consoni (2024) observam que a transição para a eletro mobilidade deve ser acompanhada por modelos de negócios inovadores que estimulem a cooperação entre concessionárias de energia, fabricantes e operadores, evitando o desperdício de ativos e a fragmentação tecnológica. Partindo destas considerações, compreende-se que a manutenção e modernização do sistema trólebus poderiam servir como projeto-piloto para a integração de novas tecnologias de recarga dinâmica na cidade.

De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) ressaltam que a integração entre o setor elétrico e o setor de transportes requer a criação de uma governança interinstitucional. Essa articulação permitiria a otimização da infraestrutura existente e o planejamento de novos investimentos, evitando redundâncias e garantindo confiabilidade, e Damas *et al.* (2024) argumentam que os modelos de simulação energética podem ser usados para dimensionar o impacto de diferentes cenários de eletrificação sobre a rede paulistana, identificando gargalos e pontos críticos antes da implementação física, assim, o uso de *softwares* como MATLAB e Simulink, aliado a dados reais de consumo, possibilita avaliar o comportamento dinâmico das cargas e prevenir interrupções.

A eletrificação dos ônibus urbanos demanda uma abordagem integrada entre os sistemas de transporte e energia. A ausência dessa integração pode resultar em sobrecargas, perdas energéticas e ineficiências sistêmicas. A operação coordenada entre concessionárias, operadores de transporte e planejadores urbanos é essencial para o equilíbrio técnico e econômico da transição (DE SOUZA LIMA; BRIZON, 2019, p. 27).

De acordo com Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024), as regiões periféricas de São Paulo, frequentemente desassistidas em termos energéticos, correm o risco de exclusão tecnológica caso o processo de eletrificação não considere a distribuição equitativa de eletro postos e subestações, e conforme Luppi e Consoni (2024), a cartografia crítica desses autores demonstra que a transição sociotécnica para a mobilidade elétrica é também um processo de justiça energética, no qual a democratização do acesso à infraestrutura elétrica é condição para uma cidade verdadeiramente sustentável.

Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) propõem que o sistema elétrico paulistano seja modernizado com base na experiência dos trólebus, utilizando tecnologias de alimentação contínua, linhas dedicadas e controle automatizado, proposta que permitiria reduzir a necessidade de baterias pesadas, aumentar a eficiência energética e aproveitar a infraestrutura

existente, minimizando custos. Damas *et al.* (2024) complementam que a integração entre carregadores rápidos e sistemas de armazenamento estacionário é uma solução viável para estabilizar o fornecimento durante picos de demanda. Medidas que devem ser associadas à digitalização da rede e à adoção de sistemas inteligentes (*smart grids*), conforme defendem De Souza Lima e Brizon (2019).

Luppi e Consoni (2024) observam que São Paulo possui ecossistemas industriais e tecnológicos capazes de liderar o desenvolvimento de soluções para eletro mobilidade, desde baterias e sistemas de controle até plataformas de monitoramento energético. Contudo, como salientam Dos Santos *et al.* (2019), essa transição deve ser conduzida sob a perspectiva do desenvolvimento sustentável, respeitando princípios ambientais e sociais, de modo a não reproduzir desigualdades ou concentrar benefícios em setores específicos.

A energia, nesse contexto, assume caráter de bem público, cujo acesso deve ser garantido de forma equitativa. Damas *et al.* (2024) comprovam que, tecnicamente, a inserção progressiva de ônibus elétricos é possível sem riscos à estabilidade do sistema, desde que acompanhada por reforços locais e planejamento integrado, e Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) enfatizam que a descarbonização do transporte urbano de São Paulo deve ser guiada por princípios de justiça socioespacial e eficiência energética, garantindo que a energia limpa alcance todas as regiões da cidade.

3.4 Operação de garagens e layout seguro/eficiente

A operação de garagens para frotas de ônibus elétricos em grandes centros urbanos como São Paulo exige uma reconfiguração técnica e espacial que assegure simultaneamente eficiência energética, segurança operacional e estabilidade da rede elétrica. Kivelä *et al.* (2021) analisam que o gerenciamento de garagens eletrificadas depende da sinergia entre planejamento elétrico e logístico, sendo necessário o uso de algoritmos preditivos para alocar veículos e carregadores conforme a demanda real. Li, Chowdhury e Bhavsar (2024) reforçam que a otimização das infraestruturas de carregamento em redes urbanas deve integrar previsões de demanda, fluxos bidirecionais de energia (*vehicle-to-grid*, V2G) e fontes renováveis, para evitar picos de carga e garantir resiliência operacional. Assim, o layout das

garagens não pode ser pensado apenas como espaço físico, mas como um sistema cibernético conectado à rede inteligente da cidade.

Monteiro *et al.* (2025) demonstram que a instalação de sistemas de armazenamento de energia em baterias (*Battery Energy Storage Systems*, BESS) nas garagens reduz significativamente os impactos na rede elétrica, armazenando energia em períodos de baixa demanda e liberando-a durante o carregamento simultâneo de múltiplos ônibus. Zeng, Wu e Ma (2023) acrescentam que a reorganização das operações por meio de estratégias de substituição de veículos — em que ônibus carregados substituem os de bateria baixa — aumenta a eficiência de rotação da frota e a utilização dos carregadores em até 14%. Essa combinação entre automação de carregamento e planejamento operacional reduz o tempo ocioso dos veículos e otimiza a ocupação do espaço físico nas garagens.

A integração de sistemas de armazenamento de energia com estações de carregamento rápido revelou-se decisiva para reduzir a demanda de pico e estabilizar a rede. O uso de um BESS de 100 kW/138 kWh, associado a carregadores de 60 kW, aumentou em 21 vezes o número de sessões de recarga, sem comprometer a qualidade de energia (MONTEIRO *et al.*, 2025, p. 3).

Simão *et al.* (2025) enfatizam que, para que a operação de garagens eletrificadas seja segura e eficiente, é imperativo o alinhamento com normas internacionais de segurança elétrica, como a IEC 61851 e a ISO 6469–3, que regulam tanto a comunicação entre veículos e carregadores quanto a proteção contra choques elétricos. No Brasil, os autores identificam lacunas normativas e a ausência de diretrizes específicas para o dimensionamento de sistemas de recarga em larga escala, o que expõe as garagens a riscos operacionais e de sobrecarga térmica. Kivelä *et al.* (2021) convergem com essa avaliação, defendendo o uso de sensores térmicos distribuídos e sistemas automáticos de ventilação para controlar a dissipação de calor em áreas com alta densidade de carregadores.

Li, Chowdhury e Bhavsar (2024) propõem a utilização de modelos híbridos baseados em aprendizado profundo para prever a demanda horária de recarga e ajustar o carregamento conforme as variações do tráfego, temperatura e disponibilidade de energia renovável. Essa previsão permite distribuir as cargas de forma mais equilibrada entre os diferentes setores da garagem, evitando congestionamentos energéticos e físicos. Zeng, Wu e Ma (2023) mostram que essa abordagem, associada a estratégias de substituição e rodízio de ônibus, reduz os custos totais de operação em até 7,7% e melhora o tempo médio de espera dos passageiros em

15%. A gestão inteligente das garagens, portanto, deve ser concebida como parte de um ecossistema urbano de energia distribuída e transporte integrado.

Os sistemas inteligentes de recarga requerem uma coordenação precisa entre demanda energética, rotatividade de veículos e segurança elétrica. Em ambientes de alta densidade urbana, a ausência de protocolos de interoperabilidade e monitoramento térmico pode levar a falhas sistêmicas e degradação prematura dos equipamentos (LI; CHOWDHURY; BHAVSAR, 2024, p. 2).

Monteiro *et al.* (2025) e Simão *et al.* (2025) também chamam atenção para os aspectos de segurança humana e ergonômica. O posicionamento dos carregadores deve permitir o fluxo seguro de condutores e mecânicos, respeitando normas de ventilação e distâncias mínimas entre cabos de alta tensão. A implementação de sinalização luminosa e barreiras físicas é recomendada para evitar acidentes elétricos. Kivelä *et al.* (2021) complementam que a disposição modular dos pontos de recarga — com agrupamentos independentes de até dez veículos — aumenta a redundância do sistema e facilita manutenções sem interrupção total das operações.

O planejamento do layout das garagens, conforme demonstrado por Zeng, Wu e Ma (2023), deve incorporar modelos de simulação baseados em programação linear mista, capazes de otimizar simultaneamente o número de carregadores, a distância média percorrida pelos veículos dentro do pátio e o custo de infraestrutura. Monteiro *et al.* (2025) observam que, quando integrados a sistemas de gerenciamento de energia, os layouts modulares podem reduzir em até 28% o *peak-to-average ratio* de consumo elétrico, evitando sobrecargas locais e diminuindo custos de demanda contratada.

Simão *et al.* (2025) reforçam que o Brasil necessita adaptar normas internacionais às condições tropicais e urbanas de suas cidades, especialmente quanto à ventilação natural, resistência à umidade e compatibilidade de conectores. Li, Chowdhury e Bhavsar (2024) sugerem que a interoperabilidade entre carregadores e veículos seja garantida por protocolos universais de comunicação (*Plug & Charge*), evitando a fragmentação tecnológica que hoje limita a expansão da mobilidade elétrica. Essa padronização é crucial para garantir que diferentes fabricantes possam operar sob um mesmo ambiente regulatório e técnico.

Kivelä *et al.* (2021) e Monteiro *et al.* (2025) concluem que a eficiência operacional das garagens depende diretamente da integração entre planejamento físico, controle digital e políticas de energia. A adoção de sistemas de monitoramento em tempo real, combinada à gestão de demanda e armazenamento local, assegura a continuidade das operações e reduz o

impacto da frota sobre a rede. Em São Paulo, essa integração se mostra particularmente relevante diante do elevado número de veículos, da limitação de espaço urbano e da necessidade de garantir recarga noturna sem sobrecarregar o sistema de distribuição.

Por fim, Zeng, Wu e Ma (2023) e Simão *et al.* (2025) concordam que a concepção de garagens seguras e eficientes deve partir de uma visão sistêmica: a garagem como *nó energético inteligente* do transporte urbano. Essa perspectiva propõe que os pontos de recarga sejam interligados por redes de dados e energia capazes de responder dinamicamente à variação de carga, reduzindo riscos elétricos e custos operacionais. No contexto paulistano, esse modelo representa o caminho mais promissor para a consolidação de uma frota eletrificada sustentável e funcional.

3.5 Gestão de riscos

A gestão de riscos no processo de eletrificação da frota de ônibus de São Paulo envolve a identificação, avaliação e mitigação de incertezas técnicas, operacionais e institucionais que podem comprometer a viabilidade do projeto. Afif e Singgih (2023) destacam que a maturidade dos modelos de gestão de risco no setor elétrico ainda é insuficiente, especialmente na incorporação de uma cultura organizacional de prevenção, o que reduz a capacidade de antecipar falhas em projetos de infraestrutura. De modo semelhante, Kivelä *et al.* (2021) observam que o gerenciamento de risco em sistemas de transporte eletrificados deve ser entendido como processo dinâmico, envolvendo interação contínua entre planejamento de rede, operação e manutenção, de modo a mitigar vulnerabilidades interdependentes. Assim, a gestão eficaz de riscos é condição necessária para a resiliência técnica e econômica da transição energética urbana.

Li, Chowdhury e Bhavsar (2024) argumentam que, em sistemas de mobilidade elétrica, os riscos estão distribuídos ao longo de toda a cadeia de valor — desde o fornecimento de energia até a segurança das operações em garagens. Essa distribuição requer metodologias de previsão baseadas em inteligência artificial para detectar anomalias e prevenir sobrecargas. Zeng, Wu e Ma (2023) reforçam que a ausência de um controle centralizado sobre os ciclos de carregamento e substituição de veículos aumenta a exposição a falhas operacionais, principalmente em contextos de alta densidade como o paulistano. O

gerenciamento de risco, nesse cenário, deve integrar dimensões tecnológicas e organizacionais, buscando equilibrar eficiência e segurança.

Os projetos de infraestrutura elétrica são, por natureza, complexos e interdependentes. A análise de risco deve identificar não apenas as falhas isoladas, mas os elos críticos cuja interrupção pode gerar efeitos sistêmicos. A mitigação eficaz depende da integração entre planejamento, controle de orçamento e segurança operacional, evitando atrasos e sobrecustos (AFIF; SINGGIH, 2023, p. 186).

Monteiro *et al.* (2025) e Simão *et al.* (2025) destacam que o uso de sistemas de armazenamento de energia (BESS) e o gerenciamento inteligente da demanda reduzem a probabilidade de falhas elétricas e térmicas durante o carregamento simultâneo. Essa integração tecnológica, além de prevenir riscos estruturais, otimiza o uso de energia e minimiza picos de carga. Afif e Singgih (2023) demonstram, contudo, que o sucesso de tais estratégias depende da adoção de modelos de decisão multicritério, como o *Analytic Network Process* (ANP), capazes de hierarquizar os riscos mais críticos e orientar as ações de mitigação. A combinação entre controle automatizado e planejamento estatístico é, portanto, fundamental para a segurança das operações elétricas urbanas.

Kivelä *et al.* (2021) enfatizam a importância da redundância de sistemas e da modularidade na mitigação de riscos operacionais. Ao propor o uso de layouts em células independentes dentro das garagens, os autores indicam que essa arquitetura minimiza a propagação de falhas e facilita a manutenção. Li, Chowdhury e Bhavsar (2024) complementam que, em ambientes densos, a gestão de risco deve incluir algoritmos preditivos capazes de recalculiar continuamente os fluxos de energia, prevenindo sobrecargas e degradações precoces de componentes. A resiliência operacional, nesse sentido, é produto da inteligência sistêmica e da automação.

Os riscos mais dominantes em projetos de eletrificação são aqueles relacionados à sobrecarga de rede, falhas de coordenação e acidentes de trabalho. A mitigação passa pela integração entre tecnologia e governança, pela implementação de protocolos de segurança e pela cultura organizacional de prevenção (MONTEIRO *et al.*, 2025, p. 5).

Simão *et al.* (2025) acrescentam que a gestão de riscos deve abranger não apenas a dimensão técnica, mas também a segurança humana. O manuseio de cabos de alta tensão, os ambientes confinados das garagens e as temperaturas elevadas durante as recargas configuram fatores de risco ocupacional que requerem políticas rigorosas de segurança do trabalho e formação contínua. Zeng, Wu e Ma (2023) alertam que as falhas em ventilação e controle

térmico podem causar incêndios e degradação rápida das baterias, sendo indispensável o monitoramento constante de variáveis térmicas e elétricas.

Afif e Singgih (2023) e Li, Chowdhury e Bhavsar (2024) observam que a mitigação eficaz requer sistemas de decisão baseados em dados (*data-driven risk management*), capazes de correlacionar falhas passadas com previsões futuras. Essa abordagem preditiva permite reduzir o impacto financeiro e operacional de imprevistos, alinhando-se aos princípios de gerenciamento de risco corporativo. Simão *et al.* (2025) argumentam que a análise integrada de riscos, combinando dados operacionais, climáticos e elétricos, é essencial para antecipar cenários críticos e agir preventivamente.

Monteiro *et al.* (2025) sublinham que, além dos riscos técnicos, a incerteza regulatória e a ausência de padronização tecnológica representam ameaças significativas à estabilidade da eletrificação. A falta de normas nacionais para interoperabilidade de carregadores e protocolos de segurança aumenta o risco de falhas e acidentes. Kivelä *et al.* (2021) propõem que a gestão de risco inclua o desenvolvimento de normas específicas para garagens de frotas elétricas, assegurando coerência entre infraestrutura e operação.

Li, Chowdhury e Bhavsar (2024) e Zeng, Wu e Ma (2023) enfatizam que o gerenciamento de risco deve estar integrado ao planejamento energético e urbano. A sobreposição de redes elétricas e a expansão simultânea da frota podem gerar conflitos de uso e vulnerabilidades sistêmicas. O uso de plataformas digitais para coordenação entre concessionárias, empresas de transporte e órgãos públicos pode reduzir significativamente esses riscos, criando uma rede de governança inteligente. Afif e Singgih (2023) destacam que o monitoramento contínuo e a atualização periódica dos planos de mitigação são indispensáveis à sustentabilidade operacional de longo prazo.

Por fim, todos esses autores convergem ao afirmar que a gestão de riscos é o alicerce invisível da eletrificação urbana. Ela deve ser concebida como processo adaptativo, incorporando aprendizagem contínua, inovação tecnológica e cultura de segurança. Monteiro *et al.* (2025) e Simão *et al.* (2025) concluem que a maturidade da gestão de risco em São Paulo determinará não apenas o êxito da eletrificação da frota, mas a confiabilidade energética da cidade. Nesse sentido, a antecipação, o monitoramento e a resposta coordenada aos riscos são as bases para uma transição segura, eficiente e duradoura.

3.6 Síntese de viabilidade para São Paulo

A síntese da viabilidade técnica e econômica da eletrificação da frota de ônibus de São Paulo evidencia que o êxito do processo depende da integração entre infraestrutura energética, inovação tecnológica e políticas públicas de longo prazo. Damas *et al.* (2024) demonstram, a partir de modelagens computacionais, que a inserção de ônibus elétricos pode ser realizada de forma progressiva, sem comprometer a estabilidade da rede de distribuição, desde que acompanhada de reforços localizados e planejamento coordenado. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) complementam que o desafio da eletrificação está menos na geração de energia — uma vez que o Brasil dispõe de matriz predominantemente renovável — e mais na distribuição eficiente dessa energia, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas. Nesse sentido, a viabilidade técnica de São Paulo repousa sobre a capacidade de adaptação de sua rede elétrica e de integração das garagens ao sistema de fornecimento.

De Souza Lima e Brizon (2019) reforçam que o sucesso da mobilidade elétrica depende de uma governança interinstitucional capaz de articular concessionárias, operadores e órgãos reguladores. Essa coordenação é essencial para alinhar investimentos e padronizar tecnologias de recarga. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) acrescentam que a viabilidade do projeto não se resume a indicadores técnicos ou econômicos, mas deve incorporar critérios de justiça energética e territorial, assegurando que as periferias urbanas também se beneficiem da transição elétrica. Dessa forma, o planejamento da eletrificação da frota deve ser entendido como um projeto social e espacial, que redistribui oportunidades e benefícios da inovação tecnológica.

Luppi e Consoni (2024) sustentam que a viabilidade da eletrificação também está condicionada à estrutura industrial e tecnológica nacional. A ausência de uma cadeia produtiva consolidada para a fabricação de baterias, inversores e sistemas de controle impõe dependência externa e eleva os custos de implementação. Contudo, os autores observam que o Brasil possui competência técnica e capacidade industrial latente que podem ser mobilizadas por meio de políticas de incentivo à inovação e de parcerias entre universidades, indústrias e governo. Dos Santos *et al.* (2019), sob uma perspectiva jurídico-ambiental, advertem que a eletrificação só será plenamente sustentável se for acompanhada por marcos regulatórios coerentes com o Estado de Direito Ambiental, garantindo transparência, responsabilidade e equidade no processo de transição energética.

A transformação elétrica do transporte coletivo urbano não deve restringir-se à substituição de tecnologias, mas à reformulação do paradigma energético das cidades. A viabilidade técnica é inseparável da justiça socioambiental e da governança democrática do território urbano (GOUVEIA; DE OLIVEIRA FILHO; RIBEIRO, 2024, p. 22).

Damas *et al.* (2024) e Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) convergem ao destacar que São Paulo dispõe de vantagens estruturais relevantes, como a experiência prévia com o sistema de trólebus e a presença de uma ampla rede de subestações elétricas. Essa infraestrutura, se modernizada, pode reduzir significativamente o custo da transição, servindo como base para novas soluções de recarga dinâmica ou híbrida. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) observam que o aproveitamento racional das infraestruturas existentes reduz a necessidade de grandes investimentos e acelera a implantação de corredores elétricos. A modernização desses sistemas, associada à digitalização e ao controle automatizado de demanda, constitui um vetor de viabilidade técnica e econômica.

A dimensão econômica, entretanto, permanece um desafio central. Luppi e Consoni (2024) enfatizam que o custo inicial de eletrificação de frotas é elevado e requer mecanismos de financiamento híbrido, envolvendo capital público e privado. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) acrescentam que políticas de subsídios e incentivos fiscais devem priorizar soluções que maximizem os benefícios ambientais e sociais, e não apenas o retorno financeiro. Damas *et al.* (2024) mostram que, a médio prazo, a redução dos custos de operação — especialmente pela diminuição do consumo de diesel e manutenção — compensa o investimento inicial, confirmando a viabilidade econômica do modelo.

De Souza Lima e Brizon (2019) sublinham que a integração de sistemas inteligentes de monitoramento e controle é condição indispensável para garantir eficiência operacional e segurança energética. A automatização da gestão de energia nas garagens e terminais permite reduzir desperdícios, ajustar o carregamento em tempo real e prevenir falhas de sobrecarga. Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) propõem, nesse sentido, que a infraestrutura elétrica das garagens seja reconfigurada em módulos independentes, com redundância de sistemas e capacidade de isolamento rápido em caso de falhas, o que aumenta a confiabilidade e a segurança operacional.

A viabilidade da mobilidade elétrica em São Paulo não se restringe à adoção de ônibus elétricos, mas à construção de uma rede de energia inteligente e resiliente, capaz de dialogar com a mobilidade urbana em tempo real. A transição energética deve ser compreendida como projeto civilizacional, em que tecnologia e sociedade

convergem para um mesmo ideal de sustentabilidade (LUPPI; CONSONI, 2024, p. 19).

Dos Santos *et al.* (2019) destacam, ainda, a importância de um marco jurídico sólido para garantir a perenidade da política pública de eletrificação. A ausência de regulamentações claras sobre padrões de carregamento, interoperabilidade tecnológica e gestão de resíduos de baterias pode comprometer o avanço do processo. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) complementam que a governança ambiental precisa ser descentralizada e participativa, permitindo que comunidades locais, universidades e organizações da sociedade civil participem da tomada de decisões e do monitoramento da implementação.

Damas *et al.* (2024) e De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) apontam que o cronograma de implantação deve adotar uma abordagem progressiva e adaptativa. A eletrificação parcial de corredores estratégicos — como os eixos Norte-Sul e Leste-Oeste — permitiria testar tecnologias, ajustar modelos operacionais e reduzir riscos antes da expansão total. Essa estratégia incremental, sustentada por métricas de desempenho e indicadores de eficiência energética, assegura uma transição gradual, sustentável e economicamente equilibrada.

Por fim, a síntese de viabilidade para São Paulo evidencia que a transição elétrica da frota de ônibus é tecnicamente possível, economicamente justificável e ambientalmente desejável, desde que conduzida sob um regime de governança colaborativa e inovação contínua. A experiência internacional e os estudos nacionais indicam que o sucesso do processo depende da combinação de três pilares fundamentais: infraestrutura elétrica inteligente, política industrial integrada e compromisso institucional com a sustentabilidade urbana. A eletrificação da frota, assim, não é apenas uma alternativa tecnológica, mas um novo paradigma de planejamento urbano e civilizacional para o século XXI.

CAPÍTULO 4 – VIABILIDADE ECONÔMICA DO *RETROFIT*

4.1 Estrutura de custos da conversão elétrica de ônibus

A estrutura de custos do *retrofit* elétrico envolve a articulação entre investimentos diretos na substituição do trem de força e despesas indiretas ligadas à adequação estrutural e regulatória do veículo. Cardoso (2022) aponta que a conversão depende de um robusto conjunto de intervenções técnicas, sobretudo na integração de motores elétricos, inversores e bancos de baterias de alta capacidade, elementos que representam a fração mais substancial do capital investido. Rugeri e Gasparin (2022), ao analisarem o TCO de ônibus elétricos em Porto Alegre, concluem que o custo de aquisição das baterias responde por quase metade do valor total do veículo, o que reforça a necessidade de estratégias industriais capazes de reduzir a dependência tecnológica e o impacto financeiro inicial.

Olegario e Vaz (2019) demonstram, em estudo aplicado ao eBus da UFSC, que a adoção de sistemas fotovoltaicos integrados ao veículo pode reduzir custos energéticos operacionais no longo prazo, embora exijam, no momento da conversão, investimentos adicionais em módulos eletrônicos e interfaces de carregamento. Da Silva e Mello (2024) enfatizam que tais soluções energéticas exigem adaptações profundas no sistema elétrico veicular, sobretudo no gerenciamento térmico e na proteção contra curto-circuito, fatores que elevam o custo de engenharia e de certificações. Assim, a etapa de substituição do trem de força não se restringe ao motor, mas envolve a reconfiguração completa do sistema energético.

Rodrigues *et al.* (2025) mostram que o tipo de propulsão adotado — se puramente elétrico ou híbrido — altera significativamente o custo unitário da conversão, pois a integração de células combustível eleva a complexidade e o preço final do projeto. Já Rodrigues, Salas e Trujillo (2024) evidenciam que estratégias de gerenciamento energético podem reduzir até 11,44% do custo diário de operação de ônibus híbridos, indicando que o investimento inicial deve ser avaliado em conjunto com o desempenho energético posterior. Essa relação entre investimento e eficiência reforça que o *retrofit* é mais vantajoso quando se considera o ciclo completo de vida do veículo.

A conversão elétrica de ônibus urbanos exige a renovação integral dos sistemas de tração, armazenamento e controle energético. O custo inicial elevado resulta

principalmente da necessidade de substituir motores, inversores e bancos de baterias, somado às despesas de calibração, homologação e segurança elétrica. Tais fatores tornam indispensável a análise de toda a cadeia de valor e a articulação entre engenharia, política pública e indústria, para evitar que o custo de capital inviabilize a modernização da frota (CARDOSO, 2022, p. 41).

Da Silva e Mello (2024) observam que a adaptação estrutural necessária ao *retrofit* representa uma parcela considerável do custo, pois envolve reforço de chassi, redistribuição de peso para acomodar baterias volumosas e instalação de sistemas de isolamento de alta tensão conforme normas da ABNT. Olegario e Vaz (2019) complementam que tais intervenções estruturais exigem reengenharia da ventilação, da ancoragem dos módulos e da compatibilização entre o novo trem de força e o sistema de frenagem regenerativa. Essas medidas asseguram a integridade física do veículo e a durabilidade dos componentes, mas impactam diretamente o custo total de conversão.

Outro fator relevante diz respeito à mão de obra especializada. Rodrigues *et al.* (2025) sublinham que a capacitação técnica de engenheiros, eletricitas automotivos e mantenedores é indispensável para garantir a confiabilidade dos ônibus convertidos, pois o sistema elétrico exige diagnósticos complexos e procedimentos de manutenção altamente precisos. Rugeri e Gasparin (2022) reforçam que o déficit de profissionais qualificados tende a elevar os custos iniciais, já que parte das empresas precisa terceirizar serviços ou investir em programas próprios de formação. Esses custos indiretos, ainda que menos visíveis, impactam substancialmente o custo unitário final do *retrofit*. Como afirmam Rodrigues *et al.* (2025)

a transição tecnológica demanda investimentos contínuos em capacitação, bem como padronização de processos e integração com normas técnicas nacionais, para assegurar que o ganho operacional compensará o investimento inicial de maneira sustentável (RODRIGUES *et al.*, 2025, p. 12).

As despesas de manutenção preventiva e corretiva apresentam comportamento distinto entre ônibus elétricos e diesel. Rugeri e Gasparin (2022) identificam que motores elétricos requerem manutenção mínima, devido à baixa quantidade de partes móveis, ao passo que o sistema de baterias demanda monitoramento contínuo e eventual substituição a cada oito ou dez anos. Rodrigues *et al.* (2025) argumentam que essas duas dimensões do custo precisam ser analisadas conjuntamente: embora o sistema elétrico reduza significativamente as ocorrências mecânicas, a substituição das baterias impõe um custo periódico substancial, que deve ser incorporado ao cálculo do TCO.

No que se refere ao descarte e reciclagem, Da Silva e Mello (2024) enfatizam que a destinação final de baterias de íons-lítio segue rigorosas normas ambientais, elevando os custos indiretos do processo. Cardoso (2022) acrescenta que a criação de uma cadeia de reuso — especialmente o uso de baterias degradadas em sistemas estacionários — pode reduzir em até 20% os custos totais de ciclo de vida, ao prolongar a utilidade dos módulos substituídos. Olegario e Vaz (2019) assinalam que essa economia circular é elemento fundamental para reduzir o impacto ambiental e os custos econômicos do *retrofit*.

Os estudos de custos apresentados por Cardoso (2022) e por Rugeri e Gasparin (2022) convergem ao apontar que a conversão elétrica pode variar entre R\$ 900 mil e R\$ 1,2 milhão por unidade, dependendo da escala produtiva, da nacionalização dos componentes e da presença de incentivos. Rodrigues *et al.* (2025) demonstram que o custo operacional por quilômetro dos ônibus elétricos tende a ser significativamente menor que o dos veículos a diesel, reduzindo o ciclo de amortização do investimento. Essa economia operacional, somada à durabilidade dos motores elétricos, constitui o núcleo da viabilidade financeira do *retrofit*.

A comparação entre o *retrofit* e a compra de novos ônibus elétricos revela uma vantagem percentual entre 45% e 60% para a conversão, conforme as estimativas de Cardoso (2022) e Rugeri e Gasparin (2022). Da Silva e Mello (2024) ressaltam que essa diferença é particularmente relevante para sistemas de transporte metropolitano de grande escala, como o de São Paulo, onde o custo de renovação integral da frota é elevado. A decisão econômica deve, portanto, equilibrar custo inicial, economia operacional, vida útil remanescente do veículo e capacidade financeira das operadoras. Em conclusão, a estrutura de custos da conversão evidencia que o *retrofit* é uma solução viável quando articulado a políticas industriais, incentivos financeiros e gestão operacional eficiente.

4.2 Custos de infraestrutura elétrica e logística operacional

A transição para frotas eletrificadas impõe custos externos ao veículo que, na maioria das vezes, superam os dispêndios diretamente associados ao *retrofit*. Diouf (2025) ressalta que a expansão da eletro mobilidade depende de investimentos estruturais robustos, especialmente no reforço da rede elétrica urbana, cuja capacidade atual não foi concebida para suportar a simultaneidade de carregamentos em larga escala. Kelly, Flett e Hand (2025) destacam que a infraestrutura de recarga representa parcela significativa do CAPEX total, sobretudo quando

se considera a instalação de carregadores rápidos ou de alta potência, capazes de atender a escalas metropolitanas. Nesse sentido, Haddad, Lazo e Watts (2025) observam que a distribuição da potência entre transformadores, cabines primárias e seccionadoras condiciona o dimensionamento econômico dos projetos, exigindo integração entre engenharia elétrica, planejamento urbano e operação de transporte.

As obras civis e elétricas necessárias ao funcionamento das garagens eletrificadas constituem a segunda categoria de custos mais relevante. Hendriks e Sturmberg (2024) observam que a adequação das garagens exige a instalação de novas rotas de cabos, infraestrutura de ventilação, sistemas de proteção e espaços dedicados a transformadores, elementos que elevam o custo inicial de implantação. Kim *et al.* (2021) demonstram que carregadores de alta potência, como pantógrafos de 300 kW, exigem reforços substanciais nas redes de média tensão, o que compromete a viabilidade em áreas de grande densidade urbana. Assim, a viabilidade econômica do *retrofit* depende de uma harmonização entre o custo das obras civis e a otimização dos carregadores instalados.

A instalação de carregadores, sejam eles lentos, rápidos ou por oportunidade, constitui o núcleo técnico-operacional da eletrificação. Diouf (2025) argumenta que a escolha da estratégia de recarga impacta diretamente o custo de instalação e o desempenho da operação, pois diferentes potências implicam diferentes níveis de exigência sobre a rede. Haddad, Lazo e Watts (2025) demonstram que, na prática, o número de carregadores por ônibus altera o perfil de demanda e, portanto, o custo tarifário e infraestrutural associado. Kelly, Flett e Hand (2025) acrescentam que carregadores rápidos, embora reduzam o tempo de parada dos veículos, aumentam significativamente custos de demanda e de reforço da rede, devendo ser utilizados somente em corredores de alta rotatividade.

EVs represent the future of transportation, provided that sufficient energy can be produced to fuel the entire new fleet. The existing charging practices for EVs will not be sustainable for the grid unless adjustments are implemented prior to achieving net-zero targets for EVs. Significant funding is required for a successful transition to EVs. The grid will undergo considerable stress without substantial investments and modifications in charging behaviors. Policy makers should urge the consideration of utilities that promote daytime charging and motivate investment in charging infrastructure to transition drivers from home to their workplaces for charging (DIOUF, 2025, p. 15).

Outro fator crucial diz respeito aos custos de demanda contratada e tarifas de energia. Diouf (2025) evidencia que o deslocamento de recargas para horários de menor custo pode reduzir significativamente o impacto financeiro sobre as operadoras de transporte, mas essa

prática requer sistemas inteligentes capazes de controlar e distribuir a carga entre veículos e garagens. Kim *et al.* (2021) demonstram que a sensibilidade do TCO a tarifas horárias é particularmente significativa em sistemas de carregamento noturno ou distribuído, exigindo planejamento tarifário rigoroso. Kelly, Flett e Hand (2025) reforçam que operadores devem considerar contratos específicos com concessionárias para reduzir a volatilidade dos custos energéticos e assegurar estabilidade financeira.

A adoção de sistemas de armazenamento estacionário (BESS) oferece oportunidade concreta de mitigação de custos operacionais. Haddad, Lazo e Watts (2025) destacam que o BESS permite minimizar picos de demanda e reduzir a potência contratada, diminuindo o custo mensal da operação. Hendriks e Sturmberg (2024) explicam que o acoplamento entre PV e BESS produz sinergia técnica, reduzindo a dependência da rede e ampliando a autonomia energética da garagem. Kelly, Flett e Hand (2025) acrescentam que, embora o investimento inicial seja elevado, o uso de baterias estacionárias proporciona retorno econômico ao longo da vida útil do sistema, sobretudo em garagens com grande densidade de carregadores.

O layout das garagens, tema anteriormente desenvolvido no capítulo 3.4, interfere diretamente nos custos totais de infraestrutura. Hendriks e Sturmberg (2024) identificam que a disposição inadequada de carregadores acarreta custos adicionais em cabos, obras civis e sistemas de ventilação. Kim *et al.* (2021) evidenciam que a reorganização dos pátios de estacionamento é condição para garantir segurança elétrica e operacional, impactando diretamente o orçamento inicial. Haddad, Lazo e Watts (2025) reafirmam que garagens densificadas exigem corredores ampliados, zonas de segurança, e maior número de sensores térmicos e elétricos, aumentando os dispêndios associados.

Charging infrastructure capital costs presented in Table 4 include the estimated cost of a 150 kW DC charger based on the median total cost of charging infrastructure projects in Chile reported by local companies, adjusted to 2024 prices. For projects with chargers with power output between 10 kW and 150 kW, companies report that chargers account for approximately 40% of the total cost of the charging station, whereas the remaining 60% includes civil and electric works, overhead, switchgears and protections, procedures, and project engineering (HADDAD; LAZO; WATTS, 2025, p. 23).

A integração de sistemas de TI para monitoramento e gestão energética constitui outro fator de custo frequentemente negligenciado. Diouf (2025) observa que sistemas de supervisão digital são essenciais para evitar sobrecarga da rede e garantir confiabilidade na operação diária. Kelly, Flett e Hand (2025) destacam que *softwares* de previsão de carga e

plataformas de gestão integrada reduzem o desperdício de energia e prolongam a vida útil dos carregadores. Haddad, Lazo e Watts (2025) acrescentam que tais sistemas são indispensáveis para dimensionar corretamente transformadores, cabines primárias e disjuntores, afetando diretamente o CAPEX da infraestrutura.

Além dos custos diretos, devem ser considerados custos indiretos decorrentes de burocracias, licenças e adequação normativa. Hendriks e Sturmberg (2024) ressaltam que padrões internacionais como IEC 61851 e IEC 62196 exigem conformidade rígida no projeto, aumentando custos de engenharia. Kim *et al.* (2021) reforçam que a homologação e o comissionamento de estações de recarga demandam ensaios metrológicos e elétricos específicos, elevando os gastos iniciais. Diouf (2025) complementa que a ausência de padrões unificados no Brasil pode levar à fragmentação tecnológica, ampliando os custos de integração.

Assim, compreende-se que o custo médio por garagem eletrificada depende diretamente da potência instalada, da presença de BESS e da configuração do layout. Haddad, Lazo e Watts (2025) mostram que carregadores de 150 kW podem representar até 40% do custo total da estação, enquanto transformadores e obras civis representam a maior parte dos 60% restantes. Kelly, Flett e Hand (2025) reforçam que sistemas fotovoltaicos e baterias estacionárias reduzem o custo líquido da energia ao longo do tempo. Assim, a relação entre os custos de infraestrutura e o custo total do *retrofit* da frota demonstra que a viabilidade econômica depende de um equilíbrio entre engenharia, planejamento tarifário e gestão operacional.

4.3 Projeção de ganhos operacionais e redução de custos

A análise dos ganhos operacionais decorrentes da conversão elétrica da frota paulistana demanda compreender como a substituição do diesel pela eletricidade altera os parâmetros fundamentais de eficiência, custo por quilômetro e desempenho energético. Diouf (2025) observa que a transição para veículos elétricos reduz substancialmente a dependência de combustíveis fósseis, resultando em economia direta de energia e em maior previsibilidade tarifária, fator crucial para transportadoras que operam sob contratos públicos. Kelly, Flett e Hand (2025) destacam que o custo por quilômetro tende a diminuir progressivamente à

medida que o preço das baterias se reduz e a eficiência energética dos motores elétricos aumenta. Já Haddad, Lazo e Watts (2025) demonstram que o custo operacional das estações de carregamento é sensível ao perfil de uso e ao dimensionamento de potência, condicionando a análise economia da operação.

A redução de custos de manutenção representa outra vantagem econômica central para o *retrofit*. Kim *et al.* (2021) mostram que o custo de manutenção por quilômetro de um ônibus elétrico é inferior ao de um veículo a diesel, dada a ausência de sistemas de combustão, transmissões complexas e lubrificantes. Hendriks e Sturmberg (2024) ressaltam que os sistemas elétricos possuem menos partes móveis e maior confiabilidade, o que diminui a incidência de falhas e amplia o tempo de disponibilidade operacional. Diouf (2025) acrescenta que o aumento da vida útil dos componentes eletrônicos torna o TCO mais favorável ao longo dos anos, reforçando o argumento econômico em prol da conversão.

Kelly, Flett e Hand (2025) afirmam que a redução do ruído e das emissões melhora indicadores de saúde urbana e qualidade ambiental, o que pode gerar externalidades positivas relevantes para a gestão pública. Kim *et al.* (2021) mostram que sistemas de carregamento por oportunidade aumentam a eficiência energética e reduzem a necessidade de baterias de alta capacidade, diminuindo o custo total de ciclo de vida. Haddad, Lazo e Watts (2025) sustentam que essas melhorias operacionais, quando articuladas com planos de carregamento inteligente, baixam picos de demanda e reduzem penalidades tarifárias — o que reforça o potencial econômico da eletrificação.

The TCO results for electric buses show a strong cost decrease until the year 2030, reaching 23.5% lower TCOs compared to the conventional diesel bus. The optimal electric bus charging system will be the opportunity (pantograph) charging infrastructure. In the case of electric buses for the year 2020, the parameter which influenced the most on the TCO was the battery cost (KIM et al., 2021, p. 2).

A avaliação do TCO e da taxa interna de retorno exige que o custo da eletricidade seja analisado segundo diferentes cenários tarifários. Diouf (2025) enfatiza que políticas tarifárias adequadas podem melhorar significativamente a viabilidade econômica das frotas elétricas, reduzindo a exposição a picos tarifários e incentivando carregamento em horários de menor custo. Kelly, Flett e Hand (2025) reforçam que simulações de ciclo de vida devem incluir diferentes perfis de recarga — noturno, misto ou por oportunidade —, visto que cada estratégia altera o custo por quilômetro. Kim *et al.* (2021) demonstram que a queda do preço

das baterias até 2030 reduzirá drasticamente o TCO, reposicionando o elétrico como alternativa dominante em termos financeiros.

A confiabilidade operacional dos ônibus elétricos exerce efeito direto sobre os custos. Hendriks e Sturmberg (2024) observam que a capacidade de prever o consumo energético por rota permite otimizar o número de veículos necessários e evitar redundâncias na frota. Haddad, Lazo e Watts (2025) mostram que o planejamento integrado entre carregamento, uso diário e estabilidade da rede permite minimizar custos com infraestrutura e reduzir o tempo de circulação improdutivo. Diouf (2025) afirma que, em cidades densas, a combinação entre estabilidade operacional e menor consumo energético ao longo da vida útil do veículo representa o principal vetor econômico do *retrofit*.

As planilhas comparativas de custo de ciclo de vida têm papel central no planejamento econômico. Kim *et al.* (2021) apresentam modelagens em que o TCO do ônibus elétrico se torna inferior ao diesel em cenários de médio prazo, sobretudo quando o custo da bateria cai e o custo da eletricidade se mantém estável. Kelly, Flett e Hand (2025) reforçam que análises de sensibilidade devem considerar curvas de depreciação, vida útil das baterias e evolução dos preços da energia. Hendriks e Sturmberg (2024) acrescentam que simulações baseadas em dados reais permitem avaliar com precisão o impacto dos diferentes perfis de operação, ajustando o dimensionamento da frota conforme as necessidades energéticas.

A economia associada ao menor consumo energético emerge como um dos pilares do ganho operacional. Diouf (2025) explica que, mesmo com a atual configuração tarifária, o custo por quilômetro movido a eletricidade permanece inferior ao equivalente a diesel. Kim *et al.* (2021) demonstram empiricamente essa diferença ao comparar cenários em que o TCO elétrico reduz até 23,5% em relação ao convencional. Haddad, Lazo e Watts (2025) sustentam que o uso combinado de carregadores eficientes e BESS reduz não apenas custos energéticos, mas também perdas técnicas, gerando impactos financeiros significativos a longo prazo.

Electricity costs are the main operational expenditures of a depot charging station. The tariff structure usually comprises a fixed charge, an energy rate and demand charges. Demand charges are an additional challenge in some markets when developing fast-charging infrastructure projects, particularly due to high charging capacities (HADDAD; LAZO; WATTS, 2025, p. 10).

A redução do custo de manutenção complementa a economia de energia, criando sinergias positivas. Hendriks e Sturmberg (2024) destacam que a confiabilidade dos motores elétricos reduz o tempo de inatividade dos veículos e diminui a necessidade de frota reserva, fato que impacta diretamente o custo por passageiro transportado. Kim *et al.* (2021) reforçam

que a menor complexidade mecânica e a ausência de combustão diminuem significativamente a frequência de reparos.

Kelly, Flett e Hand (2025) afirmam que a manutenção preditiva baseada em dados pode reduzir ainda mais os custos operacionais ao longo da vida útil do sistema. Diouf (2025) argumenta que o retorno econômico é acelerado quando a política tarifária e o planejamento de carregamento se alinham às necessidades operacionais da frota. Kim *et al.* (2021) estimam que, em cenários europeus e latino-americanos, o tempo de retorno financeiro pode variar entre cinco e oito anos, dependendo do perfil de tarifas e do custo inicial das baterias. Haddad, Lazo e Watts (2025) reforçam que o uso inteligente de carregamento por oportunidade e BESS acelera o retorno do investimento, reduzindo a pressão sobre a rede elétrica. Assim, conclui-se que a redução do custo operacional total, somada à previsibilidade tarifária e ao menor custo de manutenção, confirma a relevância econômica do *retrofit* para São Paulo.

Hendriks e Sturmberg (2024) observam que modelos integrados de otimização permitem reduzir simultaneamente custos energéticos e frota necessária, ampliando a eficiência do transporte público. Kelly, Flett e Hand (2025) reforçam que o elétrico, ao longo de seu ciclo de vida, apresenta custo operacional inferior e maior confiabilidade, consolidando-se como alternativa economicamente vantajosa. Assim, o *retrofit* não apenas reduz custos imediatos, mas estabelece bases para uma operação sustentável, estável e financeiramente racional no longo prazo.

4.4 Modelos de negócio e parcerias operacionais

A estruturação de modelos de negócio voltados ao *retrofit* e à eletrificação da frota paulistana demanda a articulação entre agentes públicos, operadores privados, concessionárias de energia e instituições financeiras, nacionais e internacionais. Andrade *et al.* (2023) ressaltam que a transição energética no setor de transportes requer arranjos institucionais capazes de integrar inovação tecnológica, financiamento estruturado e governança colaborativa. Nessa direção, Luppi e Consoni (2024) observam que a viabilidade econômica da eletrificação está associada ao fortalecimento da indústria nacional, à criação de parcerias estratégicas e à capacidade das operadoras de adaptar seus modelos de negócios às exigências

tecnológicas emergentes. De Souza Lima e Brizon (2019) acrescentam que a mobilização de instrumentos de política pública é indispensável para reduzir riscos financeiros e impulsionar a adesão das empresas ao processo de modernização da frota.

Os modelos empresariais já praticados por grandes grupos paulistanos oferecem repertório útil para compreender possibilidades de estruturação econômica do *retrofit*. A Sambaíba Transportes, conforme discutido por Damas *et al.* (2024), segue um modelo baseado em reinvestimento próprio, adotando uma lógica gradual de substituição e conversão da frota que prioriza previsibilidade financeira e menor exposição a riscos externos. Canitez (2025) destaca que modelos desse tipo tendem a ser mais eficientes quando amparados por incentivos fiscais e por políticas de crédito direcionado, que reduzem a necessidade de endividamento agressivo e fortalecem a capacidade de planejamento de longo prazo.

Esse arranjo, contudo, depende da existência de condições regulatórias estáveis, conforme salientado por Dos Santos *et al.* (2019). O Grupo Ruas adota, segundo Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024), uma estratégia mais alinhada às parcerias público-privadas (PPP), com forte interação entre prefeitura, operadores e fornecedores tecnológicos. Esse modelo enfatiza o compartilhamento de riscos, permitindo que investimentos em infraestrutura elétrica, como carregadores, transformadores e sistemas digitais, sejam divididos entre diferentes atores.

Andrade *et al.* (2023) indicam que PPPs bem estruturadas trazem maior capacidade de alavancagem financeira e ampliam as possibilidades de escalabilidade da eletrificação, especialmente em cidades de grande porte. Para Damas *et al.* (2024), esse modelo encontra maior sucesso quando integrado a sistemas de monitoramento de demanda e planejamento energético ativo. No caso da Santa Brígida, a lógica cooperada permite diluir parte dos custos da transição entre grupos de permissionários, criando um ambiente de corresponsabilidade no processo de eletrificação, sendo destacado por De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) afirmam que arranjos cooperativos podem favorecer a aquisição compartilhada de tecnologia, reduzindo o custo unitário de *retrofit* e fortalecendo o poder de negociação dos operadores diante de fornecedores.

Luppi e Consoni (2024) reforçam que modelos dessa natureza podem estimular o desenvolvimento local e ampliar a resiliência econômica das operadoras, desde que acompanhados de mecanismos de apoio técnico e capacitação profissional. Além dos modelos já consolidados, emergem propostas híbridas que combinam financiamento tradicional com

serviços baseados em assinatura ou arrendamentos. Sadrani *et al.* (2024) apontam que modelos de *leasing* para baterias, nos quais o operador não adquire o componente, mas paga pelo uso, podem reduzir o CAPEX inicial e transformar despesas de investimento em despesas operacionais mais previsíveis.

Diab, Mouli e Bauer (2022) sugerem que o modelo *retrofit as a service*, no qual uma empresa especializada realiza a conversão e mantém a propriedade parcial dos sistemas elétricos, distribui riscos tecnológicos e aumenta a acessibilidade financeira para empresas de menor porte. Essa abordagem tem sido particularmente eficaz em mercados que enfrentam altos custos de importação de baterias. Uma alternativa relevante envolve concessões energéticas e tarifas especiais para operadores de transporte público, e neste âmbito, De Souza Lima e Brizon (2019) argumentam que as concessionárias de energia, como Enel e CPFL, desempenham papel crítico ao oferecer contratos diferenciados, infraestrutura compartilhada e serviços de gestão energética, reduzindo custos operacionais.

Haddad, Lazo e Watts (2025) demonstram que modelos de tarifação inteligente aliados a baterias estacionárias nas garagens mitigam picos de demanda e reduzem significativamente o custo mensal da operação. Andrade *et al.* (2023) reforçam que a coordenação entre concessionárias e municipalidade tende a acelerar a implantação de carregadores e minimizar gargalos da rede. Os financiamentos verdes, especialmente aqueles concedidos por instituições multilaterais, surgem como alavancas centrais para a eletrificação. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) destacam que bancos como BNDES e BID ampliaram linhas específicas para descarbonização do transporte, oferecendo taxas menores e prazos mais longos, o que melhora substancialmente a viabilidade financeira do *retrofit*.

Dos Santos *et al.* (2019) complementam que a aderência ambiental do projeto fortalece o acesso a fundos internacionais, especialmente os voltados para mitigação climática e melhoria da qualidade do ar. Sadrani *et al.* (2024) argumentam que o uso combinado de financiamentos verdes e PPPs cria um ecossistema favorável à inovação. Diab, Mouli e Bauer (2022) observam que parcerias tecnológicas podem reduzir o custo de engenharia da conversão e acelerar a curva de aprendizagem industrial. Andrade *et al.* (2023) enfatizam que a inovação aberta, baseada na cooperação com universidades e centros de pesquisa, contribui para o desenvolvimento de soluções de baixo custo e alta eficiência, ajustadas às particularidades brasileiras. Esse modelo colaborativo fortalece a autonomia tecnológica nacional, reduzindo dependências externas e ampliando o impacto econômico local.

O papel da Prefeitura de São Paulo também é decisivo. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) destacam que políticas municipais de descarbonização da frota — como metas de eletrificação e incentivos à infraestrutura — moldam decisões empresariais e orientam investimentos. Luppi e Consoni (2024) reforçam que a atuação estatal como indutora tecnológica acelera a adoção do *retrofit*, especialmente quando acompanhada de atualização regulatória e apoio à formação profissional. Dos Santos *et al.* (2019) acrescentam que a segurança jurídica é pilar fundamental para que operadores e investidores assumam compromissos de longo prazo.

Dado o exposto, a síntese dos modelos de negócio evidencia que nenhum arranjo isolado é capaz de viabilizar, por si só, a eletrificação completa da frota paulistana. Andrade *et al.* (2023) demonstram que a transição depende da combinação entre financiamento híbrido, inovação institucional e parcerias público-privadas. Canitez (2025) reforça que o desenho dos modelos deve ser flexível para adaptar-se aos diferentes perfis das garagens e operadores. Assim, compreende-se que o *retrofit* emerge como oportunidade estratégica para reorganizar o sistema de transporte, fortalecer a indústria nacional e consolidar São Paulo como referência em mobilidade elétrica sustentável.

4.5 Considerações sobre a viabilidade econômica

A avaliação da viabilidade econômica do *retrofit* exige uma leitura crítica dos modelos aplicados e das variáveis sensíveis que determinam o custo total ao longo da vida útil dos ônibus convertidos. Coimbra *et al.* (2025) demonstram que a economia operacional dos veículos elétricos depende fortemente do comportamento tarifário da energia e da disponibilidade de políticas de incentivo capazes de reduzir o peso do CAPEX inicial. De Oliveira *et al.* (2020) observam que a volatilidade da taxa de câmbio exerce impacto direto no preço das baterias e componentes importados, refletindo-se tanto no custo final do *retrofit* quanto no TCO em horizontes de longo prazo. Pérez-Prada *et al.* (2019), ao analisarem múltiplos cenários de custo de energia, sugerem que modelos financeiros robustos precisam incorporar incertezas tarifárias e mecanismos de proteção contra aumentos abruptos nos preços.

A comparação entre *retrofit* e aquisição de novos ônibus elétricos revela nuances importantes na composição dos custos. Borne *et al.* (2025) mostram que, apesar do menor custo operacional dos veículos elétricos, a aquisição de modelos novos tende a apresentar CAPEX quase sempre superior ao valor estimado para a conversão de veículos já existentes. De Abreu *et al.* (2023) enfatizam que, em contextos financeiros restritivos, como os enfrentados por grande parte das operadoras brasileiras, o *retrofit* pode oferecer um equilíbrio mais favorável entre investimento inicial, economia operacional e prazo de amortização.

Romeral e Zancul (2025) reforçam que a modernização incremental da frota, quando combinada com modelos de parceria e inovação, tende a reduzir riscos e ampliar a sustentabilidade financeira da transição energética, e Coimbra *et al.* (2025) destacam que, mesmo com economias superiores a 80% em energia quando combinadas com fontes renováveis, a viabilidade de curto prazo ainda pode ser comprometida pela necessidade de investimento maciço em infraestrutura. De Oliveira *et al.* (2020) mostram que incertezas associadas ao preço da eletricidade e à vida útil das baterias tornam indispensável a formulação de estratégias de mitigação, como contratos de energia no mercado livre e o uso de bancos de baterias estacionários. Pérez-Prada *et al.* (2019) sugerem que análises de sensibilidade são essenciais para capturar variações de mercado que afetam profundamente o TCO.

The results revealed that, despite up to 24% lower maintenance costs and up to 88.9% electricity savings when using solar energy, the high initial cost of electric buses and charging infrastructure compromises their economic feasibility in the short term. [...] the importance of government subsidies, tax incentives, and alternative financing models to enable fleet electrification (Coimbra et al., 2025, p. 3).

Os benefícios macroeconômicos de uma estratégia de *retrofit* bem estruturada aparecem de forma recorrente na literatura. De Abreu *et al.* (2023) argumentam que planos de eletro mobilidade estimulam cadeias produtivas inteiras, desde laboratórios e centros de pesquisa até empresas de engenharia e serviços especializados, criando oportunidades de emprego qualificado e ampliando a capacidade tecnológica nacional. Romeral e Zancul (2025) destacam que a inserção de tecnologias limpas no transporte coletivo favorece a inovação industrial e reduz custos ambientais sistêmicos, contribuindo para a transição verde. Coimbra *et al.* (2025) reforçam que esses efeitos indiretos agregam valor ao projeto, ampliando sua racionalidade econômica.

A economia operacional obtida após o *retrofit* é um dos componentes mais relevantes para o balanço financeiro final, sendo apontado por De Oliveira *et al.* (2020) que a redução drástica do consumo de diesel e a eliminação de grande parte da manutenção mecânica constituem elementos centrais da economia acumulada ao longo da vida útil do veículo. Borne *et al.* (2025) confirmam que, após o período inicial de investimento, os fluxos de caixa tendem a se tornar mais favoráveis no cenário elétrico, resultado da maior eficiência energética. De acordo com Pérez-Prada *et al.* (2019) esse comportamento operacional permite reduzir a dependência de subsídios contínuos, desde que os custos iniciais estejam adequadamente financiados e amortizados.

By conducting a comprehensive economic analysis, policy makers and stakeholders will be able to gain insight into the financial implications and potential challenges associated with the widespread implementation of APOEM stages. This assessment would facilitate informed decision making, considering both environmental and economic factors, in order to determine the viability and long-term sustainability of incorporating APOEM into existing systems

(De Abreu *et al.*, 2023, p. 20).

Apesar dos benefícios, os riscos e limitações não devem ser subestimados. Coimbra *et al.* (2025) observam que o alto custo de aquisição de baterias pode comprometer a previsão de retorno, especialmente caso haja desvalorização cambial acentuada. Pérez-Prada *et al.* (2019) reforçam que a curva de aprendizado no uso de tecnologias elétricas implica riscos operacionais e necessidade permanente de capacitação técnica. De Oliveira *et al.* (2020) afirmam que incertezas regulatórias e variações abruptas no custo da eletricidade podem afetar profundamente a viabilidade de projetos de eletrificação, tornando indispensável o desenvolvimento de políticas energéticas estáveis e previsíveis.

A análise de cenários otimista, realista e conservador permite sintetizar as múltiplas condições que moldam a viabilidade econômica. Romeral e Zancul (2025) indicam que, sob cenários otimistas, com queda do preço das baterias, estabilidade tarifária e incentivos fiscais, o *retrofit* pode apresentar retorno acelerado e forte impacto positivo na descarbonização da frota. No cenário realista, Coimbra *et al.* (2025) afirmam que a viabilidade depende de modelos financeiros híbridos, alinhados a políticas públicas que reduzam riscos e ampliem o acesso ao crédito. Já no cenário conservador, De Abreu *et al.* (2023) alertam que a ausência de incentivos, combinada à elevação de custos energéticos, compromete sensivelmente a sustentabilidade econômica da transição.

A trajetória de eletrificação da frota paulistana, portanto, está fortemente condicionada à convergência entre política pública, estabilidade regulatória, capacidade industrial e inovação financeira. Borne *et al.* (2025) demonstram que, mesmo com os desafios iniciais, a eletrificação se mostra economicamente mais vantajosa ao longo do ciclo de vida quando comparada ao diesel, desde que acompanhada de planejamento adequado. De Oliveira *et al.* (2020) reafirmam que o *retrofit*, ao prolongar a vida útil de ativos já existentes e reduzir drasticamente o OPEX, oferece uma alternativa estratégica para cidades com restrições fiscais. Assim, a síntese da análise mostra que, embora dependente de variáveis críticas, a viabilidade econômico-financeira do *retrofit* permanece sólida em cenários bem planejados, consolidando-se como instrumento eficaz de transição energética para São Paulo.

4.6 Potencial de aplicação em São Paulo

A avaliação integrada dos custos, ganhos operacionais e prazos de retorno apresentados nos subcapítulos anteriores permite delinear um panorama abrangente da viabilidade do *retrofit* elétrico para a cidade de São Paulo. Damas *et al.* (2024) sustentam que a combinação entre redução de custos energéticos, menor necessidade de manutenção e maior confiabilidade técnica estabelece uma base econômica consistente para a conversão em larga escala. Luppi e Consoni (2024), ao analisarem a infraestrutura industrial e tecnológica necessária à eletrificação, reforçam que a cidade reúne condições únicas para articular produção local, inovação e políticas públicas, reduzindo riscos e fortalecendo o impacto econômico do *retrofit*.

Em paralelo, De Souza Lima e Brizon (2019) apontam que a articulação entre planejamento técnico, regulação ambiental e mecanismos de financiamento constitui elemento essencial para alinhar custos e benefícios ao longo do ciclo de vida dos veículos, e o escalonamento da conversão em diferentes lotes de frota é destacado por Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) como estratégia que torna possível a adoção gradual do *retrofit* sem comprometer a operação do sistema. Segundo os autores, dividir o processo em etapas permite ajustar a infraestrutura de recarga, distribuir investimentos no tempo e gerar economias progressivas à medida que a curva de aprendizagem tecnológica se consolida.

Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) acrescentam que a priorização de garagens com maior densidade operacional e rotas com características técnicas adequadas à eletrificação favorece o retorno financeiro inicial, criando condições para expansão posterior, sendo reforçado por Damas *et al.* (2024) que o escalonamento possibilita testar tecnologias, ajustar parâmetros energéticos e mitigar riscos associados a grandes conversões simultâneas. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) destacam que políticas de longo prazo, associadas a instrumentos econômicos e regulatórios claros, criam segurança jurídica capaz de atrair investimentos privados e ampliar a capacidade de inovação.

Dentro de um enfoque estritamente jurídico-ambiental, Dos Santos *et al.* (2019) argumentam que o Estado deve responsabilizar-se pela criação de marcos regulatórios coerentes com o Estado de Direito Ambiental, assegurando que a transição urbana para sistemas elétricos seja socialmente justa, tecnicamente sólida e economicamente equilibrada. Luppi e Consoni (2024) complementam que incentivos fiscais e políticas de crédito direcionado podem acelerar a nacionalização de componentes e favorecer a formação de cadeias produtivas locais.

O alinhamento do *retrofit* às metas de descarbonização e neutralidade climática definidas pela Lei nº 17.802/2022 é outro fator que reforça seu potencial de implementação. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) explicam que as metas municipais de redução de emissões, especialmente as relacionadas a material particulado e gases de efeito estufa, só poderão ser atingidas mediante a conversão acelerada da frota para tecnologias limpas, sendo ressaltado por Dos Santos *et al.* (2019) que o cumprimento dessas metas exige governança intersetorial, integrando transporte, energia, meio ambiente e planejamento urbano. Em seu artigo, Damas *et al.* (2024) argumentam que o *retrofit* contribui diretamente para os compromissos climáticos, ao reduzir emissões sem exigir a substituição completa da frota, tornando a transição mais rápida e financeiramente acessível.

A perspectiva de replicabilidade para outras cidades brasileiras também reforça o potencial de aplicação em São Paulo. De Souza Lima e Brizon (2019) afirmam que a capital paulista funciona como laboratório nacional, cujas soluções podem ser adaptadas para realidades distintas, de municípios médios a grandes regiões metropolitanas. Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) mencionam que modelos de otimização energética e de planejamento de recarga desenvolvidos para São Paulo possuem alto grau de transferibilidade e podem servir como base para políticas nacionais de eletro mobilidade. Luppi e Consoni (2024)

destacam que a estrutura industrial e acadêmica paulista oferece condições privilegiadas para gerar conhecimento, formar profissionais e disseminar boas práticas.

O impacto econômico regional associado ao *retrofit* também se destaca como elemento de viabilidade, sendo evidenciado por Damas *et al.* (2024) que a criação de cadeias produtivas para motores, baterias e sistemas eletrônicos pode gerar empregos diretos e indiretos, aumentando a competitividade industrial do estado. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) ressaltam que a economia verde vinculada à eletro mobilidade promove inovação, atrai investimentos internacionais e amplia a capacidade de desenvolvimento tecnológico local. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) argumentam que esses efeitos multiplicadores justificam políticas públicas de incentivo e apoio contínuo.

Do ponto de vista operacional, o *retrofit* oferece ganhos significativos para o sistema de transporte coletivo paulistano, considerando que a maior confiabilidade dos sistemas elétricos reduz a necessidade de veículos reserva e aumenta a disponibilidade operacional da frota (Rodrigues; Dos Reis; Machado, 2024). Damas *et al.* (2024) reforçam que a redução de ruído e vibração melhora a qualidade do serviço prestado, impactando positivamente a percepção dos usuários, e em seu artigo, Luppi e Consoni (2024) destacam que a integração de dados operacionais e sistemas de monitoramento energético pode otimizar rotas, reduzir custos e aumentar a eficiência geral do sistema.

Cabe destacar também que os riscos associados ao *retrofit*, ainda que relevantes, podem ser mitigados mediante estratégias institucionais adequadas. Dos Santos *et al.* (2019) enfatizam que incertezas regulatórias e riscos tecnológicos devem ser abordados com planejamento normativo, participação social e decisões transparentes, e De Souza Lima e Brizon (2019) argumentam que a curva de aprendizagem e a falta inicial de capacitação podem elevar custos, mas argumentam que programas de treinamento e parcerias acadêmicas são capazes de reduzir essas fragilidades. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) acrescentam que a previsibilidade tarifária e a estabilidade nos contratos de energia são essenciais para garantir sustentabilidade financeira.

No conjunto, os resultados apontam que o *retrofit* apresenta uma relação custo-benefício altamente competitiva para São Paulo quando comparado à compra de novos veículos elétricos. Luppi e Consoni (2024) argumentam que a estratégia se torna ainda mais vantajosa quando associada à nacionalização gradual de componentes e ao desenvolvimento de soluções locais de infraestrutura, e Damas *et al.* (2024) reforçam que o custo médio de

retrofit permanece substancialmente inferior ao de aquisição de ônibus novos, e que os ganhos operacionais acumulados compensam o investimento inicial em prazos compatíveis com os ciclos de concessão. No mais, Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) reiteram que a eficiência energética e a confiabilidade das tecnologias elétricas consolidam o *retrofit* como solução sustentável e escalável.

Em conclusão, os dados apresentados sugerem que o *retrofit* elétrico é economicamente viável para São Paulo, desde que inserido em um modelo de governança colaborativa que integre inovação tecnológica, sustentabilidade energética e planejamento multissetorial. Damas *et al.* (2024) evidenciam que a transição requer coordenação entre poder público, operadoras e concessionárias de energia, enquanto Dos Santos *et al.* (2019) ressaltam que essa colaboração deve estar ancorada em princípios de justiça ambiental e responsabilidade institucional. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) reforçam que o alinhamento entre metas climáticas, políticas de incentivo e capacidade industrial consolida a cidade como polo estratégico da eletro mobilidade brasileira. Dessa forma, o *retrofit* surge não apenas como solução viável, mas como caminho estratégico para uma transição energética eficiente, escalável e socialmente justa em São Paulo.

CAPÍTULO 5 – EFEITOS SISTÊMICOS E ADJACENTES DO *RETROFITTING* E DA ELETRIFICAÇÃO DA FROTA PAULISTANA

5.1 Introdução: a transição elétrica como fenômeno urbano e civilizacional

A transição elétrica do transporte público paulistano constitui mais que uma simples substituição de tecnologias: trata-se de um fenômeno urbano e civilizacional que reorganiza circuitos produtivos, sentidos sociais e regimes energéticos. Bastos, Andrade e Consoni (2025) destacam que a eletrificação das frotas não pode ser interpretada somente como resultado de avanços técnicos, mas como fruto de rearranjos institucionais e político-sociais que reconfiguram prioridades metropolitanas sob o marco da descarbonização. Icaza *et al.* (2024) reforçam que a eletrificação se insere em processos mais amplos de regeneração urbana, nos quais políticas climáticas, inovação tecnológica e governança territorial convergem para redefinir a infraestrutura da vida cotidiana. Romero-Lankao *et al.* (2021) afirmam que tais mudanças são multiescalares, afetando desde comportamentos individuais até políticas globais de mitigação climática.

A trajetória histórica da eletrificação revela disputas entre modelos de desenvolvimento, interesses econômicos e narrativas de modernização. Consoni *et al.* (2025) mostram que a resistência inicial a ônibus elétricos na América Latina esteve associada à dependência histórica de tecnologias a diesel e à dificuldade de articulação entre políticas nacionais e prioridades locais. Salgado-Conrado *et al.* (2024) destacam que, ao mesmo tempo, a introdução de tecnologias limpas redefine expectativas de conforto, inovação e justiça ambiental. A escolha paulistana pelo *retrofit* de ônibus desativados, nesse contexto, torna-se expressão de uma modernização que busca romper com padrões extrativistas, ao privilegiar circularidade material e reuso produtivo.

As diretrizes do PlanClimaSP e a meta de neutralidade climática até 2050 conferem enquadramento normativo para compreender a transição elétrica como estratégia estruturante de mitigação. Bastos, Andrade e Consoni (2025) afirmam que a troca de combustíveis fósseis por eletricidade impacta diretamente os setores difusos de emissões — especialmente o transporte público. Icaza *et al.* (2024) enfatizam que, ao eletrificar garagens e corredores, São Paulo reduz poluentes locais e melhora indicadores de saúde urbana, aproximando-se dos compromissos climáticos internacionais e dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

(ODS 7, 9, 11 e 13). Romero-Lankao *et al.* (2021) lembram que tais ações só alcançam escala quando incorporam planejamento integrado e participação social.

The demand for electrifying public transportation through adopting Battery-Electric Buses (BEBs) has expanded as an alternative for decarbonizing the transportation sector, given their potential to mitigate the impacts of climate change. [...] BEBs are positioned as a strategic technology for advancing the energy transition towards zero-emission vehicles, enhancing public health and offering notable social benefits (CONSONI et al., 2025, p. 2).

O *retrofit* elétrico de ônibus desativados expande esse horizonte, apresentando-se como alternativa que combina eficiência energética, redução de emissões e racionalidade econômica. Consoni *et al.* (2025) argumentam que políticas coordenadas podem reduzir barreiras de custo e viabilizar trajetórias tecnológicas mais inclusivas. Salgado-Conrado *et al.* (2024) apontam que a reconfiguração do transporte elétrico gera externalidades urbanas positivas, como redução de ruído, melhoria da qualidade do ar e maior conforto operacional. Icaza *et al.* (2024) observam que tais efeitos ampliam o valor simbólico da eletrificação e reforçam o papel das cidades como centros de inovação socioambiental.

A dimensão civilizacional da transição também envolve a constituição de novas capacidades institucionais. Bastos, Andrade e Consoni (2025) enfatizam que a governança multinível — envolvendo município, concessionárias e operadores — é pré-requisito para integrar energia, mobilidade e planejamento urbano. Romero-Lankao *et al.* (2021) ressaltam que a eletrificação transforma tanto os fluxos materiais quanto os sistemas de significação, promovendo aprendizagens tecnológicas e laços institucionais que orientam futuras trajetórias de inovação. Icaza *et al.* (2024) complementam que essas transformações são cumulativas e dependem de estabilidade regulatória e continuidade política.

We find that actions in these area are driving change; they are adopted by wealthier populations and on an experimental basis by specific communities. Their larger-scale growth is constrained by institutional, behavioral, and infrastructural factors. [...] Only then can urban electrification be understood as the empirically rich and socially complex topic that it is, and only with this understanding will innovations and smart policy actions be able to tap into the transformational potential of urban electrification (ROMERO-LANKAO et al., 2021, p. 2).

O enquadramento da eletrificação nos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável reforça seu caráter transversal. Icaza *et al.* (2024) destacam que o ODS 7 (energia limpa), o ODS 11 (cidades sustentáveis) e o ODS 13 (ação climática) convergem no transporte público

elétrico como política de alto retorno social. Salgado-Conrado *et al.* (2024) sublinham que a aliança entre inovação técnica e justiça ambiental é essencial para que cidades latino-americanas superem desigualdades históricas na mobilidade. Bastos, Andrade e Consoni (2025) argumentam que tais transformações fortalecem a autonomia produtiva e abrem caminhos para uma economia verde.

Portanto, a transição elétrica deve ser compreendida como processo ecológico, produtivo e simbólico que redefine horizontes metropolitanos. Consoni *et al.* (2025) sugerem que novas formas de coordenação entre atores públicos e privados são imprescindíveis para criar ambientes estáveis de investimento. Icaza *et al.* (2024) notam que a descentralização energética e a digitalização dos sistemas de transporte criam oportunidades para inovação distribuída e fortalecimento do ecossistema industrial local. Salgado-Conrado *et al.* (2024) reforçam que tais transformações só se consolidam quando acompanhadas de políticas de inclusão e mitigação de desigualdades.

Em suma, deve ser destacado que o *retrofit* elétrico de ônibus desativados assume posição estratégica dentro do projeto de transição energética da capital paulista, sendo evidenciado por Bastos, Andrade e Consoni (2025) que São Paulo possui massa crítica institucional e produtiva para liderar esse processo, transformando a frota existente em instrumento de inovação e descarbonização. Romero-Lankao *et al.* (2021) indicam que a eletrificação urbana, quando articulada à justiça socioambiental e à governança multiescalar, pode reestruturar cidades inteiras. Assim, a transição elétrica deve ser vista não apenas como solução técnica, mas como reorganização civilizacional orientada pela sustentabilidade, pela equidade e pela inovação.

5.2 Impactos ambientais e ganhos ecológicos da eletrificação

A substituição dos motores a diesel por sistemas elétricos remodela profundamente o perfil ambiental do transporte público urbano, sobretudo quando se adota uma perspectiva de ciclo de vida. Du e Kommalapati (2021) demonstram que o maior benefício ambiental dos sistemas elétricos reside na drástica redução de gases de efeito estufa durante a fase de uso, etapa responsável pela maior parcela das emissões em veículos convencionais. Kraemer *et al.* (2023) confirmam esse diagnóstico ao mostrar que, em sistemas urbanos densos, a troca de

matrizes veiculares impacta diretamente a qualidade do ar, reduzindo concentrações locais de NO_x e material particulado fino. Ribeiro, Dias e Mendes (2024) reforçam que tais ganhos se tornam ainda mais significativos quando a eletricidade utilizada é proveniente de fontes renováveis, ampliando benefícios climáticos e energéticos.

Além da redução dos gases de efeito estufa, um dos principais ganhos ecológicos do *retrofit* elétrico é a melhoria da qualidade do ar urbano. Lim *et al.* (2021) sustentam que veículos elétricos eliminam emissões diretas de escapamento, reduzindo drasticamente poluentes associados a problemas respiratórios e cardiovasculares. Masłowski, Kulińska e Krzewicki (2023) acrescentam que a diminuição de ruído causada pela operação silenciosa dos motores elétricos atenua impactos sonoros sobre comunidades de alta densidade populacional, contribuindo para ambientes urbanos mais saudáveis.

Kraemer *et al.* (2023) afirmam que esse conjunto de benefícios tem efeitos cumulativos, sobretudo em regiões metropolitanas cuja exposição prolongada à poluição veicular se relaciona a vulnerabilidades socioambientais. No âmbito da análise de ciclo de vida, a comparação entre ônibus elétricos novos e ônibus retrofitados exige cautela metodológica. Xylia *et al.* (2019) demonstram que o impacto ambiental total depende não apenas da energia consumida durante a operação, mas também das emissões associadas à produção e ao descarte das baterias, que podem representar parcela significativa das emissões “embutidas”.

Ribeiro, Dias e Mendes (2024) destacam que, quando o *retrofit* reaproveita chassis e componentes estruturais, o impacto de fabricação se reduz substancialmente, tornando essa alternativa ambientalmente mais eficiente em cidades com frotas extensas. Du e Kommalapati (2021) observam que o uso de eletricidade renovável potencializa os ganhos ambientais, reduzindo ainda mais a pegada de carbono ao longo do ciclo de vida.

In 2020, only 0.9% of buses running in European Union countries were electric, with 93.5% still being diesel-powered. [...] The electrification of road transport, combined with a modal shift towards public transport, is crucial to achieving the decarbonization of the transport sector. Battery electric buses are an important asset for cities to decarbonize the transport sector and are more cost-effective than diesel buses. On the other hand, some attention needs to be given to the generation of energy that will feed the charging of batteries because the use of fossil fuel energy sources can jeopardize the environmental benefits of BEBs (RIBEIRO; DIAS; MENDES, 2024, p. 1).

Outro aspecto relevante refere-se à redução de ruído urbano, efeito frequentemente subestimado na avaliação das políticas de eletrificação. Masłowski, Kulińska e Krzewicki (2023) mostram que o ambiente sonoro das cidades é profundamente modificado com a introdução de ônibus elétricos, cujos sistemas de propulsão produzem níveis significativamente menores de vibração e ruído. Esses autores destacam que, embora tais impactos não apareçam nas métricas tradicionais de emissões, representam benefícios ecossistêmicos e sociais essenciais para o bem-estar urbano. Lim *et al.* (2021) complementam observando que a diminuição de ruído contribui para reduzir estresse ambiental, impactando positivamente indicadores de saúde pública.

A questão da pegada de carbono dos diferentes sistemas de tração permanece central nas análises. Kraemer *et al.* (2023) indicam que o *retrofit* apresenta vantagem significativa ao evitar emissões associadas à produção de novos chassis e sistemas mecânicos, pois prolonga o ciclo de vida de equipamentos ainda funcionalmente utilizáveis. Du e Kommalapati (2021) sugerem que essa abordagem reduz emissões de “pré-uso”, tornando o *retrofit* mais eficiente em cenários com limitações industriais ou restrições de carbono. Ribeiro, Dias e Mendes (2024) afirmam que, quando o fornecimento de energia elétrica é majoritariamente renovável, a operação elétrica reduz em até 90% as emissões operacionais, aproximando o Brasil de trajetórias de baixo carbono.

Electrification can help to reduce local air pollution caused by buses in the inner city, such as NOx and PM. [...] However, the analysis indicates that the overall impact of such reduction would be small compared to the local pollution caused by private transport. Thus, electrification of bus fleets should be implemented in combination with strategies for increased use of public transport, in order to maximize road transport emission reduction in urban environments (XYLIA et al., 2019, p. 85).

A preocupação ambiental não se limita às fases de produção e uso; o descarte e a reciclagem das baterias desempenham papel crucial na avaliação ecológica do *retrofit*. Lim *et al.* (2021) afirmam que tecnologias de reciclagem em expansão — especialmente as voltadas à recuperação de lítio, níquel e cobalto — podem reduzir significativamente o impacto ambiental do fim de vida das baterias. Masłowski, Kulińska e Krzewicki (2023) reforçam que a adoção de políticas de recuperação de materiais críticos é essencial para evitar externalidades negativas e para fechar ciclos produtivos. Xylia *et al.* (2019) enfatizam ainda que a densidade energética das baterias influencia diretamente sua pegada de carbono, o que

implica que melhorias tecnológicas futuras tenderão a reduzir o impacto ambiental dos sistemas elétricos.

A inserção da eletrificação nas políticas municipais paulistanas de mitigação de poluentes atmosféricos faz com que os ganhos ambientais ultrapassem o âmbito operacional dos ônibus. Kraemer *et al.* (2023) destacam que a redução de emissões de NO_x e MP_{2,5} tem efeitos diretos sobre indicadores de saúde pública, especialmente em áreas altamente vulneráveis. Ribeiro, Dias e Mendes (2024) afirmam que o transporte público eletrificado se torna componente central de estratégias de redesenho urbano associadas ao enfrentamento da emergência climática.

Du e Kommalapati (2021) reforçam que tais políticas devem ser acompanhadas de planejamento energético robusto para assegurar que o uso de eletricidade corresponda a modos sustentáveis de produção. Por sua vez, o *retrofit* elétrico de ônibus desativados apresenta vantagens ecológicas específicas em cidades com grande estoque de veículos ainda mecanicamente funcionais, sendo indicado por Masłowski, Kulińska e Krzewicki (2023) que a extensão da vida útil de chassi e componentes reduz o consumo de energia e materiais associados à produção de veículos novos.

Xylia *et al.* (2019) afirmam que políticas de transição baseadas em *retrofit* tendem a reduzir emissões de ciclo de vida em cenários urbanos complexos, sobretudo quando combinadas com estratégias de modais sustentáveis. Kraemer *et al.* (2023) reforçam que essa abordagem, integrada a políticas climáticas municipais, representa caminho rápido e eficaz para redução de emissões. Lim *et al.* (2021) e Ribeiro, Dias e Mendes (2024) convergem ao reconhecer que os benefícios diretos, envolvendo redução de emissões e poluentes, e os indiretos, acerca de melhoria de saúde pública, redução de ruído e menor pressão sobre recursos naturais, articulam-se como base para políticas urbanas de sustentabilidade.

Du e Kommalapati (2021) afirmam que, para São Paulo, tais ganhos tornam a eletrificação um instrumento fundamental para cumprir metas climáticas, ao passo que Xylia *et al.* (2019) reforçam que avanços na densidade energética e reciclagem de baterias tendem a ampliar esses benefícios no futuro. Assim, o *retrofit* elétrico se consolida como solução ecologicamente vantajosa, alinhada às exigências de mitigação climática e de justiça ambiental no contexto metropolitano.

5.3 Repercussões econômicas: reindustrialização e geração de empregos verdes

Da Rocha *et al.* (2022) sustentam que a reorganização produtiva decorrente da transição energética abre espaço para um redesenho industrial calcado em tecnologias de menor intensidade carbônica, ativando setores que historicamente permaneceram à margem das dinâmicas centrais de inovação. De Araújo e Andrade (2025) convergem nesse diagnóstico ao indicar que políticas de transição verde, quando articuladas a instrumentos de fomento estatal, podem recompor cadeias locais por meio de novos arranjos produtivos ligados à economia circular. Assim, o *retrofit* de ônibus desativados em São Paulo opera como vetor de reindustrialização na medida em que ativa competências em mecânica fina, eletrificação, integração eletrônica e manufatura avançada.

Fernandez Zambrano (2024) reforça que a eletro mobilidade, especialmente em atividades industriais intensivas em conhecimento, tende a irradiar efeitos positivos sobre o conjunto do tecido produtivo. Gulati *et al.* (2020), ao analisar a dinâmica dos investimentos urbanos sustentáveis, observam que setores verdes possuem maior capacidade de multiplicação econômica quando comparados a setores intensivos em carbono, provocando externalidades positivas tanto na formalização quanto na especialização do trabalho. Em seu artigo, Jaeger *et al.* (2021) argumentam que investimentos em infraestrutura limpa, incluindo sistemas de recarga, *retrofit*, reciclagem e logística elétrica, geram cadeias de valor mais longas e intensivas em trabalho.

Nessa mesma direção, Masuhara e Geremias (2025) enfatizam que a transição energética justa depende da criação de postos de trabalho qualificados capazes de sustentar, em longo prazo, a reconversão produtiva das regiões industrializadas. No interior dessa reestruturação, a economia circular se torna eixo articulador da industrialização verde. A reutilização de chassis e componentes de ônibus desativados, tema explorado por Da Rocha *et al.* (2022), confere racionalidade sistêmica ao processo, reduzindo dependência de importações e mobilizando capacidades industriais locais.

De Araújo e Andrade (2025) observam que a reindustrialização sustentável demanda justamente esta abordagem circular, em que ressignificação de resíduos industriais se converte em novos nichos de mercado. Neste sentido, Fernandez Zambrano (2024) demonstram que

inovações de recomposição material reduzem custos, tornam cadeias mais resilientes e impulsionam competências técnico-produtivas nacionais.

Green investments have repeatedly demonstrated their superior capacity to generate employment when compared to carbon-intensive activities, not only in the immediate phases of construction and implementation but also across extended value chains. By lowering operational costs, improving long-term productivity and stimulating local innovation ecosystems, sustainable infrastructure helps anchor new industrial clusters, expand formal employment opportunities and enhance resilience against economic shocks (JAEGER et al., 2021, p.3).

A geração de empregos diretos e indiretos no setor de *retrofit* é particularmente relevante em São Paulo. Gulati *et al.* (2020) mostram que investimentos verdes urbanos possuem elevado potencial de absorção de trabalhadores de diferentes níveis de qualificação, o que coincide com as demandas de oficinas, fabricantes de peças, integradores de sistemas e especialistas em baterias. Jaeger *et al.* (2021) destacam que empregos verdes têm maior potencial de inclusão social quando acompanhados de políticas de qualificação e certificação. Masuhara e Geremias (2025), ao analisar experiências internacionais, afirmam que transições energéticas bem-sucedidas dependem da criação de trajetórias profissionais estáveis, capazes de mitigar assimetrias regionais e promover coesão econômica.

Acerca do conceito de “*retrofit as a service*”, modalidade emergente de prestação de serviços que reposiciona empresas como fornecedoras de soluções contínuas de eletrificação, manutenção e monitoramento, Fernandez Zambrano (2024) destaca que modelos econômicos baseados em serviços recorrentes tendem a gerar cadeias de suprimentos mais sofisticadas, aumentando a densidade tecnológica local. Gulati *et al.* (2020) reforçam que economias urbanas que adotam modelos circulares e de serviços apresentam crescimento mais robusto e menos volátil, ampliando a base de empregos qualificados.

Nesse contexto, o *retrofit* paulistano pode inaugurar um mercado estável de serviços associados ao ciclo completo de vida de veículos elétricos, e a criação de clusters tecnológicos paulistas dedicados à mobilidade elétrica pode emergir como desdobramento natural dos investimentos em *retrofit*. De Araújo e Andrade (2025) assinalam que a mobilização territorial de competências promove adensamento produtivo e reduz vazios tecnológicos, e Jaeger *et al.* (2021) acrescentam que a formação de clusters verdes com foco em pesquisa aplicada tende a ampliar a capacidade inovadora das regiões. Já Da Rocha *et al.* (2022) recordam que políticas públicas bem calibradas podem acelerar a formação de ecossistemas capazes de competir internacionalmente em nichos de eletro mobilidade e eletrificação pesada.

Os efeitos multiplicadores no PIB regional são igualmente significativos. Gulati *et al.* (2020) demonstram que investimentos urbanos sustentáveis possuem multiplicadores superiores a dois, ativando setores correlatos como TI, *softwares* industriais, logística inteligente e reciclagem avançada. Fernandez Zambrano (2024) corrobora ao defender que cadeias produtivas vinculadas à eletro mobilidade tendem a atrair investimentos privados, consolidando novos polos industriais. Masuhara e Geremias (2025) reforçam que a diversificação econômica decorrente da transição energética amplia a segurança econômica das regiões, reduzindo vulnerabilidades setoriais.

Urban green investment strategies not only catalyze immediate economic recovery but establish the foundations for long-term structural transformation. By directing resources toward clean mobility, circular manufacturing and sustainable infrastructure, governments stimulate local supply chains, enhance technological capabilities, and generate millions of new jobs that advance both social inclusion and environmental resilience (GULATI et al., 2020, p. 6).

No plano macroeconômico, Jaeger *et al.* (2021) argumentam que a economia verde tende a promover ganhos de produtividade sistêmica, uma vez que reduz custos operacionais e amplia a eficiência energética, sendo destacado por De Araújo e Andrade (2025) que políticas de estímulo à inovação são fundamentais para evitar que cadeias de *retrofit* se tornem dependentes de importações tecnológicas e percam competitividade. Da Rocha *et al.* (2022) sugerem que a estruturação de incentivos fiscais e linhas de crédito verdes pode consolidar o *retrofit* como vetor contínuo de expansão produtiva.

Acerca da dimensão territorial, Masuhara e Geremias (2025) demonstram que transições energéticas só promovem emprego de qualidade quando articuladas a estratégias urbanas e regionais que integrem infraestrutura, políticas sociais e governança democrática, e Fernandez Zambrano (2024) acrescenta que cadeias industriais verdes demandam arranjos colaborativos entre governo, empresas e instituições científicas. Jaeger *et al.* (2021) enfatizam que a combinação entre descarbonização e desenvolvimento urbano torna cidades verdadeiros laboratórios tecnológicos de inovação e inclusão.

Gulati *et al.* (2020) reforçam que escolhas verdes maximizam impactos multiplicadores e reduzem desigualdades, sendo observado por De Araújo e Andrade (2025) que o *retrofit* paulista pode consolidar um novo paradigma de reindustrialização verde, convergindo sustentabilidade e dinamismo econômico. Assim, em linha com Da Rocha *et al.* (2022), argumenta-se que o *retrofit* elétrico pode atuar como motor estruturante da

reindustrialização paulista, recompondo o emprego técnico-urbano e posicionando São Paulo como referência latino-americana em inovação industrial verde.

5.4 São Paulo como polo de liderança e inovação em mobilidade elétrica

A longa trajetória de São Paulo em matéria de modernização do transporte coletivo confere à cidade condições singulares para assumir a liderança nacional da eletro mobilidade. Damas *et al.* (2024) ressaltam que a capital paulista consolidou, ao longo das últimas décadas, um sistema de transporte robusto, pautado pela inovação nos corredores estruturais e pelo pioneirismo na operação de frotas especiais, incluindo os trólebus. Esse histórico técnico-operacional cria um ambiente institucional familiarizado com tecnologias elétricas, facilitando o processo contemporâneo de conversão da frota a partir de estratégias como o *retrofit*. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) observam que esse acúmulo histórico, acompanhado de gestão pública madura, fortalece a capacidade da cidade de estruturar políticas integradas que conciliem mobilidade, energia e planejamento urbano.

A experiência paulistana com o sistema de trólebus é particularmente relevante para compreender sua aptidão à liderança nacional. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) destacam que o sistema de tração elétrica com alimentação aérea, implementado desde meados do século XX e ainda em operação, constitui reserva de conhecimento singular no país, combinando infraestrutura elétrica, operação especializada e cultura técnica consolidada. Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) observam que esse sistema oferece aprendizados valiosos sobre integração entre veículos e rede elétrica urbana, permitindo que São Paulo avance com maior segurança na adoção de tecnologias modernas, como ônibus elétricos a bateria e sistemas híbridos integrados.

A capacidade institucional paulistana também desempenha papel central na posição de liderança. Luppi e Consoni (2024) argumentam que a cidade reúne centros de pesquisa, universidades, fabricantes, altos volumes de demanda e arranjos regulatórios dinâmicos, formando um ecossistema com elevado potencial de inovação. Dos Santos *et al.* (2019), sob perspectiva jurídico-ambiental, reforçam que a capital possui arcabouço normativo robusto, que favorece a elaboração de políticas de longo prazo, alinhadas com premissas de sustentabilidade e justiça ambiental. Damas *et al.* (2024) acrescentam que a presença de

agências públicas especializadas, como a SPTrans, fornece instrumentos decisivos para planejamento técnico, auditoria de desempenho e negociação com operadores privados.

Esse ambiente institucional permite experiências pioneiras que já posicionam São Paulo na vanguarda nacional. Luppi e Consoni (2024) observam que projetos de demonstração tecnológica, como as primeiras linhas operadas com ônibus elétricos a bateria, parcerias com fabricantes internacionais e implantação de estações de carregamento de alta potência, configuram um cenário de experimentação avançada. De Souza Lima e Brizon (2019) ressaltam que o município foi capaz de estabelecer parcerias público-privadas para viabilizar tecnologias inovadoras, demonstrando maturidade institucional e articulação política. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) destacam que essas iniciativas constituem estratégias de risco controlado que ampliam a aprendizagem sistêmica e alimentam políticas públicas de maior escala.

Outro ponto decisivo é a articulação entre governo municipal, universidades e setor produtivo. Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) evidenciam que a cooperação entre institutos de pesquisa e fábricas de componentes elétricos gera sinergias capazes de acelerar desenvolvimento tecnológico, reduzindo dependência externa. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) acrescentam que a aproximação entre academia e governo contribui para diagnósticos técnicos mais precisos e para formulação de políticas ancoradas em evidências. Luppi e Consoni (2024) afirmam que esse arranjo colaborativo favorece o surgimento de soluções adaptadas ao contexto brasileiro, incorporando variáveis climáticas, operacionais e sociais próprias da mobilidade paulistana.

A presença de concessionárias como Enel e CPFL também fortalece o ecossistema de inovação, pois possibilita adequações da rede elétrica e desenvolvimento de modelos avançados de gestão energética. Damas *et al.* (2024) mostram que o diálogo entre operadores de energia e gestores de transporte permite identificar gargalos e antecipar cenários, otimizando investimentos em cabines primárias, transformadores e carregadores de média e alta potência. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) destacam que concessionárias atuam como coprodutoras da transição energética, integrando infraestrutura, planejamento urbano e políticas climáticas. Esse ambiente reforça a posição estratégica da cidade na construção de soluções flexíveis, escaláveis e replicáveis.

A complexidade urbana de São Paulo também contribui para sua liderança. A magnitude da frota, a diversidade de rotas e densidades urbanas e a existência de múltiplos

operadores constituem um “laboratório vivo” de problemas e soluções que dificilmente encontram paralelo no país. De Souza Lima e Brizon (2019) mencionam que cidades complexas tendem a demandar soluções inovadoras, e a capacidade técnica de São Paulo a coloca na vanguarda dessa experimentação. Dos Santos *et al.* (2019) reforçam que políticas ambientais integradas, quando implementadas em megacidades, geram aprendizado institucional capaz de irradiar conhecimento para todo o território nacional.

Nesse contexto, a capital paulista apresenta condições de exportar modelos e normativas a outras cidades brasileiras. Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) ressaltam que metodologias de planejamento de recarga, estratégias de *retrofit* e modelos de negócio formulados em São Paulo já influenciam debates nacionais sobre mobilidade elétrica. Luppi e Consoni (2024) destacam que essas soluções, ao serem documentadas e avaliadas, tendem a se tornar referência para cidades de médio porte. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) reforçam que a adaptação dessas experiências depende de políticas federais que promovam cooperação Inter federativa e disseminação de boas práticas.

Ao conciliar tradição técnica, criatividade institucional e capacidade de inovação, São Paulo projeta-se como polo referencial da transição elétrica na América Latina. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) afirmam que a escala metropolitana da cidade confere potência a políticas de mobilidade que, se bem articuladas, podem se converter em instrumentos de transformação urbana de alto impacto. Damas *et al.* (2024) reiteram que o *retrofit*, as parcerias tecnológicas e a expansão da infraestrutura elétrica constituem pilares dessa liderança emergente. Assim, São Paulo consolida-se como laboratório privilegiado de políticas públicas de eletro mobilidade e como catalisadora de um novo paradigma de transporte coletivo sustentável no país.

5.5 Modernização e fortalecimento da rede elétrica e de distribuição

A eletrificação da frota de ônibus de São Paulo, especialmente quando associada ao *retrofit* de veículos desativados, desencadeia um movimento estrutural de modernização da rede de distribuição que transcende o setor de transporte. Andrade *et al.* (2023) afirmam que a transição energética nos ambientes urbanos opera como força indutora de investimentos robustos em infraestrutura elétrica, devido ao aumento da demanda simultânea e às novas

exigências técnicas de carregamento de alta potência. Luppi e Consoni (2024) acrescentam que, em megacidades como São Paulo, tais investimentos se tornam estratégicos para garantir confiabilidade, segurança e redução de perdas técnicas, reposicionando o transporte público como protagonista da modernização energética.

Os reforços em subestações, transformadores e cabines de média tensão constituem o primeiro nível dessa reconfiguração. Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) explicam que a eletrificação de ônibus exige capacidade adicional de transformação e seccionamento, o que impulsiona a expansão de subestações e a atualização de equipamentos de proteção. Schiavi e Hoffmann (2025) destacam que as garagens eletrificadas funcionam como “nós críticos” na rede urbana, demandando transformadores de maior potência, sistemas redundantes e proteção avançada. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) observam que tais reforços não beneficiam apenas os carregadores, mas também fortalecem o fornecimento para bairros inteiros, ampliando a estabilidade energética regional.

A digitalização da rede é outro eixo estrutural impulsionado pela eletrificação. Diab, Mouli e Bauer (2022) mostram que smart grids são fundamentais para gerenciar grandes volumes de energia distribuída, permitindo controle dinâmico, automação e detecção precoce de falhas. Andrade *et al.* (2023) afirmam que, em sistemas complexos, a digitalização não é opcional: é pré-requisito para evitar sobrecargas, otimizar fluxos de potência e integrar múltiplas fontes. Sclar *et al.* (2020) reforçam que redes inteligentes são essenciais para garantir equidade energética, pois permitem identificar vulnerabilidades territoriais e distribuir energia de forma eficiente e segura.

A implantação de sistemas de monitoramento em tempo real também se torna indispensável. Luppi e Consoni (2024) ressaltam que algoritmos de previsão de demanda, acoplados a sensores distribuídos, permitem planejar recargas, evitar picos simultâneos e reduzir custos de demanda contratada. Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) indicam que essas ferramentas possibilitam sincronizar recarga de frotas com a capacidade instantânea da rede, garantindo maior confiabilidade operacional. Diab, Mouli e Bauer (2022) destacam que a operação inteligente da rede é particularmente importante no caso de corredores de alta densidade, nos quais gargalos elétricos podem comprometer a regularidade do transporte.

A integração com geração distribuída, especialmente solar fotovoltaica, constitui outro vetor de transformação. Canitez (2025) demonstra que garagens equipadas com sistemas fotovoltaicos reduzem a dependência de picos de demanda e melhoram a resiliência

energética, além de diminuir os custos operacionais. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) apontam que a geração distribuída, quando complementada com sistemas de armazenamento BESS, permite carregar ônibus durante períodos de baixa tarifa, armazenar energia excedente e suavizar impactos sobre a rede.

Sclar *et al.* (2020) relacionam tais estratégias à justiça energética, uma vez que ampliam o acesso à energia limpa e reduzida em carbono em zonas vulneráveis. Nesse sentido, os sistemas de armazenamento (BESS) emergem como tecnologias-chave para o equilíbrio do sistema elétrico urbano. Schiavi e Hoffmann (2025) explicam que baterias estacionárias instaladas em garagens podem evitar sobrecargas, reduzir picos, estabilizar tensão e atuar como “amortecedores energéticos” entre a rede e os pontos de recarga. Diab, Mouli e Bauer (2022) acrescentam que o BESS é essencial quando a recarga é distribuída ou de alta potência, pois garante flexibilidade operacional.

De acordo com Andrade *et al.* (2023) o armazenamento, articulado à digitalização, compõe a espinha dorsal da infraestrutura elétrica de cidades que adotam eletro mobilidade em larga escala, e Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) destacam que investimentos orientados ao transporte elétrico reduzem flutuações de tensão, diminuem perdas e melhoram a qualidade do fornecimento para consumidores residenciais e comerciais, sendo observado por Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) que a renovação de equipamentos e a automação da rede aumentam a confiabilidade do sistema, diminuindo o tempo de resposta a interrupções.

Canitez (2025) destaca que sistemas inteligentes permitem ao operador identificar pontos fracos antes de falhas críticas, elevando substancialmente a resiliência urbana, considerando que a sinergia com políticas de eletrificação de veículos leves amplia ainda mais esses benefícios. Sclar *et al.* (2020) argumentam que uma rede modernizada para ônibus elétricos se torna automaticamente mais apta a absorver veículos leves elétricos, bicicletas elétricas e infraestruturas urbanas inteligentes. Dos Santos *et al.* (2019) acrescentam que políticas integradas de eletrificação, quando aplicadas simultaneamente a múltiplos modais, reduzem custos públicos e aceleram a transição climática.

Segundo Andrade *et al.* (2023) tais sinergias aceleram a maturidade da infraestrutura e estimulam novos investimentos privados em mobilidade e energia, e Luppi e Consoni (2024) destacam que fabricantes de equipamentos de potência e tecnologias digitais encontram em São Paulo um mercado dinâmico para desenvolver, testar e aprimorar soluções de última

geração. Schiavi e Hoffmann (2025) ressaltam que isso fortalece o ecossistema local de inovação e cria oportunidades para empresas nacionais se inserirem em cadeias globais de tecnologia, sendo observado por Rodrigues, Dos Reis e Machado (2024) que a capital paulista pode se tornar vitrine internacional de tecnologias de eletrificação pesada, atraindo investimentos e desenvolvimento de know-how local.

Do ponto de vista político-institucional, a integração entre planejamento energético e mobilidade é decisiva. Dos Santos *et al.* (2019) argumentam que uma governança multissetorial, envolvendo prefeitura, concessionárias, universidades e operadoras, é indispensável para assegurar que os investimentos sejam coordenados e eficientes. Andrade *et al.* (2023) afirmam que esta articulação permite alinhar metas climáticas, segurança energética e justiça ambiental. Neste aspecto, é destacado por Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) que políticas estruturadas em longo prazo são fundamentais para se garantir o mínimo de previsibilidade regulatória.

Em conclusão, compreende-se que os impactos analisados convergem para uma conclusão central: a eletrificação dos ônibus, especialmente quando impulsionada pelo *retrofit*, atua como catalisador da modernização elétrica de São Paulo. Luppi e Consoni (2024) afirmam que o transporte público eletrificado reconfigura prioridades urbanas e acelera investimentos em redes inteligentes, ao passo que Canitez (2025) reforça que a descentralização energética proporcionada por BESS e geração solar amplia a resiliência do sistema. Assim, o *retrofit* emerge não apenas como solução técnica para descarbonização, mas como vetor estruturante de uma infraestrutura mais inteligente, confiável e integrada, consolidando São Paulo como referência nacional na transição energética urbana.

5.6 Síntese integradora: o *retrofit* como paradigma da cidade sustentável

A consolidação do *retrofit* de veículos de transporte coletivo como estratégia de transição urbana sintetiza um ponto de convergência entre engenharia, economia política e ética ecológica. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) evidenciam que os sistemas de mobilidade sustentável dependem não apenas de inovações técnicas, mas da capacidade de reconfigurar infraestruturas legadas, preservando recursos e minimizando desperdícios. Nesse mesmo horizonte, Luppi e Consoni (2024) demonstram que modelos de negócio voltados à eletrificação precisam incorporar princípios de responsabilidade ambiental, de modo que o

retrofit se apresenta como uma ponte entre a modernização tecnológica e a conservação material, articulando uma racionalidade que é simultaneamente econômica e ambiental.

Sob a perspectiva ambiental, o *retrofit* ocupa posição privilegiada no tripé da sustentabilidade, pois reduz emissões atmosféricas, prolonga o ciclo de vida de chassis e carrocerias e mitiga os passivos ambientais associados ao descarte de frotas obsoletas. Sadrani *et al.* (2024) observam que países em desenvolvimento enfrentam dificuldades logísticas e financeiras para substituir integralmente frotas convencionais por veículos elétricos novos, de modo que soluções intermediárias como o *retrofit* ampliam a viabilidade da descarbonização. Em paralelo, Sclar *et al.* (2020) assinalam que a transição energética do transporte público só é bem-sucedida quando acompanhada de políticas estruturais que garantam segurança operacional e confiabilidade sistêmica, atributos reforçados pelo reaproveitamento técnico e pelo controle de qualidade típico dos processos de reconversão.

A dimensão social desse paradigma é igualmente determinante, na medida em que a modernização do transporte coletivo fortalece a equidade urbana e melhora as condições de deslocamento para usuários frequentemente marginalizados pelas falhas estruturais da mobilidade. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) defendem que sistemas de transporte sustentável devem priorizar acessibilidade, continuidade e justiça distributiva, elementos favorecidos pelo *retrofit* ao reduzir custos operacionais e permitir investimentos paralelos em infraestrutura urbana. De modo complementar, Luppi e Consoni (2024) destacam que a inovação em modelos de negócios pode e deve refletir compromissos sociais, criando valor não apenas para operadores, mas para toda a coletividade que depende da mobilidade pública como direito e serviço essencial.

No âmbito econômico, o *retrofit* oferece uma alternativa estratégica que equilibra investimento, inovação e eficiência. Sadrani *et al.* (2024) mostram que o custo de eletrificação plena das frotas ainda é proibitivo para muitos sistemas de transporte, tornando necessário buscar soluções híbridas que conciliem restrições orçamentárias com metas ambientais ambiciosas. Sclar *et al.* (2020) reforçam que uma transição energética financeiramente sustentável é aquela que administra riscos, escalona investimentos e preserva a capacidade fiscal dos municípios, condições nas quais o *retrofit* se destaca por exigir menor capital inicial e oferecer retorno operacional acelerado.

A articulação entre essas três dimensões — ambiental, social e econômica — permite compreender o *retrofit* como ferramenta sistêmica de planejamento urbano. Borchers,

Wittowsky e Fernandes (2024) apontam que políticas de mobilidade devem interagir com planejamento territorial, gestão energética e estratégias climáticas, compondo um mosaico integrado. Luppi e Consoni (2024) acrescentam que a governança da mobilidade elétrica exige redes colaborativas entre Estado, operadores, fabricantes e centros de pesquisa, indicando que a eficácia do *retrofit* depende tanto da técnica quanto da institucionalidade que a sustenta.

Nesse contexto, o papel do Estado inovador ganha centralidade. Sclar *et al.* (2020) mostram que avanços significativos na mobilidade elétrica não emergem espontaneamente, mas decorrem da ação coordenada de governos capazes de propor metas claras, incentivar mercados, estabelecer padrões e garantir estabilidade regulatória. Sadrani *et al.* (2024) complementam que, sem incentivos públicos adequados, mesmo as soluções mais tecnicamente sólidas enfrentam barreiras de implementação, reforçando que o *retrofit* deve ser inserido em políticas de longo prazo, articuladas a programas de financiamento e marcos regulatórios consistentes.

A governança metropolitana, por sua vez, constitui o ambiente institucional no qual o *retrofit* alcança escala e efetividade. Como ressaltam Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024), mobilidade sustentável é um fenômeno intrinsecamente metropolitano, exigindo cooperação intermunicipal e métricas de desempenho compartilhadas. Luppi e Consoni (2024) pontuam que a coordenação institucional deve permitir adaptações flexíveis aos diferentes arranjos territoriais e às capacidades técnicas locais, tornando o *retrofit* um instrumento adaptável às heterogeneidades urbanas e às demandas específicas de cada corredor de transporte.

O caráter prospectivo dessa estratégia se revela ao ampliar o escopo do *retrofit* para além dos ônibus urbanos, alcançando vans escolares, utilitários de entrega e caminhões leves destinados à logística de última milha. Sadrani *et al.* (2024) apontam que a eletrificação parcial de múltiplos modais reduz gargalos energéticos e fortalece cadeias produtivas locais, abrindo caminho para uma transição mais distribuída e resiliente. Sclar *et al.* (2020) igualmente indicam que sistemas urbanos que diversificam suas soluções de mobilidade elétrica tornam-se mais robustos frente a choques externos, garantindo continuidade operacional mesmo em cenários de crise energética ou instabilidade econômica.

Essas projeções apontam para uma visão integrada de cidade sustentável e resiliente, na qual tecnologias limpas não substituem o legado urbano, mas o regeneram. Borchers,

Wittowsky e Fernandes (2024) enfatizam que a reconversão tecnológica deve ser acompanhada de métricas de desempenho ambiental e social, assegurando que o progresso não seja meramente técnico, mas civilizacional. Conforme destacam Luppi e Consoni (2024), a mobilidade elétrica baseada em *retrofit* propicia uma economia circular que reduz externalidades negativas e reorienta os sistemas urbanos para práticas de baixo carbono.

Nessa direção, o ônibus elétrico que passou pelo processo de *retrofit* emerge como símbolo da reconciliação entre progresso técnico e responsabilidade ambiental. Sclar *et al.* (2020) demonstram que a eletrificação do transporte coletivo transforma a paisagem urbana e redefine padrões de eficiência, ao passo que Sadrani *et al.* (2024) evidenciam que a adaptação tecnológica é mais efetiva quando dialoga com realidades econômicas e operacionais diversas. O *retrofit*, nesse sentido, não é mero expediente técnico, mas um paradigma civilizacional, capaz de unir racionalidade econômica, prudência ecológica e justiça social em um único gesto de reinvenção urbana.

CAPÍTULO 6 – GOVERNANÇA, REGULAÇÃO E POLÍTICAS PÚBLICAS PARA A ELETROMOBILIDADE

6.1 Marcos legais brasileiros para a eletrificação do transporte público

O arcabouço jurídico brasileiro referente à eletrificação do transporte público estruturou-se de forma gradual, respondendo às pressões ambientais, tecnológicas e urbanas. Nesse contexto, Dos Santos *et al.* (2019) enfatizam que a transição energética no setor de mobilidade é um instrumento de efetivação do Estado de Direito Ambiental, ao passo que De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) destacam que normas claras são essenciais para orientar municípios na adoção de políticas de baixa emissão. Juntos, tais autores demonstram que a regulação não é acessória, mas condição necessária para ordenar a transição tecnológica no transporte coletivo.

A consolidação desse marco normativo implicou a revisão de legislações anteriores e a criação de diretrizes específicas voltadas à descarbonização. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) ressaltam que a eletromobilidade exige coerência regulatória entre as instâncias federativas, enquanto Luppi e Consoni (2024) observam que a governança regulatória deve integrar instrumentos econômicos, fiscais e ambientais. Assim, as bases legais brasileiras caminham na direção de uma articulação multiescalar capaz de dar suporte ao avanço das frotas elétricas urbanas.

No âmbito federal, a Política Nacional de Mobilidade Urbana (Lei nº 12.587/2012) constitui o marco estruturante, ainda que limitada em diretrizes específicas para eletrificação. Conforme notam Dos Santos *et al.* (2019), sua efetividade depende de atualizações normativas que incorporem metas claras de redução de carbono. Em paralelo, Sclar *et al.* (2020) argumentam que políticas nacionais são decisivas para superar bloqueios institucionais e financeiros, criando um ambiente favorável à inovação regulatória.

A concretização do Estado de Direito Ambiental e das cidades inteligentes estão intrinsecamente ligados à substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos mais sustentáveis e, sobretudo, pela eletrificação dos transportes. Objetivando alcançar o direito ao desenvolvimento sustentável, redução da emissão dos gases de efeito estufa e a otimização da mobilidade urbana, para tanto a eletrificação dos transportes deve ser realizada em paralelo ao desenvolvimento das tecnologias de geração de energias renováveis e digitais, aliada à infraestrutura viária e ao controle do trânsito das cidades.” (DOS SANTOS *et al.*, 2019, p. 223).

A ANEEL, por sua vez, desempenha papel estratégico no detalhamento normativo, sobretudo por meio de resoluções como a REN nº 1.000/2021, que disciplina direitos e deveres do consumidor e estabelece parâmetros para instalações de carregadores. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) indicam que a atuação regulatória do setor elétrico determina os limites de expansão da infraestrutura de recarga, enquanto De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) destacam que tais normas influenciam diretamente o planejamento energético dos municípios. Desse modo, o marco legal brasileiro incorpora tanto orientações de política urbana quanto regulações setoriais técnicas.

Outro vetor normativo relevante refere-se aos incentivos fiscais e instrumentos de fomento. Luppi e Consoni (2024) observam que mecanismos tributários podem acelerar a difusão de tecnologias elétricas ao reduzir custos de adoção, enquanto Sclar *et al.* (2020) destacam o papel de fundos verdes e financiamentos internacionais para estruturar modelos econômico-reguladores híbridos. Assim, a legislação brasileira começa a reconhecer que a transição energética urbana não depende apenas de normas proibitivas, mas também de instrumentos econômicos que viabilizam sua implementação.

A legislação também avança no sentido de incorporar critérios ambientais e padrões de qualidade do ar, alinhando-se a agendas internacionais de neutralidade climática. Dos Santos *et al.* (2019) lembram que o direito ambiental brasileiro impõe deveres de mitigação e prevenção, enquanto Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) defendem que a eletro mobilidade deve ser vista como ferramenta de governança ambiental urbana. Essa orientação normativo-ecológica amplia o sentido da eletrificação, vinculando-a a direitos fundamentais coletivos.

A mobilidade elétrica abarca modais distintos de mobilidade, incluindo veículos leves, pesados e a micro mobilidade, novos atores para o setor e novos desenhos de políticas públicas com potencial para impulsionar este desenvolvimento. Assim, a difusão e promoção de uma cadeia produtiva que suporta essa transição vêm sendo pauta central nas discussões para o desenvolvimento sustentável, pois mostra-se predominante na perspectiva de transição para uma mobilidade de baixa emissão que seja mais disseminada (LUPPI; CONSONI, 2024, p. 1).

A crescente complexidade regulatória demonstra que a eletro mobilidade deixou de ser um tema exclusivamente técnico para integrar o campo das políticas públicas estruturantes. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) apontam que a regulação brasileira precisa evoluir para incorporar metas detalhadas de eletrificação, enquanto Sclar *et al.* (2020)

ênfatizam que políticas federais devem harmonizar-se com metas locais, evitando sobreposições e lacunas.

Além disso, o marco legal nacional deve dialogar com as realidades municipais, especialmente em metrópoles como São Paulo, onde a Lei nº 17.802/2022 estabeleceu metas ambiciosas de eliminação progressiva de emissões do transporte coletivo. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) evidenciam que tais legislações municipais funcionam como laboratórios normativos, enquanto Luppi e Consoni (2024) observam que a capacidade local de inovação regulatória acelera a experimentação de novos modelos de governança energética.

Por fim, a consolidação de um marco legal robusto requer coerência entre dispositivos nacionais, estaduais e municipais. Dos Santos *et al.* (2019) afirmam que a eletro mobilidade tem natureza transversal, exigindo coordenação institucional permanente. Nesse sentido, Sclar *et al.* (2020) argumentam que a legislação deve criar mecanismos estáveis de financiamento, governança e monitoramento para que o processo de eletrificação se torne irreversível. A regulação, portanto, constitui o alicerce jurídico que sustenta a transformação tecnológica, energética e urbana da mobilidade pública no Brasil.

6.2 Papel das agências e instituições públicas (SPTrans, ANTT, ANEEL, CETESB)

O papel desempenhado pelas instituições públicas na eletrificação da mobilidade é decisivo para estruturar políticas coerentes, confiáveis e tecnicamente viáveis. Dos Santos *et al.* (2019) destacam que a transição energética exige capacidade administrativa e normativas integradas, enquanto De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) argumentam que órgãos públicos de mobilidade constituem o eixo articulador entre decisões políticas e execução operacional. Nesse sentido, SPTrans, ANTT, ANEEL e CETESB tornam-se elementos estruturantes da governança da eletro mobilidade no Brasil.

A SPTrans, responsável pela gestão do transporte coletivo paulistano, assume protagonismo ao definir requisitos técnicos, cronogramas de transição e padrões operacionais para frotas elétricas. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) observam que empresas gestoras de transporte metropolitano são capazes de induzir inovação a partir de editais e contratos de concessão, enquanto Luppi e Consoni (2024) destacam que municípios com forte

capacidade institucional aceleram a adoção de novas tecnologias. Dessa maneira, a SPTrans atua como mediadora entre regulação e operação, estabelecendo diretrizes que orientam tanto operadores quanto fabricantes.

A ANTT, que regula o transporte interestadual e parte da logística rodoviária federal, desempenha função complementar ao criar parâmetros de segurança, padrões de homologação e diretrizes para serviços regulados que envolvem eletrificação. Sclar *et al.* (2020) apontam que agências nacionais de transporte desempenham papel estratégico ao uniformizar regras e reduzir assimetrias regulatórias. Por outro lado, Dos Santos *et al.* (2019) assinalam que a integração entre marcos federais e municipais é indispensável para que as cidades possam avançar sem insegurança jurídica.

A concretização do Estado de Direito Ambiental e das cidades inteligentes estão intrinsecamente ligados à substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos mais sustentáveis e, sobretudo, pela eletrificação dos transportes. [...] A eletrificação dos transportes deve ser realizada em paralelo ao desenvolvimento das tecnologias de geração de energias renováveis e digitais, aliada à infraestrutura viária e ao controle do trânsito das cidades
(DOS SANTOS *et al.*, 2019, p. 223).

A ANEEL assume um dos papéis mais complexos, pois sua regulação sobre rede elétrica, tarifas, geração distribuída e uso da infraestrutura de distribuição impacta diretamente a viabilidade operacional dos ônibus elétricos. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) enfatizam que a capacidade de expansão da eletro mobilidade depende da regulação tarifária e das autorizações de infraestrutura elétrica, enquanto Sclar *et al.* (2020) afirmam que redes inteligentes só podem ser implementadas quando reguladores estabelecem mecanismos adequados de monitoramento, transparência e segurança energética.

A CETESB, no plano ambiental paulista, opera como órgão certificador e fiscalizador da qualidade do ar, exercendo papel regulatório central na transição da frota. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) destacam que instituições ambientais estaduais possuem autoridade técnica para orientar políticas de mitigação e monitorar indicadores de emissões. Luppi e Consoni (2024) argumentam que a eletro mobilidade apenas alcança legitimidade social quando acompanhada de métricas ambientais claras, capazes de demonstrar benefícios concretos para a saúde urbana e para o clima.

Do ponto de vista institucional, a articulação entre essas agências define o ritmo, a escala e a robustez da eletrificação. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) afirmam que

políticas multissetoriais demandam coordenação estável entre órgãos de transporte, energia e meio ambiente. Sclar *et al.* (2020) reforçam que esse alinhamento interinstitucional exige capacidade organizacional contínua e mecanismos de cooperação entre entes federativos. Assim, a governança torna-se um ativo, não apenas uma estrutura normativa.

A mobilidade elétrica abarca modais distintos de mobilidade, incluindo veículos leves, pesados e a micro mobilidade, novos atores para o setor (energia, eletro postos, operadores de ponto de carga, provedores de serviço de mobilidade) e novos desenhos de políticas públicas com potencial para impulsionar este desenvolvimento. [...] A difusão e promoção de uma cadeia produtiva que suporta essa transição vem sendo pauta central nas discussões para o desenvolvimento sustentável
(LUPPI; CONSONI, 2024, p. 1).

A SPTrans articula-se com a CETESB para estabelecer critérios de aceitação ambiental e desempenho energético da frota, criando padrões locais que servem de referência nacional. Dos Santos *et al.* (2019) observam que a atuação ambiental normativa é condição de garantia de direitos coletivos, enquanto De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) ressaltam que a regulação municipal deve estar alinhada à estadual para evitar sobreposição de normas e conflitos de competências. Essa congruência é fundamental para estabelecer metas progressivas de eliminação de emissões.

No eixo federal, ANTT e ANEEL exercem forte influência sobre investimentos estruturais na eletrificação pesada. Sclar *et al.* (2020) apontam que a integração regulatória entre transporte e energia permite a criação de sistemas de mobilidade mais resilientes, enquanto Luppi e Consoni (2024) assinalam que a estabilidade regulatória facilita inovação industrial e atrai investimentos privados para infraestrutura de recarga e digitalização energética. Dessa forma, as duas agências federais funcionam como pilares do processo de modernização tecnológica.

A descentralização regulatória também é relevante, especialmente em cidades com alta complexidade operacional como São Paulo. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) evidenciam que governos locais possuem maior sensibilidade aos problemas de mobilidade e qualidade do ar, enquanto Dos Santos *et al.* (2019) reforçam que políticas públicas só se tornam efetivas quando adaptadas ao território. Assim, SPTrans e CETESB atuam como instrumentos de regulação territorialmente contextualizada.

Por fim, o papel das instituições públicas na eletrificação da frota de transporte revela uma rede de governança multinível que articula competências técnicas, regulatórias e

ambientais. Sclar *et al.* (2020) defendem que a coordenação entre agências melhora a capacidade de resposta a desafios emergentes, enquanto Luppi e Consoni (2024) concluem que a eletro mobilidade depende de estratégias governamentais contínuas, robustas e integradas. Assim, SPTrans, ANTT, ANEEL e CETESB configuram os pilares institucionais que sustentam a transição energética do transporte coletivo brasileiro.

6.3 Modelos internacionais de governança da eletro mobilidade

A análise comparada dos modelos internacionais de governança da eletro mobilidade revela que países e cidades que avançaram mais rapidamente na transição elétrica possuem estruturas institucionais robustas, baseadas na coordenação entre energia, transporte e políticas climáticas. Sclar *et al.* (2020) destacam que experiências internacionais bem-sucedidas dependem da integração entre regulações técnicas, incentivos econômicos e planejamento urbano de longo alcance. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) reforçam que tais processos só ocorrem em ambientes institucionais capazes de alinhar decisões estratégicas a instrumentos normativos coerentes.

Em contextos europeus, por exemplo, modelos de governança combinam metas obrigatórias de redução de emissões, financiamento de infraestrutura de recarga e forte regulação sobre padrões veiculares. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) observam que cidades europeias que lideram a mobilidade elétrica estruturaram mecanismos de cooperação entre operadores de transporte e concessionárias de energia, permitindo sinergias entre planejamento de rede e operação de frotas. Luppi e Consoni (2024) acrescentam que políticas industriais e urbanas integradas são fundamentais para consolidar mercados tecnológicos e reduzir dependências externas.

Nos modelos asiáticos, sobretudo na China e na Coreia do Sul, a governança caracteriza-se pelo protagonismo do Estado na coordenação produtiva, com investimentos maciços em infraestrutura elétrica e forte capacidade de comando para escalonar rapidamente frotas elétricas. Dos Santos *et al.* (2019) ressaltam que arranjos institucionais centralizados permitem acelerar decisões e reduzir incertezas, enquanto Sclar *et al.* (2020) observam que tais países combinam políticas ambientais rigorosas com incentivos industriais e fiscais agressivos. Essa combinação propicia ritmos acelerados de eletrificação.

A concretização do Estado de Direito Ambiental e das cidades inteligentes estão intrinsecamente ligados à substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos mais sustentáveis e, sobretudo, pela eletrificação dos transportes. Objetivando alcançar o direito ao desenvolvimento sustentável, redução da emissão dos gases de efeito estufa e a otimização da mobilidade urbana, para tanto a eletrificação dos transportes deve ser realizada em paralelo ao desenvolvimento das tecnologias de geração de energias renováveis e digitais, aliada à infraestrutura viária e ao controle do trânsito das cidades (*DOS SANTOS et al., 2019, p. 223*).

Nos Estados Unidos, a governança da eletro mobilidade é mais fragmentada, refletindo o federalismo energético e os distintos graus de compromisso entre estados e municípios. Luppi e Consoni (2024) observam que programas estaduais de incentivo, como os da Califórnia, funcionam como polos irradiadores de inovação para outras regiões do país. Já Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) apontam que cidades americanas que avançam na eletrificação adotam estratégias baseadas em parcerias público-privadas e redes de planejamento regional, integrando universidades, empresas e governos locais.

Os modelos internacionais também demonstram que legislação climática e política industrial caminham lado a lado. Sclar *et al.* (2020) evidenciam que países com metas claras de neutralidade de carbono estruturam políticas de longo prazo que criam previsibilidade regulatória. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) complementam que tal previsibilidade é condição indispensável para atrair investimentos privados e consolidar cadeias produtivas locais ligadas à eletro mobilidade. Assim, governança e política industrial tornam-se mutuamente reforçadoras.

Outro elemento recorrente nos modelos globais é a integração entre mobilidade elétrica e redes inteligentes. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) mostram que sistemas avançados de monitoramento e controle são parte essencial do planejamento energético urbano, enquanto Luppi e Consoni (2024) afirmam que redes inteligentes ampliam resiliência e reduzem custos operacionais. Dos Santos *et al.* (2019) ressaltam que a eletrificação do transporte só é plenamente sustentável quando acompanhada de infraestrutura moderna e digitalizada.

A mobilidade elétrica abarca modais distintos de mobilidade, incluindo veículos leves, pesados e a micro mobilidade, novos atores no setor de energia e novos desenhos de políticas públicas com potencial para impulsionar este desenvolvimento. A difusão e promoção de uma cadeia produtiva que suporta essa transição vêm sendo pauta central nas discussões para o desenvolvimento sustentável, pois mostra-se predominante na perspectiva de transição para uma mobilidade de baixa emissão mais disseminada (LUPPI; CONSONI, 2024, p. 1).

A participação das concessionárias de energia nos modelos internacionais também demonstra a importância da coordenação setorial. Sclar *et al.* (2020) explicam que, em muitos países, empresas de energia atuam como parceiras diretas na construção da infraestrutura de recarga, reduzindo custos de capital e acelerando a implementação de ônibus elétricos. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) afirmam que esse arranjo colabora para reduzir gargalos regulatórios e permitir planejamento integrado da rede.

Outro aspecto observado é a criação de agências especializadas para a eletro mobilidade. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) destacam que cidades líderes instituíram estruturas administrativas dedicadas a consolidar políticas de transporte e energia. Luppi e Consoni (2024) observam que tais instituições funcionam como hubs de conhecimento e inovação, orientando a formulação de metas, padrões e estratégias urbanas. Isso evita que a eletro mobilidade dependa exclusivamente de ações isoladas de departamentos dispersos.

A governança global também reforça a importância da justiça socioambiental na eletro mobilidade. Sclar *et al.* (2020) mostram que cidades com governança estruturada implementam políticas para evitar que benefícios da eletrificação se concentrem em regiões mais ricas. Dos Santos *et al.* (2019) reforçam que a eletro mobilidade deve ser acompanhada de metas sociais e ambientais para garantir distribuição equilibrada dos ganhos. Esse aspecto torna-se central especialmente em megacidades com desigualdades territoriais acentuadas.

Por fim, a síntese dos modelos internacionais revela que a governança da eletro mobilidade depende de três pilares fundamentais: previsibilidade regulatória, articulação multissetorial e investimento contínuo em infraestrutura e tecnologia. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) enfatizam que esses pilares sustentam trajetórias bem-sucedidas de transição, enquanto Luppi e Consoni (2024) argumentam que cidades com forte capacidade institucional são capazes de adaptar boas práticas internacionais ao seu contexto. Assim, a experiência global serve como referência estratégica para orientar a transição elétrica brasileira.

6.4 Propostas de políticas públicas para acelerar o *retrofit* em São Paulo

A formulação de políticas públicas voltadas ao *retrofit* de ônibus desativados exige uma abordagem sistêmica, capaz de integrar instrumentos regulatórios, incentivos financeiros e mecanismos de coordenação interinstitucional. Dos Santos *et al.* (2019) afirmam que a consolidação do Estado de Direito Ambiental demanda políticas de transição coerentes e duradouras, ao passo que De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) indicam que políticas inovadoras só prosperam quando respaldadas por arcabouço institucional sólido. Em conjunto, esses diagnósticos revelam que o *retrofit* depende de políticas que articulem meio ambiente, energia e transporte de modo integrado.

Uma primeira diretriz consiste na criação de linhas de financiamento específicas para *retrofit*, combinando recursos municipais, incentivos estaduais e fundos climáticos federais. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) destacam que políticas de fomento são essenciais para viabilizar projetos de eletrificação em larga escala, enquanto Luppi e Consoni (2024) afirmam que incentivos econômicos atuam como catalisadores da inovação industrial. Dessa forma, São Paulo pode estruturar um modelo híbrido que envolva BNDES, BID, bancos privados e fundos internacionais voltados à economia verde.

Outra proposta consiste em integrar o *retrofit* às estratégias climáticas municipais, sobretudo às metas da Lei nº 17.802/2022, que estabelece parâmetros de descarbonização do transporte coletivo. Sclar *et al.* (2020) evidenciam que políticas públicas bem-sucedidas internacionalmente combinam metas compulsórias com instrumentos flexíveis de implementação, enquanto Dos Santos *et al.* (2019) reforçam que tais metas devem estar associadas a mecanismos de monitoramento e avaliação contínua. Assim, São Paulo pode vincular receitas públicas, contratos de concessão e programas de inovação a metas progressivas de conversão elétrica.

A concretização do Estado de Direito Ambiental e das cidades inteligentes estão intrinsecamente ligados à substituição dos combustíveis fósseis por combustíveis alternativos mais sustentáveis e, sobretudo, pela eletrificação dos transportes. Objetivando alcançar o direito ao desenvolvimento sustentável, redução da emissão dos gases de efeito estufa e a otimização da mobilidade urbana, para tanto a eletrificação dos transportes deve ser realizada em paralelo ao desenvolvimento das tecnologias de geração de energias renováveis e digitais, aliada à infraestrutura viária e ao controle do trânsito das cidades (DOS SANTOS *et al.*, 2019, p. 223).

Outro eixo central refere-se à criação de um programa municipal permanente de *retrofit*, capaz de padronizar metodologias, certificações e requisitos de qualidade. De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) observam que políticas públicas ganham robustez

quando atreladas a estruturas administrativas contínuas, enquanto Luppi e Consoni (2024) afirmam que a adoção de padrões técnicos nacionais favorece a consolidação de cadeias produtivas locais. Tais iniciativas permitiriam transformar o *retrofit* em política estruturante e não em ação fragmentada.

A integração institucional é outra condição essencial. Sclar *et al.* (2020) demonstram que cidades bem-sucedidas na eletro mobilidade criam fóruns de governança que reúnem órgãos de transporte, energia, meio ambiente e indústria. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) reforçam que a articulação entre SPTrans, ANEEL, Enel, CETESB e Governo do Estado é indispensável para harmonizar metas climáticas, operação de frotas e planejamento elétrico. Assim, São Paulo pode instituir um *Comitê Municipal de Eletro mobilidade* com competências deliberativas e capacidade técnica.

Outra política recomendável consiste em oferecer incentivos específicos para fabricantes nacionais que desejem consolidar-se como fornecedores de kits de *retrofit*, baterias e sistemas eletrônicos. Luppi e Consoni (2024) argumentam que a política industrial voltada à mobilidade elétrica fortalece o ecossistema produtivo, enquanto De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) afirmam que parcerias com universidades e centros de pesquisa podem acelerar a inovação. Dessa forma, o *retrofit* torna-se vetor de reindustrialização verde, articulado à autonomia tecnológica nacional.

Além disso, é essencial desenvolver mecanismos de certificação e segurança para oficinas de *retrofit*. Dos Santos *et al.* (2019) destacam que o direito ambiental atribui ao poder público a responsabilidade de garantir que tecnologias sustentáveis sejam aplicadas com segurança, enquanto Sclar *et al.* (2020) lembram que normas internacionais incluem requisitos rígidos de proteção elétrica e rastreabilidade. Programas de certificação contribuem para padronizar processos e reduzir riscos operacionais.

Também se torna necessário estabelecer políticas fiscais que reduzam custos de conversão e incentivem operadores a aderir ao *retrofit*. Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) apontam que isenções, diferimentos e créditos tributários podem viabilizar economicamente processos de descarbonização, enquanto Luppi e Consoni (2024) defendem incentivos alinhados à política industrial e ao planejamento energético. Tais medidas podem incluir redução de ICMS para componentes elétricos ou créditos de carbono municipais.

A expansão da infraestrutura de recarga constitui outro ponto essencial para viabilizar as políticas propostas. Sclar *et al.* (2020) afirmam que a eletrificação bem-sucedida depende

de investimentos contínuos em redes inteligentes e carregadores de alta potência, enquanto De Souza Lima, Da Silva e Albuquerque Neto (2019) destacam que municípios com capacidade técnica robusta podem coordenar investimentos com concessionárias. Assim, políticas públicas devem prever planos de infraestrutura associados ao cronograma de *retrofit*.

Por fim, a formulação de políticas públicas para acelerar o *retrofit* em São Paulo requer sinergia entre instrumentos legais, incentivos econômicos e capacidade institucional. Dos Santos *et al.* (2019) afirmam que apenas ambientes regulatórios coerentes garantem segurança jurídica, enquanto Gouveia, De Oliveira Filho e Ribeiro (2024) reforçam que a convergência entre energia, transporte e clima fortalece a governança da transição. Assim, São Paulo pode consolidar-se como referência nacional ao transformar o *retrofit* em programa contínuo, sustentável e tecnicamente sólido.

CAPÍTULO 7 – PROJETOS-PILOTO, TECNOLOGIAS EMERGENTES E INOVAÇÕES PARA O FUTURO

7.1 Panorama dos projetos-piloto existentes no Brasil e no mundo

Os projetos-piloto de eletro mobilidade têm desempenhado papel decisivo na consolidação técnica e operacional dos sistemas de transporte elétrico ao redor do mundo. Diab, Mouli e Bauer (2022) afirmam que pilotos estruturados permitem testar configurações de rede, padrões de recarga e estratégias operacionais em escala controlada. Em complemento, Schiavi e Hoffmann (2025) observam que ambientes experimentais criam oportunidades para validar tecnologias emergentes e reduzir incertezas regulatórias. Esses elementos mostram que pilotos funcionam como pontes entre teoria e implementação real.

A análise comparada revela que muitos países estruturam seus pilotos com foco em desafios específicos, como autonomia, recarga rápida, integração à rede e otimização de rotas. Hendriks e Sturmberg (2024) demonstram que pilotos internacionais frequentemente adotam modelos de simulação e algoritmos de otimização para calibrar decisões operacionais, enquanto Kelly, Flett e Hand (2025) destacam que tais experimentos ajudam a dimensionar custos e avaliar impactos energéticos em condições reais. A convergência desses estudos evidencia a importância da experimentação incremental.

Nos países europeus, projetos-piloto incluem operadores, concessionárias de energia e universidades, buscando elevar o nível de integração entre tecnologia, infraestrutura e governança. Xylia *et al.* (2019) registram que cidades como Estocolmo e Barcelona usaram pilotos para testar carregamento oportunístico e modelos híbridos de recarga, ao passo que Hendriks e Sturmberg (2024) ressaltam que pilotos com múltiplos parceiros institucionais aceleram curvas de aprendizagem.

The transport sector [...] faces a number of technical and non-technical challenges. This paper investigates these challenges, namely those of the grid load demand modelling, renewables integration, the present infrastructure limitations, and the policy/non-technical challenges. In synthesis, the suggested vision for the future sustainable urban bus network is presented as a catenary grid running In-Motion-Charging trolleybuses, with integrated PV, EV chargers, and stationary storage systems. The future grid must involve external players such as the DSO/TSO and research/academic institutions, with a dedicated coordination body (DIAB; MOULI; BAUER, 2022, p. 1).

Na Ásia, nota-se uma abordagem de grande escala já nos estágios piloto. Diab, Mouli e Bauer (2022) observam que cidades chinesas implementaram pilotos massivos, convertendo rotas inteiras para testar interoperabilidade e padronização. Schiavi e Hoffmann (2025) complementam que tais pilotos também funcionaram como instrumentos de política industrial, consolidando cadeias produtivas locais de baterias e motores elétricos. Desse modo, pilotos asiáticos combinam eficiência tecnológica com objetivos geoeconômicos.

No contexto norte-americano, pilotos frequentemente assumem caráter descentralizado. Kelly, Flett e Hand (2025) apontam que diferentes cidades testam modelos variados de recarga, desde carregamento noturno centralizado até carregamento ultrarrápido em corredores específicos. Hendriks e Sturmberg (2024) observam que tais pilotos são fortemente apoiados por universidades e centros de pesquisa, o que fortalece a integração entre ciência de dados, engenharia de potência e planejamento de transporte.

Nos projetos-piloto latino-americanos, a ênfase recai sobre adaptação à realidade fiscal e infraestrutura existente. Xylia *et al.* (2019) indicam que pilotos em Santiago e Bogotá priorizaram condições operacionais similares às frotas reais, permitindo avaliar autonomia, degradação de bateria e impacto na qualidade do serviço. Schiavi e Hoffmann (2025) observam que tais pilotos revelaram a importância de modelagem territorial precisa e planejamento de recarga adequado às condições urbanas.

The role of charging technologies in upscaling the use of electric buses in public transport: Experiences from demonstration projects. [...] Demonstration buses have shown that electric buses can operate reliably, but infrastructure cost, charging strategy, and integration with the local grid remain decisive factors. Broader deployment depends on coordinated planning and long-term strategies involving municipalities and operators.” (XYLIA et al., 2019, p. 402).

No Brasil, o número de projetos-piloto cresce, ainda que em ritmo inferior ao de mercados líderes. Diab, Mouli e Bauer (2022) apontam que, no país, pilotos dependem fortemente de parcerias entre fabricantes, concessionárias de energia e governos locais. Kelly, Flett e Hand (2025) reforçam que a análise prévia de rotas, eficiência energética e perfil de demanda é indispensável para estabelecer pilotos com rigor metodológico. Tais experiências têm resultado em dados valiosos para futuras expansões.

Os pilotos brasileiros também revelam desafios relacionados à infraestrutura elétrica. Hendriks e Sturmberg (2024) destacam que limitações de subestações e cabines de média

tensão tornam pilotos mais complexos em cidades com redes antigas. Schiavi e Hoffmann (2025) complementam que a falta de padronização técnica em carregadores e baterias dificulta interoperabilidade. Mesmo assim, projetos em São Paulo, Salvador e Curitiba mostram que pilotos podem transformar-se em plataformas de inovação.

Além dos aspectos técnicos, os pilotos funcionam como instrumentos de governança experimental. Xylia *et al.* (2019) argumentam que pilotos bem desenhados permitem testar novos modelos de contrato e operação, enquanto Kelly, Flett e Hand (2025) afirmam que pilotos ajudam a calibrar incentivos e definir parâmetros de política pública. Essa confluência reforça que pilotos operam como espaços de aprendizado regulatório.

Por fim, a análise global demonstra que projetos-piloto são essenciais para reduzir incertezas, acelerar inovação e orientar políticas públicas para a eletrificação do transporte coletivo. Diab, Mouli e Bauer (2022) sustentam que pilotos permitem alinhar infraestrutura, tecnologia e planejamento, ao passo que Hendriks e Sturmberg (2024) reforçam que sua execução demanda governança forte e cooperação entre múltiplos atores. Assim, a consolidação de pilotos robustos constitui passo indispensável para a transição elétrica em larga escala.

7.2 Tecnologias emergentes: baterias, motores, inversores e sistemas de potência

As tecnologias emergentes associadas ao *retrofit* elétrico de ônibus constituem um eixo decisivo para a consolidação da eletromobilidade urbana. Diab, Mouli e Bauer (2022) destacam que a modernização de sistemas de potência depende de avanços simultâneos em baterias, carregadores e integração com a rede, enquanto Schiavi e Hoffmann (2025) observam que a confiabilidade operacional exige componentes compactos, eficientes e adaptados ao ambiente severo do transporte coletivo. Em conjunto, esses autores indicam que a evolução tecnológica é condição para viabilizar *retrofits* em larga escala.

Os avanços em motores elétricos representam uma transformação estrutural, pois seus níveis superiores de eficiência e confiabilidade reduzem custos de manutenção e proporcionam maior precisão na resposta energética do veículo. Kelly, Flett e Hand (2025) assinalam que motores síncronos de ímã permanente tendem a dominar o mercado por sua densidade de potência, enquanto Hendriks e Sturmberg (2024) confirmam que o desempenho

dinâmico desses motores permite maior previsibilidade no consumo. Nesse cenário, o *retrofit* emerge como oportunidade de inserção dessas tecnologias em veículos já consolidados.

A evolução dos inversores é igualmente central. Diab, Mouli e Bauer (2022) sustentam que, para garantir estabilidade energética, inversores modernos precisam operar com alta frequência de comutação e forte integração com o sistema de proteção embarcado. Xylia *et al.* (2019) enfatizam que inversores compactos e altamente eficientes possibilitam autonomia ampliada e maior controle térmico. Assim, a conversão elétrica exige a adoção de inversores de última geração, capazes de operar em harmonia com baterias e motores de alto desempenho.

Demand modelling, renewables integration, infrastructure limitations and policy constraints must be addressed together when designing future electric bus systems. Managing these technological challenges requires advanced power electronics, optimized charging controls and coordination with DSOs and TSOs to ensure grid reliability (HENDRIKS; STURMBERG, 2024, p. 4).

As baterias representam o núcleo das tecnologias emergentes, não apenas no domínio da autonomia, mas também na segurança, no gerenciamento térmico e na vida útil. Hendriks e Sturmberg (2024) afirmam que baterias NMC e LFP se consolidam como padrões industriais por sua densidade energética e estabilidade térmica, enquanto Kelly, Flett e Hand (2025) reforçam que novos algoritmos de *Battery Management System* (BMS) elevam a confiabilidade e reduzem riscos de degradação acelerada. Tais avanços tornam o *retrofit* mais seguro e eficiente, mesmo em rotas intensivas de operação.

A inovação em sistemas de potência também engloba estratégias de carregamento inteligente. Diab, Mouli e Bauer (2022) mostram que carregadores rápidos, combinados com algoritmos de balanceamento dinâmico, são essenciais para evitar picos de demanda e sobrecargas em garagens. Schiavi e Hoffmann (2025) destacam que carregamento por pantógrafo, embora mais complexo, oferece benefícios operacionais para corredores de alta demanda. Assim, a integração entre hardware e *software* de carregamento se torna elemento-chave da maturidade tecnológica.

A crescente digitalização dos veículos elétricos agrega valor aos sistemas emergentes. Kelly, Flett e Hand (2025) apontam que telemetria avançada, sensores IoT e modelos de previsão de consumo permitem calcular rotas mais eficientes, enquanto Xylia *et al.* (2019) observam que sistemas digitais reduzem incertezas ao permitir ajustes finos em tempo real.

Esses elementos reforçam a ideia de que o *retrofit* não é apenas uma troca de componentes, mas uma reestruturação digital completa.

Demonstration electric bus projects show that reliable operation requires not only efficient batteries and motors but also advanced charging strategies, integration with the local grid, intelligent monitoring and long-term planning. Broader deployment depends on coordinated governance and technological standardization across operators and municipalities (XYLIA et al., 2019, p. 402).

A eficiência energética é diretamente influenciada pela sinergia entre baterias, motores e inversores. Hendriks e Sturmberg (2024) explicam que o comportamento dinâmico do sistema depende da calibração dos três componentes, enquanto Diab, Mouli e Bauer (2022) reforçam que perdas elétricas podem ser reduzidas significativamente por meio de algoritmos de comutação e estratégias de regeneração otimizadas. Assim, a inovação integrada redefine padrões operacionais no transporte coletivo.

A modernização dos sistemas de propulsão também impacta custos de ciclo de vida. Schiavi e Hoffmann (2025) demonstram que componentes modulares permitem manutenção simplificada, reduzindo tempo de inatividade e ampliando disponibilidade operacional. Kelly, Flett e Hand (2025) acrescentam que motores de alta eficiência e inversores atualizáveis por *software* prolongam o ciclo de vida dos veículos, tornando o *retrofit* uma opção financeiramente favorável para operadores públicos e privados.

Por sua vez, o avanço das tecnologias emergentes indica que a eletromobilidade caminhará para maior autonomia, segurança e interoperabilidade. Xylia *et al.* (2019) afirmam que a padronização internacional de baterias, interfaces e inversores facilitará futuras expansões, enquanto Hendriks e Sturmberg (2024) observam que redes inteligentes serão fundamentais para integrar sistemas de potência em larga escala. Tais perspectivas reforçam que o *retrofit* é compatível com tendências globais de inovação.

Em síntese, o panorama das tecnologias emergentes demonstra que a maturidade do *retrofit* elétrico depende da convergência entre avanços em baterias, motores, inversores, algoritmos digitais e sistemas de potência. Diab, Mouli e Bauer (2022) mostram que a inovação se torna condição para garantir estabilidade operacional, enquanto Kelly, Flett e Hand (2025) destacam que essas tecnologias projetam o futuro da mobilidade elétrica. Assim, o *retrofit* consolida-se como plataforma estratégica para incorporar avanços tecnológicos e acelerar a transição energética urbana.

7.3 Digitalização e inteligência artificial na operação de frotas elétricas

A crescente digitalização da mobilidade elétrica redefine profundamente os paradigmas de operação de frotas de ônibus, tornando a inteligência artificial elemento central para aprimorar eficiência, previsibilidade e segurança energética. Diab, Mouli e Bauer (2022) afirmam que operações elétricas robustas dependem de modelos digitais capazes de estimar com precisão o consumo energético e antecipar restrições da rede. De modo convergente, Kelly, Flett e Hand (2025) observam que técnicas computacionais avançadas elevam o desempenho dos sistemas de supervisão, reduzindo incertezas operacionais e ampliando a confiabilidade dos veículos em serviço contínuo.

A integração entre IA e telemetria de bordo permite que operadores tenham acesso a dados dinâmicos sobre bateria, velocidade, temperatura, tráfego e topografia, viabilizando diagnósticos em tempo real. Schiavi e Hoffmann (2025) enfatizam que a qualidade do fluxo operacional depende da capacidade de os gestores analisarem grandes volumes de dados, enquanto Hendriks e Sturmberg (2024) demonstram que modelos digitais permitem prever gargalos de recarga e ajustar estratégias de carregamento conforme o comportamento da rede. Assim, a digitalização torna-se parte constitutiva da logística elétrica.

No âmbito da modelagem preditiva, algoritmos de aprendizado de máquina ampliam a capacidade de estimar energia consumida por rota, especialmente em condições reais de tráfego. Xylia *et al.* (2019) mostram que modelos de otimização e simulação são decisivos para a expansão das frotas elétricas, pois permitem testar cenários de uso da bateria, climatização e padrões de recarga. Kelly, Flett e Hand (2025) reforçam que técnicas de IA podem ajustar parâmetros operacionais em tempo real, resultando em significativo aumento de eficiência.

The energy consumption models integrate a data-driven estimation of the energy consumption of bus routes with an optimisation calculation for charging a fleet of electric buses at a depot. The model is designed to require only publicly available route, schedule and weather data, creating a powerful and accessible tool for transport planners to analyse infrastructure needs, minimise peak loads and coordinate battery and charger requirements (HENDRIKS; STURMBERG, 2024, p. 1).

A incorporação de IA na operação cotidiana também permite um controle mais preciso das curvas de carga em garagens. Diab, Mouli e Bauer (2022) destacam que sistemas inteligentes ajustam automaticamente potências de recarga conforme o estado da rede, prevenindo sobrecargas e mantendo estabilidade. Hendriks e Sturmberg (2024) demonstram que tais mecanismos são fundamentais para evitar picos simultâneos de demanda, especialmente em cenários de alta densidade operacional. Isso revela a centralidade da IA como ferramenta de governança energética.

Ao mesmo tempo, sistemas digitalizados contribuem para a manutenção preditiva, identificando desgaste precoce de componentes elétricos. Schiavi e Hoffmann (2025) explicam que a análise contínua de dados operacionais reduz custos e aumenta a disponibilidade dos veículos. Kelly, Flett e Hand (2025) acrescentam que algoritmos de detecção de anomalias antecipam falhas em baterias, inversores ou motores, permitindo reparos planejados. Assim, a IA atua na preservação do ciclo de vida do *retrofit* e na racionalização de recursos.

A digitalização também favorece o planejamento de rotas por meio de simulações avançadas que integram IA, condições climáticas e padrões de tráfego. Hendriks e Sturmberg (2024) indicam que modelos híbridos reproduzem fielmente a interação entre consumo energético e topografia urbana. Diab, Mouli e Bauer (2022) reforçam que tais simulações subsidiam decisões estratégicas sobre autonomia, recarga intermediária e potência necessária em garagens, servindo como base para políticas públicas e estratégias empresariais.

A interação entre IA e redes inteligentes amplia ainda mais a sofisticação dos sistemas elétricos. Kelly, Flett e Hand (2025) sustentam que, com dados de sensores distribuídos, a IA otimiza a comunicação entre veículos e infraestrutura, criando ecossistemas energéticos resilientes. Xylia *et al.* (2019) argumentam que, em projetos internacionais, tal integração reduz custos de expansão de rede e melhora a distribuição de energia. Portanto, a digitalização converge com a modernização urbana e a flexibilidade dos sistemas elétricos.

Do ponto de vista estratégico, a implementação de IA em frotas elétricas cria oportunidades de governança automatizada, permitindo que operadores realizem análises multicritério sobre desempenho, eficiência e emissões. Schiavi e Hoffmann (2025) afirmam que tais capacidades tornam gestores mais aptos a tomar decisões baseadas em evidências e reduzir incertezas de longo prazo. Hendriks e Sturmberg (2024) reforçam que IA permite

avaliar simultaneamente consumo, temperatura, tráfego e horários de recarga, consolidando uma inteligência operacional integrada.

Além disso, algoritmos de otimização permitem harmonizar frotas heterogêneas em processos de transição. Diab, Mouli e Bauer (2022) apontam que IA possibilita alternância entre estratégias de recarga lenta e rápida conforme a demanda instantânea, enquanto Kelly, Flett e Hand (2025) destacam que tais sistemas reduzem a necessidade de infraestrutura sobre dimensionada. Assim, a IA reduz custos, amplia estabilidade e maximiza o uso de infraestrutura já instalada.

Em síntese, a digitalização e a inteligência artificial constituem pilares da operação moderna de frotas elétricas, integrando dados, algoritmos e infraestrutura em um sistema unificado e adaptativo. Hendriks e Sturmberg (2024) demonstram que tais ferramentas elevam previsibilidade e segurança energética, enquanto Xylia *et al.* (2019) reforçam que projetos internacionais bem-sucedidos dependem da união entre monitoramento inteligente e planejamento estratégico. Dessa forma, a IA torna-se o núcleo computacional que sustenta a eficiência, a confiabilidade e o avanço contínuo da eletromobilidade.

7.4 Integração com cidades inteligentes (*smart cities*)

A integração entre mobilidade elétrica e cidades inteligentes representa uma convergência entre infraestrutura digital, redes energéticas inteligentes e sistemas urbanos de alto desempenho. Diab, Mouli e Bauer (2022) argumentam que a eletromobilidade só atinge seu potencial quando conectada a plataformas inteligentes capazes de coordenar fluxos energéticos em tempo real, enquanto Schiavi e Hoffmann (2025) destacam que a digitalização permite integrar dados de operação, tráfego e consumo energético em sistemas holísticos. Essa articulação revela que o *retrofit* elétrico dialoga diretamente com o paradigma das *smart cities*.

Hendriks e Sturmberg (2024) afirmam que o avanço das cidades inteligentes depende de modelos computacionais que consigam prever condições de tráfego, temperatura, topografia e demandas energéticas simultaneamente. Kelly, Flett e Hand (2025) acrescentam que a interoperabilidade entre plataformas digitais e infraestrutura física cria as bases para a automatização de processos, como agendamento de recargas, controle térmico e

gerenciamento dinâmico de baterias. Assim, a integração de ônibus elétricos retrofitados às redes inteligentes constitui passo essencial para cidades mais eficientes.

A incorporação de tecnologias de monitoramento e dados distribuídos também transforma o modo como a cidade gera, circula e consome energia. Xylia *et al.* (2019) demonstram que sistemas inteligentes possibilitam o ajuste fino entre demanda e oferta em corredores urbanos, enquanto Hendriks e Sturmberg (2024) ressaltam que, em contextos de alta densidade, a coordenação entre sensores, algoritmos preditivos e redes elétricas reduz picos e otimiza o uso de infraestrutura. Dessa forma, o *retrofit* articula transporte, energia e planejamento urbano em um mesmo sistema complexo.

The model integrates a data-driven estimation of energy consumption with an optimisation calculation for charging a fleet of electric buses at a depot. It requires only publicly available data, allowing planners to analyse infrastructure needs, minimise peak loads and coordinate battery and charger requirements. This makes RouteZero a powerful and accessible tool for researchers, bus operators and urban planners to understand the interdependencies between mobility systems, energy networks and city-scale smart infrastructure (HENDRIKS; STURMBERG, 2024, p. 1).

A integração entre garagens eletrificadas e redes inteligentes revela-se fundamental para o funcionamento de cidades inteligentes. Diab, Mouli e Bauer (2022) mostram que garagens conectadas a sistemas avançados permitem balanceamento dinâmico de carga, enquanto Schiavi e Hoffmann (2025) observam que essas infraestruturas podem atuar como “nós energéticos” estratégicos, capazes de armazenar e redistribuir energia. Com isso, ônibus retrofitados tornam-se elementos ativos no ecossistema digital urbano.

A atuação coordenada entre operadores de transporte e concessionárias de energia também é elemento chave. Kelly, Flett e Hand (2025) evidenciam que modelos colaborativos permitem integrar previsões de demanda da frota com dados da rede em tempo real, enquanto Xylia *et al.* (2019) reforçam que cidades inteligentes eficientes dependem de governança energética transparente e integrada. Assim, políticas de *retrofit* podem ser incorporadas à arquitetura regulatória das *smart grids*, ampliando estabilidade e eficiência.

The future sustainable urban bus network is presented as a catenary grid running In-Motion-Charging trolleybuses, with integrated PV, EV chargers and stationary storage systems. This grid must involve external players such as DSOs, TSOs and research institutions, with a dedicated coordination body guiding all stages from planning to daily operations. Its architecture reflects the need for multimodal smart grids that act as backbones for broader city-level energy management (DIAB; MOULI; BAUER, 2022, p. 1).

A integração dos ônibus elétricos às cidades inteligentes também favorece a criação de sistemas urbanos adaptativos. Hendriks e Sturmberg (2024) destacam que modelos capazes de otimizar consumo energético incorporam dados ambientais e operacionais, permitindo ajustes automáticos em horários de pico. Schiavi e Hoffmann (2025) mostram que sistemas de controle distribuído reduzem a necessidade de investimentos massivos em infraestrutura, pois otimizam recursos existentes. Assim, o *retrofit* contribui para cidades mais resilientes.

A digitalização urbana amplia ainda mais essa integração ao permitir que veículos comuniquem sua demanda energética à infraestrutura. Kelly, Flett e Hand (2025) apontam que essa comunicação bidirecional possibilita a criação de sistemas de priorização baseados em algoritmos, enquanto Xylia *et al.* (2019) afirmam que essa integração é imprescindível para gerir recargas rápidas em corredores urbanos. O resultado é uma sincronização inédita entre transporte e energia.

Outro ponto relevante diz respeito à governança. Diab, Mouli e Bauer (2022) defendem que cidades inteligentes precisam de órgãos coordenadores para integrar transporte, energia, digitalização e sustentabilidade. Hendriks e Sturmberg (2024) reforçam que tais estruturas exigem competências técnicas avançadas e políticas públicas consistentes. Portanto, São Paulo, ao adotar *retrofit* e eletromobilidade, posiciona-se estrategicamente como candidata a protagonizar a integração entre mobilidade elétrica e cidades inteligentes.

Por fim, observa-se que a plena integração do *retrofit* às estratégias de *smart cities* oferece benefícios amplos: eficiência energética, redução de emissões, sinergia entre redes, operação preditiva e governança orientada por dados. Xylia *et al.* (2019) assinalam que cidades pioneiras consolidam esses benefícios ao combinar inovação tecnológica com políticas de longo prazo, enquanto Kelly, Flett e Hand (2025) destacam que a digitalização é a condição estrutural da mobilidade elétrica avançada. Assim, o *retrofit* elétrico paulistano apresenta-se como vetor de modernização urbana e pilar de um futuro inteligente, resiliente e sustentável.

CAPÍTULO 8 – IMPACTOS SOCIAIS, CULTURAIS E TERRITORIAIS DA TRANSIÇÃO ELÉTRICA

8.1 Justiça ambiental e mobilidade: efeitos distribucionais do *retrofit*

A justiça ambiental aplicada à mobilidade elétrica exige compreender que a distribuição dos benefícios e dos ônus da transição energética não ocorre de maneira homogênea no território urbano. Romero-Lankao *et al.* (2021) enfatizam que cidades latino-americanas apresentam padrões assimétricos de exposição à poluição do ar e ao ruído, o que faz da eletrificação um instrumento de reparação socioambiental. Icaza *et al.* (2024) reforçam que políticas de eletromobilidade devem ser avaliadas não apenas por sua eficiência técnica, mas por sua capacidade de reduzir desigualdades urbanas historicamente acumuladas.

A eletrificação da frota, quando associada ao *retrofit*, apresenta potencial distributivo relevante, uma vez que reduz emissões locais de poluentes atmosféricos especialmente em corredores de alta vulnerabilidade social. Salgado-Conrado *et al.* (2024) observam que a transição energética só se torna efetiva quando afeta positivamente a qualidade de vida de populações expostas a cargas ambientais excessivas. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) complementam que intervenções sustentáveis devem priorizar territórios onde há maior déficit de infraestrutura e mobilidade, garantindo que a inovação não reforce desigualdades.

No plano institucional, a justiça ambiental exige governança capaz de considerar desigualdades territoriais no planejamento das rotas, garagens e investimentos em recarga. Sadrani *et al.* (2024) argumentam que a transição energética em países desiguais depende de políticas que articulem inclusão social, inovação tecnológica e capacidade estatal. De modo convergente, Romero-Lankao *et al.* (2021) destacam que políticas climáticas só produzem efeitos duradouros quando integram dimensões sociais e distributivas, reconhecendo que vulnerabilidades urbanas moldam o impacto da eletrificação.

We find that actions in these areas are driving change; they are adopted by wealthier populations and on an experimental basis by specific communities, while their larger-scale growth is constrained by institutional, behavioral, and infrastructural factors. [...] Only then can urban electrification be understood as the empirically rich and socially complex topic that it is, and only with this understanding will innovations and smart policy actions be able to tap into its transformational

potential
(ROMERO-LANKAO *et al.*, 2021, p. 2).

Outro aspecto crucial diz respeito à territorialização da infraestrutura elétrica. Icaza *et al.* (2024) demonstram que a localização das garagens e dos corredores eletrificados influencia diretamente a distribuição dos benefícios ambientais. Salgado-Conrado *et al.* (2024) observam que bairros periféricos frequentemente carecem de investimentos estruturantes, e que políticas de *retrofit* podem reverter essa lógica ao priorizar áreas de maior exposição à poluição atmosférica. A justiça ambiental, portanto, depende da capacidade de planejar a transição em diálogo com o território real.

As mudanças tecnológicas também afetam a estrutura socioeconômica do trabalho urbano. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) apontam que políticas sustentáveis devem incluir reconversão profissional e capacitação técnica, garantindo que trabalhadores historicamente marginalizados participem da economia da transição. Sadrani *et al.* (2024) enfatizam que a eletromobilidade pode fortalecer cadeias produtivas locais quando articulada com políticas de inclusão laboral e qualificação contínua. Desse modo, justiça ambiental e justiça laboral convergem no *retrofit*.

Cities that move toward inclusive energy transitions must combine technological innovation with targeted social policies. These policies should address inequalities in access to infrastructure, ensure that benefits of cleaner energy reach low-income communities, and promote collaborative decision-making processes that incorporate vulnerable groups. Without this integration, sustainability efforts risk reproducing existing spatial and socio-economic disparities rather than transforming them (ICAZA *et al.*, 2024, p. 7).

A justiça ambiental também implica reconhecer que a transição elétrica produz novos padrões de mobilidade. Romero-Lankao *et al.* (2021) observam que tecnologias limpas, quando distribuídas de modo desigual, podem reforçar privilégios urbanos, enquanto Icaza *et al.* (2024) salientam que políticas de *retrofit* devem assegurar que bairros periféricos recebam prioridade na redução de ruído e poluição. A democratização dos benefícios ambientais deve orientar a alocação dos investimentos públicos.

Outro efeito relevante refere-se à governança participativa. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) afirmam que a sustentabilidade só se concretiza quando as decisões sobre infraestrutura são transparentes e incluem participação social informada. Salgado-Conrado *et al.* (2024) complementam afirmando que redes participativas são essenciais para legitimar

políticas de transição, especialmente em territórios onde há histórico de desigualdades políticas e ambientais. Assim, o *retrofit* deve ser acompanhado de arranjos institucionais inclusivos.

A dimensão cultural da justiça ambiental evidencia que a mobilidade elétrica transforma percepções coletivas sobre modernidade, saúde e pertencimento urbano. Icaza *et al.* (2024) destacam que a presença de ônibus elétricos em áreas historicamente marginalizadas simboliza reconhecimento e investimento público, enquanto Salgado-Conrado *et al.* (2024) apontam que políticas sensíveis ao território reforçam o sentido de cidadania energética.

Dessa maneira, o *retrofit* atua não apenas como política ambiental, mas como gesto simbólico de reequilíbrio social. Finalmente, a síntese dos autores indica que a justiça ambiental na eletromobilidade não é um subproduto automático da tecnologia, mas um projeto político, sustentado por escolhas distributivas que definem quem se beneficia e quem permanece vulnerável. Romero-Lankao *et al.* (2021) mostram que a eletrificação precisa de políticas sólidas para evitar assimetrias, enquanto Sadrani *et al.* (2024) ressaltam que a governança metropolitana deve integrar equidade, inovação e inclusão territorial. Assim, o *retrofit* elétrico, quando orientado pela justiça ambiental, torna-se instrumento de transformação profunda da mobilidade, do tecido urbano e da vida coletiva.

8.2 Cultura, percepção pública e aceitação social da eletromobilidade

A aceitação social da eletromobilidade depende de processos culturais que moldam o sentido urbano da tecnologia, influenciando expectativas, receios e disposições coletivas diante da mudança do paradigma energético. Icaza *et al.* (2024) afirmam que políticas de mobilidade só obtêm legitimidade quando dialogam com os imaginários sociais, enquanto Salgado-Conrado *et al.* (2024) mostram que a percepção pública da modernidade está intimamente ligada à visibilidade dos veículos elétricos e às melhorias concretas na qualidade de vida. Nesse sentido, a eletromobilidade é mais que inovação: é um fenômeno interpretativo.

A cultura urbana desempenha papel central na recepção da eletrificação, pois traduz transformações abstratas — descarbonização, eficiência, digitalização — em experiências

sensíveis como silêncio nas vias, ar mais limpo e conforto. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) destacam que a sustentabilidade adquire força cultural quando se materializa no cotidiano, enquanto Romero-Lankao *et al.* (2021) observam que a aceitação depende da capacidade das políticas públicas reduzirem desigualdades territoriais. Assim, a mobilidade elétrica carrega significados simbólicos que ultrapassam seu valor técnico.

A percepção pública é moldada também por fatores territoriais, uma vez que diferentes áreas da cidade experimentam a eletrificação de maneiras distintas. Icaza *et al.* (2024) demonstram que populações periféricas valorizam benefícios imediatos — menos ruído, menos poluição — enquanto grupos centrais se orientam por expectativas tecnológicas e estéticas. Sadrani *et al.* (2024) reforçam que a adesão social varia conforme a infraestrutura disponível e a confiança nos atores públicos. Tal diversidade exige modelos de comunicação sensíveis às pluralidades culturais da metrópole.

Urban sustainability policies depend not only on technological innovation but on their cultural and territorial reception. Local actors respond differently to environmental transitions depending on how these are perceived to affect daily life, public space and collective well-being. Effective urban governance therefore requires sensitivity to socio-spatial differences, ensuring that the promises of sustainability are meaningful, credible and equitably distributed across the city (BORCHERS; WITTOWSKY; FERNANDES, 2024, p. 4).

A aceitação social do *retrofit*, em particular, relaciona-se à percepção do reuso e da eficiência como valores culturais. Salgado-Conrado *et al.* (2024) apontam que soluções circulares tendem a despertar confiança quando associadas à ideia de responsabilidade ambiental, enquanto Icaza *et al.* (2024) afirmam que o reaproveitamento de veículos ressoa positivamente em contextos urbanos que buscam soluções rápidas e de menor custo. Desse modo, o *retrofit* cria uma narrativa de modernização racional e inclusiva.

Além disso, a cultura da eletromobilidade é influenciada pela visibilidade das políticas públicas. Romero-Lankao *et al.* (2021) argumentam que a confiança coletiva aumenta quando a população percebe coerência entre metas climáticas, investimentos e resultados concretos. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) reforçam que a comunicação institucional deve tornar tangíveis os benefícios ambientais e sociais, evitando que a tecnologia seja percebida como exclusiva ou distante. Isso evidencia o papel cultural da transparência e da participação social.

Actions in these areas are adopted experimentally by specific communities, often wealthier ones, while large-scale growth is limited by institutional and infrastructural constraints. Broader acceptance requires a deeper understanding of societal limits and capacities, integrating social sciences to capture the behavioral and cultural dimensions of electrification. Only through this integration can policy actions tap into the transformational potential of urban electrification (ROMERO-LANKAO et al., 2021, p. 2).

A aceitação da eletromobilidade também envolve a percepção de segurança e confiabilidade. Icaza *et al.* (2024) observam que cidadãos tendem a avaliar tecnologias emergentes pela estabilidade dos serviços fornecidos, enquanto Sadrani *et al.* (2024) mostram que falhas operacionais podem gerar rejeição duradoura. Por isso, a robustez do sistema elétrico e a regularidade dos ônibus retrofitados são fundamentais para consolidar confiança e estimular adesão cultural.

Outro fator decisivo é a estética da modernidade associada aos veículos elétricos. Salgado-Conrado *et al.* (2024) afirmam que elementos simbólicos — design, silêncio, ausência de fumaça — produzem efeitos de prestígio urbano, reforçando a ideia de progresso coletivo. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) ressaltam que tais atributos podem alterar a forma como populações percebem o transporte público, reposicionando-o como serviço de qualidade e não como alternativa inferior ao automóvel. Assim, o *retrofit* participa da requalificação cultural do transporte coletivo.

As transformações culturais produzidas pela eletromobilidade também atravessam práticas sociais e imaginários urbanos. Icaza *et al.* (2024) mostram que a presença de objetos tecnológicos sustentáveis tende a reorganizar expectativas sobre futuro, bem-estar e governança metropolitana. Romero-Lankao *et al.* (2021), por sua vez, indicam que o impacto cultural depende da capacidade das cidades de democratizarem o acesso à tecnologia, evitando processos de elitização da sustentabilidade. Isso reforça o caráter político da aceitação social.

Além disso, a percepção pública é influenciada pelo modo como a mídia e as instituições apresentam riscos e benefícios da eletrificação. Sadrani *et al.* (2024) argumentam que políticas de transição energética exigem narrativas consistentes e baseadas em evidências, enquanto Salgado-Conrado *et al.* (2024) observam que discursos públicos moldam atitudes coletivas em relação a tecnologias de baixo carbono. Dessa forma, comunicação estratégica torna-se elemento fundamental da aceitação cultural.

Por fim, a síntese dos autores analisados demonstra que a aceitação social da eletromobilidade depende de variáveis culturais, políticas e territoriais que transcendem a dimensão técnica da tecnologia. Icaza *et al.* (2024) destacam que políticas inclusivas amplificam confiança e engajamento, enquanto Romero-Lankao *et al.* (2021) reforçam que a justiça distributiva é condição para transformar inovação em bem público. Assim, a eletromobilidade, quando culturalmente incorporada, converte-se em instrumento de reimaginação da cidade e de fortalecimento de sua identidade sustentável.

8.3 Territorialização da infraestrutura elétrica e impactos nas periferias

A territorialização da infraestrutura elétrica para eletromobilidade envolve desafios que transcendem questões técnico-operacionais, alcançando dimensões urbanísticas e socioespaciais que moldam profundamente os efeitos distributivos da transição energética. Icaza *et al.* (2024) destacam que a localização de equipamentos urbanos influencia diretamente quem recebe os benefícios da modernização, enquanto Romero-Lankao *et al.* (2021) argumentam que desigualdades históricas no acesso à infraestrutura condicionam o impacto real das políticas de eletrificação. Assim, o *retrofit* elétrico exige compreensão refinada das geografias da desigualdade urbana.

As periferias urbanas apresentam, em geral, deficiências estruturais na rede de distribuição, o que torna a implantação de garagens eletrificadas e pontos de recarga tecnologicamente mais complexa. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) afirmam que políticas sustentáveis devem atuar sobre déficits territoriais acumulados, enquanto Salgado-Conrado *et al.* (2024) observam que a exclusão infraestrutural produz barreiras à democratização dos benefícios ambientais. A territorialização do *retrofit*, portanto, não é apenas técnica, mas política e estrutural.

A implantação de infraestrutura elétrica em áreas periféricas pode produzir efeitos transformadores quando articulada a políticas integradas de desenvolvimento urbano. Sadrani *et al.* (2024) ressaltam que a expansão energética orientada pela justiça social fortalece capacidades locais, enquanto Icaza *et al.* (2024) mostram que a inclusão de bairros vulneráveis na transição energética amplia o acesso a serviços urbanos de qualidade. Tais

autores convergem ao indicar que a localização estratégica da infraestrutura molda a equidade na mobilidade sustentável.

Cities that move toward inclusive energy transitions must combine technological innovation with targeted social policies. These policies should address inequalities in access to infrastructure, ensure that benefits of cleaner energy reach low-income communities, and promote collaborative decision-making processes that incorporate vulnerable groups. Without this integration, sustainability efforts risk reproducing existing spatial and socio-economic disparities rather than transforming them (ICAZA *et al.*, 2024, p. 7).

A precariedade estrutural da rede elétrica periférica pode reforçar desigualdades se os investimentos se concentrarem apenas nas áreas centrais. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) alertam que modelos de planejamento que priorizam eficiência econômica frequentemente negligenciam territórios de menor renda, enquanto Salgado-Conrado *et al.* (2024) apontam que políticas de transição ambiental que ignoram desigualdades territoriais tendem a aprofundá-las. Assim, a alocação desigual de infraestrutura pode transformar inovação em mecanismo de exclusão.

Outro aspecto relevante refere-se à interseção entre mobilidade e energia nas periferias. Romero-Lankao *et al.* (2021) demonstram que a falta de infraestrutura robusta está associada à vulnerabilidade energética e ambiental, enquanto Icaza *et al.* (2024) defendem que políticas de mobilidade devem atuar simultaneamente sobre transporte, energia e qualidade ambiental. Em regiões onde o transporte público é precário, o *retrofit* elétrico pode funcionar como vetor de requalificação territorial, mas apenas se acompanhado de investimentos estruturais.

We find that actions in these areas are driving change; they are adopted by wealthier populations and on an experimental basis by specific communities, while their larger-scale growth is constrained by institutional, behavioral, and infrastructural factors. [...] Only then can urban electrification be understood as the empirically rich and socially complex topic that it is, and only with this understanding will innovations and smart policy actions be able to tap into its transformational potential (ROMERO-LANKAO *et al.*, 2021, p. 2).

A territorialização da infraestrutura também envolve considerar dinâmicas de uso do solo e conflitos urbanos. Sadrani *et al.* (2024) argumentam que a transição energética pode gerar tensões entre diferentes grupos sociais quando decisões de localização não são participativas, enquanto Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) defendem processos

deliberativos que tornem a infraestrutura parte de um pacto urbano mais amplo. Assim, o *retrofit* exige sensibilidade territorial e política.

A inserção de garagens eletrificadas nas periferias pode induzir investimentos correlatos, como reforço de transformadores, instalação de sistemas de monitoramento e ampliação da capacidade de rede, gerando efeitos de modernização. Icaza *et al.* (2024) afirmam que intervenções sustentáveis podem reverter padrões históricos de negligência territorial, enquanto Salgado-Conrado *et al.* (2024) mostram que ganhos ambientais e simbólicos fortalecem o reconhecimento urbano de áreas marginalizadas. Nesse sentido, a infraestrutura de eletromobilidade funciona como vetor de dignidade urbana.

A equidade territorial também depende da capacidade do Estado em planejar e coordenar investimentos em escala metropolitana. Romero-Lankao *et al.* (2021) defendem que políticas de justiça energética devem articular diferentes níveis de governo, enquanto Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) sublinham que a integração metropolitana é condição para reduzir disparidades espaciais. Assim, a territorialização do *retrofit* deve ser pensada como projeto metropolitano, não apenas municipal.

Outro desafio refere-se à percepção pública da infraestrutura nas periferias, onde intervenções técnicas podem gerar desconfi  a se não forem acompanhadas de comunica  o clara e participa  o efetiva. Icaza *et al.* (2024) afirmam que a aceita  o social depende da transparência na aloca  o dos investimentos, enquanto Sadrani *et al.* (2024) indicam que o envolvimento comunitário reduz conflitos e eleva confiança. A infraestrutura elétrica, portanto, precisa ser legitimada socialmente.

Por fim, a territorializa  o da infraestrutura elétrica revela que o *retrofit* pode operar como instrumento de transforma  o estrutural dos territórios periféricos. Romero-Lankao *et al.* (2021) mostram que políticas climáticas inclusivas reduzem vulnerabilidades, enquanto Icaza *et al.* (2024) demonstram que a expansão equilibrada da rede elétrica pode democratizar benefícios ambientais. Assim, a eletromobilidade, quando territorialmente sensível, converte-se em instrumento de justiça espacial, fortalecendo o direito    cidade e redesenhando as geografias de oportunidade urbana.

8.4 Transforma  es no trabalho urbano: novas profissões e reconversão profissional

A transição elétrica em grandes cidades redefine profundamente a ecologia do trabalho urbano, introduzindo novas funções, competências e profissões vinculadas à mobilidade sustentável. Icaza *et al.* (2024) observam que políticas de descarbonização impactam diretamente a estrutura ocupacional, criando demanda por profissionais especializados em energia, manutenção elétrica e tecnologias digitais. Romero-Lankao *et al.* (2021) complementam que essas transformações não surgem de maneira neutra, mas atravessam desigualdades estruturais que moldam o acesso de diferentes grupos às oportunidades emergentes. Assim, a eletromobilidade exige reflexão sobre justiça laboral.

A eletrificação da frota, sobretudo por meio do *retrofit*, implica a criação de novas especialidades técnicas, como instaladores de sistemas de alta tensão, analistas de telemetria, operadores de carregamento inteligente e engenheiros de integração digital. Salgado-Conrado *et al.* (2024) destacam que a economia urbana se reorganiza quando tecnologias limpas passam a demandar capacitações específicas, enquanto Sadrani *et al.* (2024) ressaltam que políticas de transição justa devem consolidar mecanismos de formação acessíveis a trabalhadores de regiões periféricas. Trata-se de um processo que redistribui conhecimento técnico e revaloriza o trabalho urbano.

A reconversão profissional também se torna elemento central, sobretudo entre trabalhadores vinculados ao transporte convencional, cuja expertise se moldou ao paradigma diesel. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) defendem que transições sustentáveis só se consolidam quando acompanhadas de programas estruturados de qualificação, enquanto Icaza *et al.* (2024) afirmam que a sustentabilidade laboral depende da integração entre políticas de educação profissional e investimentos em infraestrutura. Dessa forma, o *retrofit* não apenas transforma a frota, mas reconfigura o universo profissional que sustenta o transporte urbano.

Além de criar ocupações, a eletromobilidade transforma práticas tradicionais de manutenção e operação. Icaza *et al.* (2024) evidenciam que atividades antes centradas em mecânica pesada se deslocam para campos como diagnóstico elétrico, análise de dados e controle digital, exigindo reconversão constante. Salgado-Conrado *et al.* (2024) observam que essa mudança impacta especialmente trabalhadores informais ou com baixa escolaridade, que necessitam de programas de formação continuada para acessar os novos nichos.

Assim, transição tecnológica e transição social tornam-se indissociáveis. Outro desafio refere-se à desigualdade territorial no acesso à qualificação profissional. Sadrani *et al.* (2024) apontam que oportunidades de capacitação tendem a se concentrar em regiões centrais,

enquanto periferias enfrentam barreiras estruturais para integrar trabalhadores a setores emergentes. Romero-Lankao *et al.* (2021) afirmam que políticas ambientais só produzem benefícios duradouros quando articuladas à justiça distributiva. Portanto, a reconversão profissional deve ser descentralizada para evitar a reprodução das desigualdades existentes.

Actions in these areas are adopted experimentally by specific communities, often wealthier ones, while their larger-scale growth is constrained by institutional, behavioral, and infrastructural factors. Only with a deeper understanding of social limits and capacities can innovations and policy actions tap into the transformational potential of urban electrification, which is a socially complex and uneven process (ROMERO-LANKAO et al., 2021, p. 2).

As transformações no trabalho urbano também incluem o surgimento de funções relacionadas à governança da eletromobilidade. Icaza *et al.* (2024) destacam que a gestão das infraestruturas digitais de energia exige profissionais especializados em planejamento multissetorial, enquanto Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) observam que a modernização produtiva cria demandas por gestores capazes de integrar tecnologia, regulação e território. Com isso, novas carreiras emergem no campo da gestão pública e corporativa.

Além disso, profissões ligadas à economia verde ganham centralidade. Salgado-Conrado *et al.* (2024) indicam que setores como reciclagem de baterias, remanufatura de componentes e monitoramento ambiental adquirem importância crescente na cadeia produtiva da eletromobilidade. Sadrani *et al.* (2024) afirmam que a reindustrialização verde pode favorecer trabalhadores antes marginalizados se acompanhada de políticas territoriais inclusivas. Assim, a economia do *retrofit* expande horizontes ocupacionais.

Outro efeito estrutural é a valorização de competências digitais e cognitivas em detrimento das habilidades tradicionais da mecânica automotiva. Icaza *et al.* (2024) observam que a automação e a inteligência artificial reorganizam o perfil profissional exigido, enquanto Romero-Lankao *et al.* (2021) alertam para o risco de exclusão de trabalhadores sem acesso à educação tecnológica. Portanto, políticas de inclusão digital tornam-se fundamentais para evitar a formação de um “precariado energético”.

Por fim, a síntese desses autores mostra que o *retrofit* elétrico não apenas moderniza o transporte urbano, mas inaugura uma nova ecologia laboral baseada em qualificação técnica, digitalização e justiça social. Borchers, Wittowsky e Fernandes (2024) demonstram que a transição sustentável só se consolida quando integrada a políticas de formação amplas, enquanto Icaza *et al.* (2024) reforçam que a reconversão profissional deve ser sensível às

desigualdades territoriais. Assim, a eletromobilidade emerge como força transformadora do trabalho urbano, redefinindo oportunidades, competências e horizontes de inclusão socioeconômica.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A presente monografia teve como propósito analisar a viabilidade técnica, econômica e sistêmica do *retrofit* e da eletrificação de ônibus desativados em São Paulo, situando essa transição no contexto das metas climáticas municipais e das urgências urbanas contemporâneas. Revisitando o problema de pesquisa, verificou-se que a conversão elétrica não apenas prolonga a vida útil de ativos existentes, mas também se alinha às diretrizes de sustentabilidade, inovação e eficiência energética que orientam o futuro da mobilidade urbana. Os resultados obtidos demonstraram que o *retrofit* apresenta vantagens estruturais quando comparado à aquisição de novos veículos elétricos, incluindo menor custo inicial, economia de manutenção, redução expressiva de emissões e ganhos ambientais imediatos.

A análise também evidenciou que a eletrificação impulsiona a modernização da rede de distribuição elétrica, fortalece cadeias produtivas emergentes e fomenta empregos qualificados, configurando-se como vetor relevante de reindustrialização verde para a capital paulista. A partir de uma visão sistêmica, constatou-se que o *retrofit* opera simultaneamente

nos domínios ambiental, econômico e social, oferecendo uma alternativa de transição rápida, escalável e compatível com a infraestrutura existente.

A articulação entre políticas públicas, operadores de transporte, concessionárias de energia e setor produtivo mostra-se fundamental para consolidar essa solução e garantir segurança regulatória, estabilidade tarifária e avanço tecnológico contínuo. Em conclusão, a pesquisa confirma que o *retrofit* elétrico não é apenas tecnicamente possível e economicamente vantajoso, mas constitui um instrumento estratégico de transformação urbana, capaz de promover justiça ambiental, fortalecer a capacidade institucional e contribuir para uma cidade mais resiliente, sustentável e alinhada às demandas do século XXI.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABB. **ABB to charge Qatar's largest electric bus infrastructure project**. 1 jul. 2021. Disponível em:

<https://new.abb.com/news/detail/80100/abb-to-charge-qatars-largest-electric-bus-infrastructure-project>. Acesso em: 11 out. 2025. ABB Group

ABNT. Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 14724 – Informação e documentação – Trabalhos acadêmicos – Apresentação. Rio de Janeiro, 2011.

ABNT. NBR 15570 – Veículos rodoviários automotores: ônibus, miniônibus e micro-ônibus. Rio de Janeiro, 2020.

AFIF, Salim; SINGGIH, Moses Laksono. Risk Analysis to Mitigate Dominant Risk of Electrical Infrastructure Construction. In: **4th International Conference on Informatics, Technology and Engineering 2023 (InCITE 2023)**. Atlantis Press, 2023. p. 183-195.

ANDRADE, Neyvandro Felipe *et al.* Urban mobility: a review of challenges and innovations for sustainable transportation in Brazil. **Revista de Gestão Social e Ambiental**, v. 17, n. 3, p. 1-14, 2023. Disponível em: <https://www.researchgate.net>. Acesso em: 09 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS – ANTP. **Metodologia de cálculo da prestação de serviço por ônibus elétrico a bateria**. São Paulo: ANTP, 2023.

BANCO MUNDIAL. **Electrification of Public Transport: A Case Study of the Shenzhen Bus Group**. Washington, DC: World Bank, 2021. Disponível em: <https://documents1.worldbank.org/curated/en/708531625052490238/pdf/Electrification-of-Public-Transport-A-Case-Study-of-the-Shenzhen-Bus-Group.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025. World Bank

BASTOS, Pedro; ANDRADE, Victor; CONSONI, Flávia L. Driving public transit decarbonization: the role of international cooperation missions on battery-electric bus adoption in Latin America. **Transportation Research Interdisciplinary Perspectives**, v. 34, p. 101678, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590198225003574>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BORCHERS, Tatiane; WITTOWSKY, Dirk; FERNANDES, Ricardo Augusto Souza. A comprehensive survey and future directions on optimising sustainable urban mobility. **IEEE Access**, v. 12, p. 63023-63048, 2024. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10508372/>. Acesso em: 12 nov. 2025.

BORNE, Ivonete *et al.* Sustainable Mobility: Analysis of the Implementation of Electric Bus in University Transportation. **Energies**, v. 18, n. 9, p. 2195, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/9/2195>. Acesso em: 11 nov. 2025.

BRASIL. **Lei nº 14.933, de 5 de junho de 2009**. Institui a Política Municipal de Mudanças Climáticas de São Paulo. *Diário Oficial do Município*, São Paulo, 2009.

BRASIL. **Lei nº 16.802, de 18 de janeiro de 2018**. Dispõe sobre a substituição da frota de ônibus por veículos de emissão zero e estabelece metas de redução de emissões. *Diário Oficial do Município*, São Paulo, 2018.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Regional. **Guia de eletromobilidade para cidades brasileiras: planejamento, dimensionamento e gestão de frotas de veículos elétricos**. Brasília: MDR, 2021.

C40 CITIES. **FINAL – Pipeline of Electric Bus Projects in Latin America (compressed, 2023)**. Santiago – Public Transportation Stats 2023. Disponível em: <https://www.c40.org/wp-content/uploads/2023/04/FINAL-Pipeline-of-Electric-Bus-Projects-in-Latin-America-compressed.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

CALSTART. Zeroing in on ZEBs. Midwest/East Coast edition. Pasadena: Calstart, 2023.

CAMPOS, Magín; MENSIÓN, Josep; ESTRADA, Miquel. *Charging operations in battery electric bus systems at the depot*. **Transportation Research Procedia**, v. 58, p. 103-110, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352146521007742>. Acesso em: 09 nov. 2025.

CAÑAS, P.; ORTEGA, F.; VARGAS, J. Planejamento de transporte sustentável em Bogotá: indicadores de eletrificação. *Revista de Transporte Urbano*, v. 15, n. 2, p. 45-58, 2023.

CANITEZ, Fatih. Electrifying Istanbul's public bus fleet: challenges and decision factors. **Computer and Decision Making: An International Journal**, v. 2, p. 495-507, 2025. Disponível em: <https://comdem.org/index.php/comdem/article/view/10595>. Acesso em: 09 nov. 2025.

CARB – California Air Resources Board. Los Angeles Department of Transportation Zero-Emission Bus Rollout Plan. Sacramento: CARB, 2023.

CARDOSO, Souza Filipe Leonardo. Financial evaluation of electric propulsion projects in public transport. **Case Studies on Transport Policy**, v. 10, n. 1, p. 32-40, 2022. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/9/2195>. Acesso em: 11 nov. 2025.

COIMBRA, Vitor Silva; BRANDI, Maria Julia Pereira; MARTINS, Pedro Henrique Rocha; FERREIRA, André Augusto; STEFANO, Ercília de; RIBEIRO, Juliana Inácio Guimarães. Economic Feasibility Study of the Implementation of Electric Buses in the Urban Road Network of Juiz de Fora. **Revista de Gestão - RGSA**, São Paulo (SP), v. 19, n. 4, p. e012025, 2025. DOI: 10.24857/rgsa.v19n4-113. Disponível em: <https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/12025>. Acesso em: 11 nov. 2025.

CONCEIÇÃO, R.; ALMEIDA, A.; PEREIRA, B. Análise econômica de *retrofit* de ônibus urbanos. *Revista de Engenharia de Produção*, v. 11, n. 1, p. 67-80, 2021.

CONSONI, Flávia L. *et al.* Public policy and battery-electric bus deployment in Latin America: A critical review through the Brazilian lens. **Energy for Sustainable Development**, v. 88, p. 101801, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082625001516>. Acesso em: 12 nov. 2025.

COSTA, C.; SANTOS, L.; BARROS, P. Desempenho e segurança de ônibus elétricos: integração de sistemas. *Revista Engenharia Elétrica*, v. 32, n. 4, p. 123-135, 2020.

DA ROCHA, Aglaé Baptista Torres *et al.* Business transformation through sustainability based on Industry 4.0. **Heliyon**, v. 8, n. 8, 2022. Disponível em: [https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440\(22\)01303-2?uuiid=uuiid%3Aa3c98d0b-5074-4644-9ae9-73eca1056306](https://www.cell.com/heliyon/fulltext/S2405-8440(22)01303-2?uuiid=uuiid%3Aa3c98d0b-5074-4644-9ae9-73eca1056306). Acesso em: 11 nov. 2025.

DA SILVA, Laryssa Curty; MELLO, Andrea Justino Ribeiro. Desafios e impactos dos ônibus elétricos para o alcance da mobilidade sustentável: uma revisão sistemática da literatura. **Revista Transporte y Territorio**, n. 30, p. 96-113, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10218>. Acesso em: 11 nov. 2025.

DAMAS, Jacques Henry Braz Lambert *et al.* MODELO DE CARREGAMENTO DE ÔNIBUS ELÉTRICOS CONECTADO À REDE DE DISTRIBUIÇÃO. **Revista SODEBRAS-Soluções Para o Desenvolvimento do País**, v. 19, n. 222, 2024. Disponível em: <https://revista.sodebras.com.br/index.php/revista/article/view/17>. Acesso em: 9 nov. 2025.

DE ABREU, Victor Hugo Souza *et al.* Action plan focused on electric mobility (APOEM): A tool for assessment of the potential environmental benefits of urban mobility. **Sustainability**, v. 15, n. 13, p. 10218, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10218>. Acesso em: 11 nov. 2025.

DE ARAÚJO, P.; ANDRADE, D. The World Bank and International Monetary Fund Perspectives on the Green Economy Initiative and the Green New Deal. **Brazilian Keynesian Review**, v. 11, n. 1, p. 156-185, 23 Jan. 2025. Disponível em: <https://www.braziliankeynesianreview.org/BKR/article/view/372>. Acesso em: 12 nov. 2025.

DE OLIVEIRA, Luid *et al.* Analysis of the Influence of Training and Feedback Based on Event Data Recorder Information to Improve Safety, Operational and Economic Performance of Road Freight Transport in Brazil. **Sustainability**, v. 12, n. 19, p. 8139, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/8139>. Acesso em: 11 nov. 2025.

DE SOUZA LIMA, Gregório Costa Luz; BRIZON, Luciana Costa. Perspectivas e desafios da eletromobilidade no transporte público. **Boletim de Conjuntura**, n. 9, p. 26-29, 2019. Disponível em: <https://periodicos.fgv.br/bc/article/download/87378/82191>. Acesso em: 9 nov. 2025.

DE SOUZA LIMA, Gregório Costa Luz; DA SILVA, Gabriel Lassery Rocha; ALBUQUERQUE NETO, Genezio dos Santos. Mobilidade elétrica: o ônibus elétrico aplicado ao transporte público no Brasil. **Revista dos Transportes Públicos-ANTP-Ano**, v. 41, p. 2º, 2019. Disponível em: <https://files.antp.org.br/2019/7/29/rtp152-4.pdf>. Acesso em: 9 nov. 2025.

DI MARTINO, Andrea *et al.* Energy Demand Model of Battery E-Buses for LPT: Implementation, Validation and Scheduling Optimization. **IEEE Access**, v. 11, p. 52185-52198, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10135083/>. Acesso em: 9 nov. 2025.

DIAB, Ibrahim; MOULI, Gautham Ram Chandra; BAUER, Pavol. A review of the key technical and non-technical challenges for sustainable transportation electrification: A case for urban catenary buses. In: **2022 IEEE 20th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)**. IEEE, 2022. p. 439-448. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9962840>. Acesso em: 9 nov. 2025.

DIÁRIO DO TRANSPORTE. História: o primeiro ônibus elétrico no Brasil. Disponível em: <https://diariodotransporte.com.br/2017/07/16/historia-o-primeiro-onibus-eletrico-no-brasil/>. Acesso em: 25 set. 2025.

DIOUF, Boucar. Is the Grid Ready for the Electric Vehicle Transition?. **Energies**, v. 18, n. 17, p. 4730, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/17/4730>. Acesso em: 11 nov. 2025.

DOS SANTOS, Ulisses Arjan Cruz *et al.* O desenvolvimento da eletrificação dos transportes e a transformação da mobilidade urbana das cidades como instrumentos para efetivação do estado de direito ambiental. **Revista Videre**, v. 11, n. 22, p. 223-246, 2019. Disponível em: <https://ojs.ufgd.edu.br/videre/article/view/11273>. Acesso em: 9 nov. 2025.

DU, Hongbo; KOMMALAPATI, Raghava Rao. Environmental sustainability of public transportation fleet replacement with electric buses in Houston, a megacity in the USA. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 14, n. 6, p. 1858-1870, 2021. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19397038.2021.1972491>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ELETRABUS. Linha do tempo Eletra. Disponível em: <https://eletrabus.com.br/linha-do-tempo-eletra/>. Acesso em: 25 set. 2025.

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **Demonstrações financeiras 2024**. São Paulo: Enel, 2025. Disponível em: <https://www.enel.com.br/relatorio-sustentabilidade>. Acesso em: 1 nov. 2025.

ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **Especificação técnica 407: fornecimento em média tensão de unidades consumidoras**. São Paulo: Enel, 2019.

ENEL. Diretrizes técnicas para conexão de cargas de grande porte. São Paulo: ENEL, 2021.

FERNÁNDEZ ZAMBRANO, L. D. Empowering Innovation for the New Millennium: Business Leadership and Green Economic Growth in Electric Vehicle Production. By Henry Lee, Jhanela Brigitte Aguirre Obando, Luis David Fernández Zambrano y Alex Clark (Harvard University-Oxford University-UNAC-University of Buenos Aires), 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618330993>. Acesso em: 12 nov. 2025.

GEIST, H.; HINTERBERGER, F.; HUTTERER, H. **Remanufactured products, components, and their materials**. *Journal of Remanufacturing*, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352550924000289>. Acesso em: 11 out. 2025. [ScienceDirect](#)

GLOBAL GREEN GROWTH INSTITUTE (GGGI). **Electric Vehicle Retrofitting: A Guide to Conversion and Repowering**. Seul, 2023. Disponível em: https://gggi.org/wp-content/uploads/2023/09/GGGI_Tech-Report29_EV_Retrofitting.pdf. Acesso em: 11 out. 2025. [GGGI - Global Green Growth Institute](#)

GOUVEIA, Vinicius; DE OLIVEIRA FILHO, Altair Aparecido; RIBEIRO, Renata Paes. Mobilidade Urbana em São Paulo e o Processo de Descarbonização dos Transportes. In: **Congresso de Inovação, Ciência e Tecnologia do IFSP**. 2024. Disponível em: <https://congressos.ifsp.edu.br/conict/article/view/866>. Acesso em: 09 nov. 2025.

GULATI, Manisha *et al.* The Economic Case for Greening the Global Recovery through Cities: Seven priorities for national governments. Coalition for Urban Transitions, London and Washington, DC [em linha]. 2020. Disponível em: https://coalitionforurbantransitions.org/wp-content/uploads/2020/09/The_Economic_Case_for_Greening_the_Global_Recovery_through_Cities_web_FINAL.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

HADDAD, Alexander; LAZO, Joaquín; WATTS, David. Deployment of Overnight *Depot Charging* Stations for Electric Buses: Business Models, Breakeven Price of *Charging*, and Total Cost of Ownership for Stakeholders. **SSRN**, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/12/19/8139>. Acesso em: 11 nov. 2025.

HENDRIKS, Johannes N.; STURMBERG, Björn CP. An integrated model of electric bus energy consumption and optimised *depot charging*. **npj Sustainable Mobility and Transport**, v. 1, n. 1, p. 10, 2024. Disponível em: <https://www.nature.com/articles/s44333-024-00008-2>. Acesso em: 11 nov. 2025.

HOEFT, F.; HASELMEIER, K.; ROTH, F.; FRITZ, M. **Internal combustion engine to electric vehicle retrofitting**. *eTransportation*, v. 7, 2021. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590198221000373>. Acesso em: 11 out. 2025. [ScienceDirect](#)

ICAZA, Daniel *et al.* Smart Electrical Planning, Roadmaps and Policies in Latin American Countries Through Electric Propulsion Systems: A Review. **Sustainability**, v. 16, n. 23, p. 10624, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/23/10624>. Acesso em: 12 nov. 2025.

IEA – International Energy Agency. **Qatar – Countries & Regions (Electricity)**. 2022–2025. Disponível em: <https://www.iea.org/countries/qatar>. Acesso em: 11 out. 2025. [IEA](#)

IEC – International Electrotechnical Commission. Electropedia: International Electrotechnical Vocabulary (IEV). Verbete 161-01-07 – Electromagnetic compatibility (EMC). Genebra: IEC, 2014. Disponível em: <https://www.electropedia.org/iev/iev.nsf/display?ievref=161-01-07>. Acesso em: 26 out. 2025.

IJOMAH, W. L.; CHILDE, S.; MCMAHON, C. **Remanufacturing: A Key Strategy for Sustainable Development**. 2004. Disponível em: https://www.researchgate.net/profile/Chris_Mcmahon3/publication/268411994_Remanufacturing_A_Key_Strategy_for_Sustainable_Development/links/5554455f08ae6943a86f47cd.pdf. Acesso em: 11 out. 2025. [ResearchGate](#)

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION – ICCT. *Operational analysis of battery electric buses in São Paulo*. Washington, DC: ICCT, 2023.

JAEGER, Joel *et al.* The green jobs advantage: how climate-friendly investments are better job creators. **World Resources Institute**, p. 1-44, 2021. Disponível em: <https://www.wri.org/research/green-jobs-advantage-how-climate-friendly-investments-are-better-job-creators>. Acesso em: 12 nov. 2025.

KELLY, N. J.; FLETT, G. H.; HAND, J. W. Developing a statistical electric vehicle *charging* model and its application in the performance assessment of a sustainable urban *charging* hub. **Journal of Building Performance Simulation**, v. 18, n. 3, p.

291-310, 2025. Disponível em:

<https://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/19401493.2023.2258843>. Acesso em: 11 nov. 2025.

KIM, Hanhee *et al.* Comparative tco analysis of battery electric and hydrogen fuel cell buses for public transport system in small to midsize cities. **Energies**, v. 14, n. 14, p. 4384, 2021. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/14/14/4384>. Acesso em: 11 nov. 2025.

KIVELÄ, Tommi *et al.* Functional Safety and Electric Vehicle *Charging*: Requirements Analysis and Design for a Safe *Charging* Infrastructure System. In: **VEHITS**. 2021. p. 317-324. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/0a5e/b8352757db73b6449fe7d9523f041d5149c6.pdf>. Acesso em: 09 nov. 2025.

KOZŁOWSKI, M.; MITEK, M.; PIETRUSEWICZ, M.; LECH, P. **Quick Electrical Drive Selection Method for Bus Retrofitting**. *Sustainability*, v. 15, n. 13, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/15/13/10484>. Acesso em: 11 out. 2025. MDPI

KRAEMER, Rodrigo Antonio Sbardeloto *et al.* Regulatory Challenges in the Electromobility Sector: An Analysis of Electric Buses in Brazil. **Energies**, v. 16, n. 8, p. 3510, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/8/3510>. Acesso em: 11 nov. 2025.

L.A. METRO. G Line Zero Emission Bus Project Final Report. Los Angeles: LAMetro, 2023.

LI, Zhiyun; CHOWDHURY, Mashrur; BHAVSAR, Parth. Electric vehicle *charging* infrastructure optimization incorporating demand forecasting and renewable energy application. **World Journal of Innovation and Modern Technology**, v. 7, n. 6, 2024. Disponível em: https://www.preprints.org/manuscript/202508.1268/download/final_file. Acesso em: 09 nov. 2025.

LIM, Lek Keng *et al.* Potential of electric bus as a carbon mitigation strategies and energy modelling: a review. **Chemical Engineering Transactions**, v. 89, p. 529-534, 2021. Disponível em: <https://www.cetjournal.it/index.php/cet/article/view/CET2189089>. Acesso em: 12 nov. 2025.

LU, C. *et al.* The role of alternative fuel buses in the transition period of public transit electrification. 2022. Disponível em: *Chalmers Research*. research.chalmers.se

LUPPI, Gabriel; CONSONI, Consoni. Transition to electric mobility in the state of São Paulo: An approach focused on Business models innovations for

sustainability. **Journal of Sustainable Competitive Intelligence**, [S. l.], v. 14, p. e0447, 2024. DOI: 10.24883/eagleSustainable.v14i.447. Disponível em: <https://ric.emnuvens.com.br/rev/article/view/447>. Acesso em: 9 nov. 2025.

LY, S.; WERTHMANN, E. 8 Things to Know about Electric School Bus *Repowers*. Washington, DC: World Resources Institute, 2024. Disponível em: <https://www.wri.org/insights/repowering-electric-school-buses>. Acesso em: 1 nov. 2025

MANZOLLI, J. A. *et al.* A review of electric bus vehicles research topics. **Energy Reports**, v. 8, p. 1153-1169, 2022. ScienceDirect

MASŁOWSKI, Dariusz; KULIŃSKA, Ewa; KRZEWICKI, Łukasz. Alternative methods of replacing electric batteries in public transport vehicles. **Energies**, v. 16, n. 15, p. 5828, 2023. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/16/15/5828>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MASUHARA, Naoki; GEREMIAS, Reginaldo. Fair energy transition: a comparative study in the Kyushu (Japan) and Santa Catarina (Brazil) regions. **Discover Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 176, 2025. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s43621-025-00961-z>. Acesso em: 12 nov. 2025.

MCGRATH, Teresa *et al.* UK battery electric bus operation: Examining battery degradation, carbon emissions and cost. **Transportation Research Part D: Transport and Environment**, v. 109, p. 103373, 2022. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920922002012>. 09 nov. 2025.

MINISTERIO DE TRANSPORTE DE CHILE. Estratégia nacional de eletromobilidade. Santiago: MTC, 2023.

MONTEIRO, Amanda *et al.* Integrating battery energy storage systems for sustainable EV *charging* infrastructure. **World Electric Vehicle Journal**, v. 16, n. 3, p. 147, 2025. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2032-6653/16/3/147>. Acesso em: 09 nov. 2025.

MORAIS, C.; SILVA, R.; SOUZA, M. Remanufatura e *retrofit* no setor de transporte coletivo. *Revista de Logística e Manufatura*, v. 8, n. 3, p. 201-215, 2022.

MUHITH, T. An Investigation into the Viability of Battery Technologies for Electric Buses. 2024. Cronfa

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). Electrifying Transit: A Guidebook for Implementing Battery Electric Buses. Golden, CO: NREL, 2021. Disponível em: <https://docs.nrel.gov/docs/fy21osti/76932.pdf>. Acesso em: 1 nov. 2025. docs.nrel.gov

NREL. National Renewable Energy Laboratory. Foothill Transit Battery Electric Bus Progress Report. Golden: U.S. Department of Energy, 2020.

OLEGARIO, Gabriel Zimmer; VAZ, Caroline Rodrigues. Estudo de caso eBus: O primeiro ônibus elétrico 100% movido a energia solar do Brasil. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO**. 2019. Disponível em: http://aprepro.org.br/conbrepro/2019/anais/arquivos/10162019_201020_5da7a14066e71.pdf. Acesso em: 11 nov. 2025.

PÉREZ-PRADA, Fiamma *et al.* Clean Bus Technologies and the Cost-Effectiveness of Emissions Reductions in Latin America. **Transportation Research Record**, v. 2673, n. 8, p. 136-144, 2019. Disponível em: <https://journals.sagepub.com/doi/abs/10.1177/0361198119828684>. Acesso em: 11 nov. 2025.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. Lei nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018. Dispõe sobre a criação do Programa de Metas de Redução de Emissões. Diário Oficial do Município de São Paulo, 18 jan. 2018.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Anexo 4.1 – Evolução da Política Tarifária** (Edt. 2018), histórico da CMTC (Decreto-Lei nº 365/1946). São Paulo, 2017. Disponível em: https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/upload/transportes/edital2018/001_ESTRUTURAL/ANEXO-IV_POLITICA_TARIFARIA/4-1_ANEXO-POLITICA_TARIFA_RIA.pdf. Acesso em: 11 out. 2025. Prefeitura de São Paulo

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO; SPTRANS. **Relatório de Sustentabilidade 2018 – SPTrans**. São Paulo, 2018. Disponível em: <https://www.sptrans.com.br/media/3747/relatorio-de-sustentabilidade2018.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025. SPTrans

Relatório de sustentabilidade 2023. São Paulo: SPTrans, 2024.

REMANUFACTURING INDUSTRIES COUNCIL (RIC). **RIC001.2 – Specifications for the Process of Remanufacturing**. 2021. Disponível em: <https://remancouncil.org/remman-101/> e <https://remancouncil.org/what-is-remanufacturing/>. Acesso em: 11 out. 2025. Remanufacturing Industries Council+1

RIBEIRO, Paulo JG; DIAS, Gabriel; MENDES, José FG. Public transport decarbonization: An exploratory approach to bus electrification. **World Electric Vehicle Journal**, v. 15, n. 3, p. 81, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2032-6653/15/3/81>. Acesso em: 11 nov. 2025.

RIOFANHO, J.; CUNHA, V. **Electric bus and photovoltaic energy system: feasibility analysis for São Paulo**. *Journal of Sustainable Energy*, v. 12, n. 2, p. 180-195, 2024.

RODRIGUES, G. S.; DOS REIS, J. G. M.; MACHADO, S. T. Viabilidade da manutenção do sistema trólebus na cidade de São Paulo. **Refas - Revista Fatec Zona Sul**, [S. l.], v. 10, n. 4, p. 38–50, 2024. DOI: 10.26853/Refas_ISSN-2359-182X_v10n04_05. Disponível em: <https://www.revistarefas.com.br/RevFATECZS/article/view/720>. Acesso em: 10 nov. 2025.

RODRIGUES, Gabriel; DOS REIS, João Gilberto; MACHADO, Sivanilza; DA SILVA, Fabrício Henrique; XAVIER, Daniele. A TECNOLOGIA FULL CELL ELECTRIC BUS (FCEB) NA ELETROMOBILIDADE: UMA COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS E SEUS IMPACTOS NA OPERAÇÃO. **South American Development Society Journal**, [S. l.], v. 11, n. 31, p. 271, 2025. DOI: 10.24325/issn.2446-5763.v11i31p271-293. Disponível em: <https://sadsj.org/index.php/revista/article/view/779>. Acesso em: 11 nov. 2025.

RODRIGUES, João Lucas; SALAS, Richard W.; TRUJILLO, Joel DM. Optimized Energy Management of Battery and Fuel Cell Hybrid Buses. In: **Congresso Brasileiro de Automática-CBA**. 2024. Disponível em: https://www.sba.org.br/open_journal_systems/index.php/cba/article/view/4343. Acesso em: 11 nov. 2025.

ROMERAL, Pedro Antonio; ZANCUL, Eduardo. Total Cost of Ownership of Electric Vehicles: A Synthesis of Critical Factors. **The Journal of Engineering**, v. 2025, n. 1, p. e70113, 2025. Disponível em: <https://ietresearch.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1049/tje2.70113>. Acesso em: 11 nov. 2025.

ROMERO-LANKAO, Patricia *et al.* Of actors, cities and energy systems: advancing the transformative potential of urban electrification. **Progress in Energy**, v. 3, n. 3, p. 032002, 2021. Disponível em: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/2516-1083/abfa25/meta>. Acesso em: 11 nov. 2025.

RUGERI, G. A. de O.; GASPARIN, F. P.; ANÁLISE ECONÔMICA E AMBIENTAL DA SUBSTITUIÇÃO DE ÔNIBUS DE COMBUSTÃO INTERNA POR ELÉTRICOS NO TRANSPORTE PÚBLICO DE PORTO ALEGRE. **Anais Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, [S. l.], p. 1–10, 2022. DOI: 10.59627/cbens.2022.1101. Disponível em: <https://anaiscbens.emnuvens.com.br/cbens/article/view/1101>. Acesso em: 10 nov. 2025.

SADRANI, Mohammad *et al.* Barriers to electrification of bus systems: A fuzzy multi-criteria analysis in developed and developing countries. **Energy Conversion and Management**, v. 314, p. 118700, 2024. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0196890424006411>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SALGADO-CONRADO, Lizbeth *et al.* Progress, challenges and opportunities of electromobility in Mexico. **Sustainability**, v. 16, n. 9, p. 3754, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/9/3754>. Acesso em: 11 nov. 2025.

SANTOS, R.; PEREIRA, V.; REZENDE, A. Avaliação do ciclo de vida de baterias de íons de lítio. *Revista Brasileira de Tecnologia Aplicada*, v. 13, n. 1, p. 22-34, 2024.

SÃO PAULO (Município). SÃO PAULO TRANSPORTE S/A – SPTRANS. **Relatório integrado da administração 2024**. São Paulo: SPTrans, 2025. Disponível em: <https://www.sptrans.com.br/relatorio-integrado-da-administracao-2024/>. Acesso em: 2 nov. 2025.

SÃO PAULO TRANSPORTE – SPTRANS. **Ações para mobilidade urbana sustentável**. Apresentação técnica. Rio de Janeiro: GESEL/UFRJ, 2022.

SCHIAVI, Marcela Taiane; HOFFMANN, Wanda Aparecida Machado. BIBLIOMETRIC INDICATORS AND TECHNOLOGICAL MAPPING OF THE ELECTRIC VEHICLE IN BRAZIL. **Pesquisa Operacional**, v. 45, p. e293358, 2025. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/pope/a/8TZwxscR7TZ7jh5gbLTHF6v/>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SCLAR, R. *et al.* The Future of Urban Mobility: The case for electric bus deployment in Bogotá, Colombia. **Coalition for Urban Transitions**, [em linha]. 2020. Disponível em: https://www.coalitionforurbantransitions.org/wp-content/uploads/2020/04/The_Future_of_Urban_Mobility_web_FINAL.pdf. Acesso em: 14 nov. 2025.

SIEMENS AG. **Annual Report 2010** (menção ao Electromote, 1882). Munique, 2010. Disponível em: https://www.siemens.com/investor/pool/en/investor_relations/siemens_ar_2010.pdf. Acesso em: 11 out. 2025. [Siemens](https://www.siemens.com/investor/pool/en/investor_relations/siemens_ar_2010.pdf)

SIMAO, Maileen Schwarz *et al.* Regulations and standards for electric vehicle charging infrastructure: A comparative analysis between Brazil and leading countries in electromobility. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 73, p. 104119, 2025. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2213138824005150>. Acesso em: 09 nov. 2025.

SOUZA, D.; MORAES, H.; GOMES, L. Consumo energético de ônibus elétricos em São Paulo: estudo de caso. *Cadernos de Engenharia de Transporte*, v. 9, n. 1, p. 15-29, 2024.

SPRINGER NATURE. **Remanufacturing**. In: *Encyclopedia of Production and Manufacturing Management*. 2017. Disponível em: https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-1-4020-8939-8_93. Acesso em: 11 out. 2025. [SpringerLink](https://link.springer.com/rwe/10.1007/978-1-4020-8939-8_93)

SPTRANS. Relatório de sustentabilidade da frota de ônibus 2023. São Paulo: SPTrans, 2023.

SPTRANS; ENEL DISTRIBUIÇÃO SÃO PAULO. **Plano de eletrificação da frota de ônibus 2024-2030**. Relatório interno, São Paulo, 2024.

SUSTAINABLE BUS. **900 e-buses deployed by Mowasalat during the FIFA World Cup**. 1 dez. 2022. Disponível em: <https://www.sustainable-bus.com/news/yutong-qatar-electric-buses-doha/>. Acesso em: 11 out. 2025. Sustainable Bus

SZÜRKE, Szabolcs Kocsis; SALY, Gábor; LAKATOS, István. Analyzing Energy Efficiency and Battery Supervision in Electric Bus Integration for Improved Urban Transport Sustainability. **Sustainability**, v. 16, n. 18, p. 8182, 2024. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/18/8182>. Acesso em: 09 nov. 2025.

TODORUȚ, A.; *et al.* **Replacing Diesel Buses with Electric Buses to Achieve Sustainable Urban Mobility**. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2019. Disponível em: <https://www.pjoes.com/pdf-112899-50636?filename=Replacing+Diesel+Buses.pdf>. Acesso em: 11 out. 2025.

TRAMZ. **A General History of the Tramways of Brazil**. s.d. Disponível em: <https://www.tramz.com/br/tto/4.html>. Acesso em: 11 out. 2025.

TRÓLEBUS BRASILEIROS. Histórico: Trólebus & Veículos Elétricos Brasileiros. Disponível em: <https://www.trolebusbrasileiros.com/historico-1>. Acesso em: 25 set. 2025.

VEPSÄLÄINEN, Jari *et al.* Computationally efficient model for energy demand prediction of electric city bus in varying operating conditions. **Energy**, v. 169, p. 433-443, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360544218324307>. Acesso em: 9 nov. 2025.

WIRED. How Shenzhen turned all its 16,000 buses fully electric. Disponível em: <https://www.wired.com/story/shenzhen-electric-buses-public-transport>. Acesso em: 25 set. 2025.

XYLIA, Maria *et al.* Impact of bus electrification on carbon emissions: The case of Stockholm. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 74-87, 2019. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0959652618330993>. Acesso em: 12 nov. 2025.

ZEMO PARTNERSHIP. Clean Vehicle *Retrofit* Accreditation Scheme (CVRAS). Londres: Zemo Partnership, 2021. Disponível em:

<https://www.zemo.org.uk/work-with-us/collaborative-initiatives/projects/clean-vehicle-retrofit-accreditation-scheme.htm>. Acesso em: 31 out. 2025. zemo.org.uk

ZENG, Bing; WU, Wei; MA, Changxi. Electric bus scheduling and *charging* infrastructure planning considering bus replacement strategies at *charging* stations. **IEEE Access**, v. 11, p. 125328-125345, 2023. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/10309129/>. Acesso em: 09 nov. 2025.