

DESAFIOS E OPORTUNIDADES NA ELETRIFICAÇÃO DO TRANSPORTE PÚBLICO: GOVERNANÇA, TCO E INFRAESTRUTURA PARA A MOBILIDADE URBANA SUSTENTÁVEL

**CHALLENGES AND OPPORTUNITIES IN PUBLIC TRANSPORT
ELECTRIFICATION: GOVERNANCE, TCO, AND INFRASTRUCTURE FOR
SUSTAINABLE URBAN MOBILITY**

Engenharias, Ciências Sociais Aplicadas • 04/08/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/785536765](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/785536765)

Eduardo Dalcin Castilha¹

Jorge Javier Gimenez Ledesma²

RESUMO

A eletrificação do transporte público coletivo reúne objetivos de descarbonização, qualidade do ar, eficiência energética e modernização da gestão urbana. Este artigo analisa benefícios, desafios, custos, barreiras administrativas e oportunidades associados à implantação de ônibus elétricos no Brasil. A pesquisa adotou revisão sistemática da literatura, orientada pelo PRISMA 2020, com buscas realizadas em julho de 2026 no Google Scholar, arXiv, Crossref Metadata Search e SciELO. Foram identificados 48 registros, 39 permaneceram após a remoção de duplicidades e 18 estudos publicados entre 2014 e 2026 compuseram a síntese qualitativa. A extração considerou método, contexto, tecnologia, infraestrutura, custo total de propriedade, desempenho ambiental, operação, governança e implicações gerenciais. Os resultados indicam que ônibus elétricos oferecem elevada eficiência energética, redução de emissões locais, menor ruído e potencial de economia operacional ao longo do ciclo de vida. A viabilidade depende da intensidade de uso, do perfil das rotas, da estratégia de recarga, das tarifas de energia, da vida útil das baterias, do desenho contratual e da capacidade de coordenação entre poder público, operadores, concessionárias de energia, financiadores e fornecedores. A literatura recente amplia o foco sobre recarga inteligente, armazenamento, dados abertos, otimização robusta e integração veículo-rede. Para o Brasil, a transição tende a produzir resultados superiores quando estruturada por fases, apoiada em dados reais de operação, contratos orientados ao desempenho, mecanismos financeiros compatíveis com ativos de longa duração e governança transparente.

Palavras-chave: Mobilidade elétrica; Transporte público; Ônibus elétricos; Custo total de propriedade; Gestão pública.

ABSTRACT

The electrification of public transport combines decarbonization, air-quality improvement, energy efficiency, and modernization of urban management. This article analyzes the benefits, challenges, costs, administrative barriers, and opportunities associated with the deployment of electric buses in Brazil. The study adopted a systematized literature review guided by PRISMA 2020, with searches conducted in July 2026 in Google Scholar, arXiv, Crossref Metadata Search, and SciELO. Forty-eight records were identified, 39 remained after duplicate removal, and 18 studies published between 2014 and 2026 were included in the qualitative synthesis. Data extraction covered methods, contexts, technologies, infrastructure, total cost of ownership, environmental performance, operations, governance, and managerial implications. The findings indicate that electric buses provide high energy efficiency, lower local emissions, reduced noise, and potential operating savings over their life cycle. Feasibility depends on utilization intensity, route profiles, charging strategies, electricity tariffs, battery life, contract design, and the ability to coordinate public authorities, operators, utilities, financiers, and suppliers. Recent literature expands the analytical focus toward smart charging, stationary storage, open data, robust optimization, and vehicle-to-grid integration. In Brazil, the transition tends to deliver stronger results when organized in phases, supported by real operational data, performance-oriented contracts, financial mechanisms aligned with long-lived assets, and transparent governance.

Keywords: Electric mobility; Public transport; Electric buses; Total cost of ownership; Public management.

1. INTRODUÇÃO

A mobilidade urbana condiciona o acesso cotidiano ao trabalho, à educação, à saúde, à cultura e aos demais serviços que estruturam a vida social. Em cidades extensas e desiguais, o desempenho do transporte coletivo influencia diretamente a distribuição de oportunidades, o tempo disponível das famílias e a produtividade econômica. A Política Nacional de Mobilidade Urbana consolidou princípios de acessibilidade universal, equidade, eficiência, integração modal e mitigação dos custos ambientais, sociais e econômicos dos deslocamentos. Dentro desse marco, a qualificação do ônibus urbano possui relevância estratégica, pois esse modo atende ampla parcela das viagens coletivas e alcança territórios com densidades, rendas e padrões de ocupação muito distintos (Brasil, 2012).

O ônibus convencional movido a óleo diesel reúne flexibilidade operacional e infraestrutura consolidada, ao mesmo tempo em que produz emissões de gases de efeito estufa, óxidos de nitrogênio, material particulado e ruído em corredores densamente habitados. A exposição populacional ocorre de forma concentrada em terminais, pontos de parada, vias arteriais e áreas centrais. Diretrizes internacionais de saúde pública e os relatórios sobre mitigação climática associam a redução da combustão fóssil nos transportes a benefícios sanitários, ambientais e econômicos, especialmente quando a transição tecnológica acompanha políticas de transporte coletivo atrativo e integração urbana (Who, 2021; Ipcc, 2022).

A eletrificação de ônibus apresenta uma combinação singular de impacto potencial e complexidade gerencial. Veículos de transporte coletivo percorrem quilometragens elevadas, operam por muitas horas e concentram consumo energético em rotas previsíveis. Essas características aumentam o valor de cada substituição tecnológica e

favorecem o planejamento da infraestrutura. Ao mesmo tempo, a disponibilidade do serviço exige aderência rigorosa a tabelas horárias, capacidade de atendimento em horários de pico, confiabilidade mecânica e resposta rápida a eventos operacionais. A bateria, o carregador, a garagem, a rede elétrica e o planejamento de viagens passam a integrar uma única arquitetura de produção do serviço.

O debate público frequentemente associa a implantação de ônibus elétricos à compra do veículo. A literatura demonstra um escopo gerencial mais amplo. A transição envolve estudos de demanda, telemetria, análise de consumo por rota, avaliação da capacidade elétrica das garagens, projeto de subestações, escolha de potências de carregamento, cronogramas de obras, treinamento de equipes, gestão de garantias, suprimento de peças, contratos de energia, seguros, financiamento e definição de responsabilidades ao longo da vida útil do ativo. Göhlich *et al.* (2018) tratam essa configuração como um sistema urbano de transporte elétrico, no qual as decisões de engenharia e administração permanecem fortemente interdependentes.

O custo inicial dos ônibus elétricos e de sua infraestrutura constitui uma das barreiras recorrentes à adoção. A comparação baseada apenas no preço de aquisição reduz a qualidade da decisão, pois ônibus urbanos possuem longa vida útil e geram despesas contínuas com combustível ou eletricidade, manutenção, pneus, pessoal, peças, seguros e indisponibilidade. O custo total de propriedade, conhecido pela sigla TCO, amplia o horizonte analítico e estima o valor presente dos desembolsos e receitas ao longo do ciclo de vida. Estudos comparativos mostram que quilometragem anual, preço relativo do diesel e da eletricidade, vida útil da bateria,

disponibilidade técnica e estrutura de financiamento alteram de forma decisiva o resultado econômico (Lajunen, 2014; Lajunen; Lipman, 2016).

A matriz elétrica brasileira, marcada por participação relevante de fontes renováveis, reforça a atratividade ambiental da eletrificação. Esse atributo precisa ser combinado com planejamento da demanda, pois garagens com dezenas ou centenas de veículos podem representar grandes cargas locais. A simultaneidade de carregamento cria picos, exige reforços de conexão e influencia tarifas. Tecnologias de recarga inteligente, armazenamento estacionário, geração fotovoltaica e integração veículo-rede ampliam as alternativas de gestão energética. Moradipari *et al.* (2019), Ahmadian *et al.* (2021) e Caustur *et al.* (2025) mostram que a programação coordenada reduz custos e distribui o consumo ao longo do tempo.

No campo da Administração, a eletrificação pode ser compreendida como transformação organizacional, inovação em serviço público e decisão de investimento sob incerteza. O poder público define metas, regula tarifas e qualidade, estrutura contratos e organiza fontes de recursos. Operadores executam viagens, administram pessoal e manutenção, gerenciam garagens e respondem por indicadores de regularidade. Concessionárias de energia planejam conexões e qualidade do fornecimento. Fabricantes e integradores oferecem veículos, baterias, carregadores, softwares e garantias. Bancos e fundos avaliam risco, prazo, garantias e previsibilidade de receitas. A efetividade depende da coordenação desses atores e de mecanismos transparentes de alocação de riscos.

Experiências latino-americanas mostram que modelos de negócio podem acelerar a implantação ao separar propriedade do veículo, operação do serviço e provisão energética. Arranjos de leasing, locação, concessão de ativos, pagamento por disponibilidade e participação de empresas de energia reduzem a pressão do investimento inicial sobre o operador. Ao mesmo tempo, esses modelos criam contratos de longa duração e requerem regras claras para desempenho, substituição de baterias, valor residual, reajustes, falhas de infraestrutura e encerramento antecipado. O desenho jurídico-financeiro passa a ocupar posição central na política de eletrificação (Sclar *et al.*, 2019).

No Brasil, a Política Nacional de Mobilidade Urbana oferece fundamentos para priorização do transporte coletivo e uso de energias menos poluentes. Municípios também desenvolveram instrumentos próprios. São Paulo, por exemplo, estabeleceu metas progressivas de redução de emissões para a frota municipal, vinculando política climática e contratos de transporte (São Paulo, 2018). Outras cidades conduzem testes, corredores elétricos, projetos de BRT, aquisições e estudos de viabilidade. A diversidade urbana brasileira sugere trajetórias variadas, com soluções adaptadas à topografia, clima, tamanho de frota, estrutura tarifária, disponibilidade de garagens e capacidade fiscal.

A produção científica sobre ônibus elétricos cresceu e incorporou modelos mais detalhados de planejamento, operação e gestão energética. Revisões iniciais organizaram tecnologias e condições de operação. Estudos posteriores passaram a integrar frota e carregadores, trajetórias de investimento, dados abertos, aprendizado de máquina, incerteza de consumo, armazenamento e V2G. Essa evolução oferece instrumentos relevantes para a gestão

pública, ainda que os resultados dependam de premissas locais e qualidade dos dados.

Diante desse contexto, o problema de pesquisa foi formulado da seguinte maneira: quais benefícios, desafios, custos, barreiras administrativas e oportunidades são identificados pela literatura sobre a implantação de ônibus elétricos no transporte público e como essas evidências orientam a transição brasileira? O objetivo geral consiste em analisar, por meio de revisão sistemática da literatura, evidências científicas e técnicas sobre adoção de ônibus elétricos, com ênfase em impactos econômicos, administrativos, ambientais, tecnológicos e operacionais.

Os objetivos específicos compreendem identificar benefícios ambientais e sanitários; examinar aquisição, energia, manutenção, infraestrutura e bateria sob a perspectiva do TCO; analisar desafios de planejamento, contratos, financiamento e governança; comparar estratégias de recarga e integração operacional; verificar contribuições de dados, otimização e gestão energética; e sistematizar recomendações aplicáveis a governos e operadores brasileiros. A investigação possui relevância acadêmica por integrar campos frequentemente analisados de forma separada e relevância prática por apoiar decisões de investimento público de longa duração.

O artigo está organizado em sete seções. Após esta introdução, a fundamentação teórica aborda mobilidade, sustentabilidade, tecnologia, infraestrutura, economia, gestão pública, contratos e políticas. A metodologia detalha o protocolo de busca, seleção e síntese. Os resultados apresentam o perfil dos 18 estudos e suas categorias. A discussão interpreta convergências, tensões e

implicações para o Brasil. Em seguida, são formuladas recomendações gerenciais e apresentadas as conclusões.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1. Mobilidade Urbana, Acessibilidade e Transporte Coletivo

A mobilidade urbana representa a capacidade de pessoas e bens realizarem deslocamentos no território com segurança, previsibilidade, acessibilidade e custo compatível. Sua análise ultrapassa a circulação de veículos e incorpora relações entre uso do solo, localização de empregos, oferta de serviços, renda, infraestrutura e organização institucional. O transporte coletivo amplia a capacidade das vias, reduz a necessidade de espaço por passageiro e conecta áreas residenciais a centralidades urbanas. Em cidades brasileiras, o ônibus permanece essencial pela capilaridade e pela possibilidade de adaptação da rede.

A Lei nº 12.587/2012 determina prioridade dos modos coletivos e ativos, integração entre políticas urbanas, mitigação de externalidades e incentivo ao desenvolvimento técnico-científico e ao uso de energias renováveis e menos poluentes. Esses princípios fornecem base para programas de eletrificação, desde que a tecnologia esteja vinculada à qualidade do serviço. Um ônibus com baixa emissão produz benefício ambiental, e sua contribuição social cresce quando oferece frequência adequada, regularidade, conforto, segurança, acessibilidade e integração tarifária.

A gestão do transporte coletivo envolve planejamento de rede, programação de linhas, fiscalização de viagens, contratos, tarifas, subsídios, informação ao usuário e manutenção da infraestrutura. A eletrificação adiciona novos objetos de gestão. A disponibilidade

energética torna-se condição do serviço; a garagem incorpora instalações elétricas de alta potência; a escala de veículos influencia a demanda contratada; e o planejamento de horários precisa considerar janelas de recarga. Assim, a política tecnológica e a política de mobilidade permanecem articuladas.

O enfoque administrativo também exige avaliar equidade. Corredores com maior exposição a poluentes e ruído frequentemente atravessam áreas densas e socialmente vulneráveis. A priorização de rotas pode combinar critérios técnicos, ambientais e sociais, considerando quilometragem, consumo, proximidade de escolas e unidades de saúde, concentração populacional e qualidade do ar. Ferramentas baseadas em dados abertos, como a proposta de Vijay *et al.* (2022), oferecem suporte para ordenação transparente de investimentos.

A transição elétrica pode fortalecer o transporte coletivo como política urbana, especialmente quando integra corredores exclusivos, prioridade semafórica, informação em tempo real e renovação de pontos e terminais. A eficiência do veículo e a eficiência do sistema se reforçam. Velocidades comerciais mais estáveis reduzem consumo, ampliam produtividade e facilitam a programação da recarga. Planejamento urbano e inovação tecnológica formam, portanto, uma agenda conjunta.

2.2. Sustentabilidade, Qualidade do Ar e Descarbonização

A sustentabilidade dos transportes envolve redução de emissões climáticas, controle de poluentes locais, uso eficiente de energia, durabilidade dos ativos e melhoria da qualidade urbana. Ônibus a bateria eliminam emissões no escapamento durante a operação,

característica relevante em corredores com intensa circulação de pedestres. A redução de óxidos de nitrogênio e material particulado derivado da combustão contribui para metas de qualidade do ar. Partículas provenientes de pneus, pavimento e freios permanecem presentes, embora a frenagem regenerativa reduza parte do desgaste de componentes de frenagem.

A avaliação climática exige perspectiva de ciclo de vida. Emissões surgem na produção do veículo, da bateria, da eletricidade e da infraestrutura. A comparação com o diesel depende da matriz elétrica, da eficiência do sistema, da quilometragem e da vida útil. Lajunen e Lipman (2016) demonstram que tecnologias de propulsão apresentam perfis distintos ao longo do ciclo. A eletrificação alcança desempenho ambiental mais favorável em sistemas elétricos de menor intensidade de carbono e em operações de alta utilização.

A bateria concentra parcela relevante dos impactos de fabricação e do valor do ativo. Sua durabilidade depende de química, temperatura, profundidade de descarga, potência de recarga e estratégia operacional. A gestão de saúde da bateria influencia simultaneamente custo, confiabilidade e impacto ambiental. Contratos de garantia, monitoramento de degradação, reutilização estacionária e reciclagem devem integrar a política de ativos. A literatura recente inclui explicitamente custos de envelhecimento na programação energética, como ocorre em Caustur *et al.* (2025).

O ruído constitui outro benefício urbano. Motores elétricos apresentam menor emissão sonora em baixas velocidades, característica valorizada em áreas centrais e residenciais. A redução melhora conforto de passageiros, motoristas, trabalhadores de terminais e moradores. Em velocidades maiores, ruído aerodinâmico

e contato pneu-pavimento ganham importância. Mesmo assim, o ambiente acústico de partidas, frenagens e acelerações tende a melhorar.

Benefícios sanitários podem ser monetizados em análises socioeconômicas. A redução da exposição a poluentes pode diminuir internações, mortalidade prematura e perda de produtividade. Vijay *et al.* (2022) incorporam impactos à saúde em ferramenta de priorização por rota. Para a Administração Pública, essa abordagem amplia a justificativa do investimento, pois parte dos ganhos ocorre fora do orçamento do transporte e alcança o sistema de saúde, trabalhadores e comunidades.

A descarbonização também possui dimensão de segurança energética. A substituição parcial do diesel por eletricidade reduz exposição a flutuações do petróleo e permite utilização de fontes domésticas diversificadas. A eletricidade apresenta tarifas e estruturas de demanda próprias, criando outro conjunto de riscos. Estratégias de contratação, geração local e armazenamento podem reduzir volatilidade e picos, ao mesmo tempo em que exigem competência técnica e regulatória.

2.3. Tecnologias de Ônibus Elétricos e Sistemas de Propulsão

O termo ônibus elétrico abrange arquiteturas distintas. O ônibus elétrico a bateria armazena energia a bordo e utiliza motores elétricos para tração. O trólebus recebe energia de rede aérea e pode incorporar baterias para trechos autônomos. Ônibus híbridos combinam motor elétrico e motor de combustão. Sistemas com célula a combustível produzem eletricidade a partir de hidrogênio e mantêm bateria de apoio. Esta revisão concentra-se principalmente

em ônibus elétricos a bateria pela expansão recente dessa solução e pela centralidade da infraestrutura de recarga.

A cadeia de tração inclui bateria, conversores, inversor, motor, transmissão, controle térmico e frenagem regenerativa. Motores elétricos oferecem elevado rendimento e torque disponível desde baixas rotações, características adequadas ao ciclo urbano de paradas e partidas. A frenagem regenerativa recupera parte da energia cinética e reduz consumo. O resultado real varia conforme carga de passageiros, topografia, velocidade, congestionamento, temperatura, climatização e comportamento do condutor.

A capacidade da bateria determina reserva energética e influencia massa, custo e espaço. Baterias maiores ampliam autonomia e reduzem dependência de recargas intermediárias. Ao mesmo tempo, elevam peso e investimento. Baterias menores favorecem veículos mais leves e dependem de infraestrutura de maior potência ou recargas frequentes. Li (2016), Rogge *et al.* (2018) e Dirks, Schiffer e Walther (2021) convergem sobre a necessidade de dimensionamento conjunto entre veículo e infraestrutura.

As principais estratégias de carregamento incluem recarga noturna em garagem, recarga de oportunidade em terminais e pontos de linha, e combinações híbridas. A recarga em garagem simplifica a gestão física e concentra manutenção, embora possa exigir baterias maiores e grande potência agregada. A recarga de oportunidade reduz a capacidade embarcada e amplia autonomia diária, com maior dependência de carregadores rápidos, confiabilidade da infraestrutura e sincronização com a operação. Xylia e Silveira (2018) destacam que a escolha influencia interoperabilidade e expansão do sistema.

Potência de recarga afeta tempo, demanda elétrica e degradação. Carregadores de menor potência distribuem consumo por períodos prolongados. Carregadores rápidos recuperam energia em intervalos curtos e impõem maiores picos. A solução ótima depende do tempo disponível, custo da conexão, número de veículos, layout da garagem e tarifa. Dirks, Schiffer e Walther (2021) encontraram desempenho favorável de combinações intermediárias de potência e capacidade em sua aplicação, resultado que reforça a importância de evitar decisões extremas baseadas em uma única variável.

Interoperabilidade entre veículo, conector, protocolo de comunicação e sistema de gestão aumenta flexibilidade e concorrência ao longo do tempo. Ecossistemas fechados podem elevar dependência do fornecedor e custo de substituição. Especificações públicas precisam definir desempenho, segurança, comunicação, garantia e disponibilidade de dados, preservando espaço para evolução tecnológica.

2.4. Infraestrutura de Recarga, Energia e Planejamento Operacional

A infraestrutura de recarga começa com o levantamento do ciclo de serviço. Cada viagem possui distância, tempo, velocidade média, desnível, carga e intervalos. A energia necessária precisa incluir margem para variações e contingências. Estimativas baseadas em valores médios oferecem um ponto inicial, e sua qualidade cresce com telemetria e medições em rota. Momen *et al.* (2025) mostram que a variabilidade pode produzir viagens inviáveis quando o planejamento utiliza parâmetros excessivamente simplificados.

O projeto da garagem envolve transformadores, quadros, cabos, proteção, carregadores, sistemas de combate a incêndio, ventilação, circulação de veículos e software de gestão. Espaço físico e sequenciamento de manobras influenciam a operação. Carregadores precisam permanecer acessíveis durante limpeza, inspeção e manutenção. O crescimento futuro da frota deve integrar o projeto inicial, favorecendo expansão modular e redução de retrabalho.

A conexão à rede elétrica requer estudos de capacidade, qualidade de energia e prazo de implantação. Em algumas localidades, reforços de distribuição representam etapa crítica do cronograma. A compra de veículos anterior à conclusão da infraestrutura cria risco de ativos ociosos. Um plano integrado organiza licenciamento, obras civis, fornecimento elétrico, testes, treinamento e entrada gradual em serviço.

A recarga simultânea concentra demanda. Tarifas com cobrança de potência ou horários diferenciados criam incentivos à programação inteligente. Moradipari *et al.* (2019) integram rotas, preços de energia e previsão solar em modelo de despacho. Caustur *et al.* (2025) acrescentam demanda máxima, armazenamento, energia renovável, V2G e envelhecimento da bateria. Esses trabalhos indicam que a energia deve ser administrada como insumo estratégico, com indicadores, contratos e sistemas de decisão.

Armazenamento estacionário pode reduzir picos, deslocar consumo e fornecer resiliência. Ahmadian *et al.* (2021) analisam essa possibilidade em rede de transporte de Los Angeles. A viabilidade depende de custo, ciclo de uso, eficiência, tarifa e valor de serviços adicionais. Baterias retiradas dos veículos com capacidade residual

podem encontrar segunda vida em aplicações estacionárias, desde que existam padrões de segurança, diagnóstico e responsabilidade.

A programação operacional conecta estado de carga, disponibilidade dos carregadores e tabela de serviço. O despacho precisa assegurar que cada veículo possua energia suficiente e retorne a um ponto compatível. Em frotas mistas, ônibus elétricos podem ser priorizados em linhas de maior benefício e maior compatibilidade energética. Sistemas de gestão apoiados por previsão, otimização e automação elevam a utilização dos ativos, como demonstrado por Guanetti *et al.* (2023).

Confiabilidade requer redundância. Falhas de carregadores, interrupções de energia, congestionamentos e consumo acima do previsto precisam ser contemplados. Redundância pode assumir a forma de carregadores adicionais, margens de bateria, veículos reserva, possibilidade de recarga alternativa e protocolos de contingência. A busca por eficiência financeira ganha estabilidade quando acompanhada por análise de riscos.

2.5. Custos, Financiamento e Custo Total de Propriedade

O TCO organiza todos os fluxos econômicos associados ao ativo. Em termos gerais, inclui aquisição, infraestrutura, financiamento, energia, manutenção, pneus, seguros, baterias, impostos, treinamento, sistemas digitais, indisponibilidade e valor residual. Para o poder público, a análise pode incorporar externalidades ambientais e sanitárias. A utilização do valor presente permite comparar tecnologias com perfis de desembolso distintos.

O ônibus elétrico concentra parcela maior do custo no início do ciclo, enquanto o diesel distribui despesas relevantes em combustível e

manutenção. Essa diferença cria barreira financeira mesmo em cenários de economia total. Operadores dependentes de tarifa e contratos de duração limitada podem enfrentar incompatibilidade entre prazo do financiamento e previsibilidade de receita. Mecanismos de crédito de longo prazo, garantias, fundos climáticos, subsídios de capital e separação da propriedade dos ativos ajudam a aproximar benefícios futuros e capacidade presente de investimento.

A intensidade de uso influencia a economia. Quanto maior a quilometragem anual em condição compatível, maior tende a ser a diluição do investimento e a substituição de diesel por eletricidade. Rotas com baixa utilização ou exigência energética extrema podem apresentar retorno mais lento. Lajunen (2014) destaca a sensibilidade a consumo, preço da energia e ciclo de operação. Por essa razão, projetos iniciais devem selecionar rotas com alta aderência técnica e relevância ambiental.

A manutenção elétrica possui menos componentes móveis no sistema de tração e reduz atividades associadas a óleo, filtros e escapamento. Novas competências surgem em alta tensão, eletrônica de potência, refrigeração e diagnóstico. O custo efetivo depende de disponibilidade de peças, maturidade da rede de assistência, acordos de garantia e capacidade interna. Indicadores de custo por quilômetro precisam distinguir manutenção programada, falhas, tempo parado e campanhas de atualização.

A bateria merece tratamento contábil e contratual específico. Sua substituição pode ocorrer dentro ou após a vida útil econômica do ônibus. Garantias costumam estabelecer tempo, quilometragem, capacidade residual e condições de uso. Uma gestão ativa registra

temperatura, ciclos, potência e profundidade de descarga. O valor residual e a destinação final influenciam o TCO e a sustentabilidade.

A infraestrutura possui vida útil potencialmente superior à de um lote de veículos. Alocar todo o investimento ao primeiro contrato distorce comparações. Uma abordagem de ativos compartilhados considera expansão, uso por diferentes operadores e reaproveitamento. Esse ponto favorece modelos em que poder público, empresa de energia ou entidade especializada assume a infraestrutura e cobra pela disponibilidade.

O risco cambial também pode ser relevante em componentes importados, baterias e eletrônica. Políticas de conteúdo local, escala de compras e padronização podem reduzir volatilidade. Ao mesmo tempo, especificações precisam preservar competição e desempenho. Compras coordenadas entre cidades ou lotes maiores podem melhorar condições comerciais, desde que os requisitos técnicos permaneçam compatíveis com cada operação.

2.6. Administração Pública, Governança e Gestão de Riscos

A eletrificação demanda governança interorganizacional. Uma unidade de coordenação pode reunir mobilidade, meio ambiente, finanças, energia, patrimônio, compras e planejamento. Esse arranjo reduz fragmentação e torna visíveis dependências entre cronogramas. Comitês técnicos, matriz de responsabilidades e processos de decisão documentados aumentam transparência e continuidade administrativa.

O planejamento estratégico começa com diagnóstico da frota, contratos, garagens, rede elétrica e metas ambientais. Em seguida, define cenários, prioridades, indicadores, recursos e cronograma.

Planos graduais permitem testar tecnologia, capacitar equipes e atualizar premissas. Dirks, Schiffer e Walther (2021) apresentam abordagem multiperíodo que conecta decisões estratégicas e operacionais, oferecendo base conceitual para programas públicos por fases.

Gestão de riscos deve considerar disponibilidade tecnológica, falha de fornecedores, atraso em obras, variação cambial, mudança tarifária, degradação, incêndio, obsolescência, indisponibilidade energética e desempenho abaixo do previsto. Cada risco pode receber probabilidade, impacto, responsável, medida preventiva e plano de resposta. Contratos transferem parte dos riscos e preservam outros com o poder público ou operador. A transferência eficiente ocorre quando o agente possui capacidade efetiva de gerenciar o evento.

Indicadores de desempenho apoiam controle. Entre os indicadores relevantes estão consumo de energia por quilômetro, disponibilidade da frota, confiabilidade dos carregadores, viagens realizadas, quilometragem entre falhas, capacidade residual da bateria, custo de energia por quilômetro, emissões evitadas, satisfação de passageiros e segurança. Dados devem ser auditáveis e acessíveis ao gestor, evitando dependência informacional do fornecedor.

A gestão da mudança inclui pessoas. Motoristas precisam compreender frenagem regenerativa, aceleração eficiente e autonomia. Equipes de manutenção requerem certificação e protocolos de segurança. Despachantes passam a usar estado de carga como variável. Gestores de contratos precisam interpretar

garantias e dados energéticos. Comunicação com trabalhadores reduz incerteza e favorece apropriação das novas rotinas.

A transparência fortalece legitimidade. Projetos de grande valor podem publicar critérios de seleção de rotas, estudos de viabilidade, contratos, indicadores e resultados. A divulgação de desafios e ajustes produz aprendizado institucional e contribui para outras cidades. A literatura orientada à prática identifica lacunas entre modelos acadêmicos e necessidades operacionais, reforçando a importância de dados reais e participação dos operadores (Dirks *et al.*, 2021).

2.7. Contratos, Concessões e Modelos de Negócio

Contratos de transporte urbano tradicionais foram estruturados em torno de veículos a combustão, abastecimento descentralizado e manutenção conhecida. A eletrificação altera investimento, vida útil, infraestrutura e responsabilidade tecnológica. A revisão contratual deve esclarecer quem compra o ônibus, quem possui a bateria, quem instala carregadores, quem paga energia, quem assume reforços de rede e quem responde por indisponibilidade.

A aquisição pública direta oferece controle patrimonial e exige capacidade de financiamento, manutenção e gestão de garantias. A compra pelo operador preserva integração com a operação e depende da duração e estabilidade do contrato. Leasing e locação convertem investimento em pagamentos periódicos, alinhando fluxo de caixa e uso. Modelos de ônibus como serviço podem incorporar veículo, manutenção, bateria e infraestrutura em pagamento por quilômetro ou disponibilidade.

A separação entre provisão do ativo e operação cria especialização. Um provedor pode adquirir e disponibilizar ônibus e carregadores para diferentes operadores. Esse desenho amplia acesso a capital e facilita substituição do operador ao fim da concessão. Regras de interface tornam-se essenciais, pois falhas do ativo afetam o serviço e falhas operacionais afetam a garantia.

Pagamentos por desempenho podem considerar disponibilidade, consumo, regularidade e condição da bateria. Metas precisam ser mensuráveis e equilibradas. Penalidades excessivas elevam preço e reduzem concorrência. Incentivos bem calibrados alinham eficiência do operador e interesse público. A matriz de riscos deve tratar eventos de força maior, variações regulatórias, preço de energia e evolução tecnológica.

Contratos de energia constituem parte do modelo. Tarifas convencionais podem gerar custos elevados de demanda. Soluções incluem contratação em ambiente adequado, gestão horária, geração distribuída, armazenamento e resposta da demanda. A viabilidade de V2G depende de regulação, remuneração, degradação e garantia. Manzolli *et al.* (2026) acrescentam dimensão distributiva ao mostrar que agregadores digitais podem capturar valor conforme regras de preço, indicando necessidade de auditoria e compartilhamento explícito.

O financiamento climático tende a valorar redução de emissões, qualidade do ar e inovação. Para acessar recursos, projetos precisam demonstrar adicionalidade, governança, indicadores e capacidade de execução. Estudos de TCO, inventários de emissões e planos de monitoramento elevam a bancabilidade. Programas agrupados podem reduzir custo de transação para municípios de menor porte.

2.8. Políticas Públicas e Trajetória Brasileira

A Política Nacional de Mobilidade Urbana estabelece ambiente favorável à inovação limpa ao priorizar transporte coletivo e mitigação de externalidades. Políticas climáticas, planos de mobilidade, normas de qualidade do ar, compras públicas e contratos de concessão podem transformar princípios em metas. A coerência entre instrumentos aumenta previsibilidade para fabricantes, operadores e financiadores.

São Paulo desenvolveu um marco municipal que vincula a frota de ônibus a metas de redução de dióxido de carbono, material particulado e óxidos de nitrogênio. A Lei nº 16.802/2018 introduziu trajetória progressiva e estimulou renovação tecnológica. O caso evidencia como metas ambientais podem ser incorporadas a contratos e planejamento de frota. A execução exige financiamento, infraestrutura, coordenação de garagens e monitoramento, elementos que transformam a meta em programa administrativo de longa duração.

Cidades brasileiras apresentam condições diversas. Sistemas de grande escala possuem maior capacidade de dados e compras, além de complexidade elevada. Cidades médias podem iniciar corredores ou linhas específicas e aprender rapidamente. Topografia acidentada, altas temperaturas, uso intenso de ar-condicionado e congestionamento alteram consumo. A presença de fabricantes e cadeia produtiva nacional cria oportunidades industriais e de manutenção.

Projetos de BRT oferecem contexto favorável pela previsibilidade de rotas, garagens estruturadas e alta quilometragem. Corredores com

terminais podem receber recarga de oportunidade ou operar com baterias dimensionadas para o ciclo completo. Sistemas convencionais também apresentam potencial, especialmente quando a garagem e a rede de linhas são analisadas em conjunto.

A governança federativa influencia escala. Municípios regulam transporte urbano e enfrentam restrições fiscais. União, estados, bancos públicos e agências de desenvolvimento podem apoiar crédito, garantias, padronização e assistência técnica. Programas nacionais com critérios transparentes reduziriam assimetria de capacidade entre cidades. A articulação com política industrial pode incentivar produção, pesquisa, formação profissional e reciclagem de baterias.

Experiências de Santiago e Bogotá são frequentemente citadas na América Latina por combinarem metas públicas, contratos, provedores de ativos e participação de empresas de energia. A transferência de aprendizado para o Brasil deve considerar estrutura regulatória, tarifa, propriedade das garagens e modelo de concessão. A principal lição está na coordenação dos elementos financeiros e operacionais, com soluções adaptadas a cada cidade (Sclar *et al.*, 2019).

A trajetória brasileira tende a combinar pilotos, aquisições escalonadas, corredores prioritários e revisão contratual. A aceleração sustentável depende de critérios técnicos, fontes de longo prazo, infraestrutura anterior à entrada dos veículos e sistemas de monitoramento. A política pública produz maior valor quando integra redução de emissões, melhoria do serviço e fortalecimento institucional.

3. METODOLOGIA

A pesquisa adotou revisão sistemática da literatura com síntese qualitativa e análise descritiva. O protocolo foi orientado pelos princípios de transparência e rastreabilidade do PRISMA 2020 (Page *et al.*, 2021). A expressão revisão sistemática indica aplicação estruturada de busca, seleção, extração e síntese dentro das condições de acesso documental deste estudo. O foco recaiu sobre literatura científica e técnica capaz de responder ao problema gerencial da eletrificação de ônibus no transporte público.

As buscas foram realizadas em 13 de julho de 2026 nas seguintes fontes de informação: Google Scholar, arXiv, Crossref Metadata Search e SciELO. No Google Scholar, foram executadas separadamente oito combinações em português e inglês relacionadas a ônibus elétricos, transporte público, custo total de propriedade, infraestrutura de recarga e política pública. No arXiv, a busca combinou o descritor principal “electric bus” com “public transport”, “transit”, “bus fleet”, “charging”, “total cost of ownership” e “V2G”. Na Crossref, a pesquisa bibliográfica utilizou “electric bus” associado a “public transport”, “transit” e “charging”. Na SciELO, foram combinados “ônibus elétrico”, “ônibus elétricos” e “mobilidade elétrica” com “transporte público” e “transporte coletivo”. A busca também foi ampliada por rastreamento de autores, títulos e referências relevantes.

O recorte temporal principal compreendeu 2014 a julho de 2026. Esse intervalo abrange a consolidação de revisões tecnológicas, os primeiros modelos integrados de frota e carregamento e o avanço recente de recarga inteligente, dados abertos, otimização robusta e V2G. Foram aceitos textos em português e inglês. Artigos revisados

por pares receberam prioridade, e preprints recentes foram incluídos quando apresentaram método explícito e contribuição diretamente relacionada ao problema. A condição de preprint foi identificada na interpretação e nas referências.

Os critérios de inclusão abrangeram: relação direta com ônibus elétricos a bateria ou eletrificação de frotas de transporte coletivo; apresentação de evidências sobre tecnologia, operação, infraestrutura, energia, custos, emissões, saúde, planejamento, governança ou política; descrição metodológica suficiente; autoria e origem identificadas; e aplicabilidade ao contexto de redes urbanas. Estudos internacionais foram incluídos pela transferibilidade de métodos e decisões para o Brasil.

Os critérios de exclusão abrangeram duplicidades, foco exclusivo em automóveis particulares, ausência de relação com transporte coletivo, textos promocionais com baixa rastreabilidade, registros sem descrição metodológica e estudos cuja contribuição permanecia periférica ao problema. Documentos institucionais e legislação foram utilizados para contextualização e fundamentação normativa, permanecendo fora da contagem dos 18 estudos científicos da síntese.

A identificação inicial reuniu 48 registros efetivamente salvos para triagem: Google Scholar (n = 19), arXiv (n = 20), Crossref Metadata Search (n = 9) e SciELO (n = 0). Nove registros da Crossref repetiam títulos já recuperados em outras fontes e foram removidos por correspondência de título, autoria, ano e identificador. Permaneceram 39 registros para leitura de título e resumo. Nessa etapa, 18 foram excluídos por escopo incompatível, incluindo transporte de cargas, táxis, carsharing, transporte escolar,

planejamento de redes sem eletrificação e estudos genéricos de baterias ou recarga. Vinte e um relatórios foram procurados e todos foram recuperados. Na avaliação de elegibilidade, três foram excluídos individualmente: um estudo de veículos elétricos em geral sem resultados específicos para ônibus e dois relatórios técnicos sem método científico explícito para integração ao corpus. O conjunto final reuniu 18 estudos. O registro R01-R48, as decisões e as justificativas constam no Apêndice D.

A extração foi realizada por matriz padronizada com autor, ano, título, método, contexto, tecnologia, categorias, resultado principal e implicação administrativa. As categorias foram definidas de modo híbrido. Parte delas derivou do problema de pesquisa - custos, ambiente, operação, governança e infraestrutura - e parte emergiu da leitura, como incerteza energética, dados abertos, armazenamento e agregadores digitais.

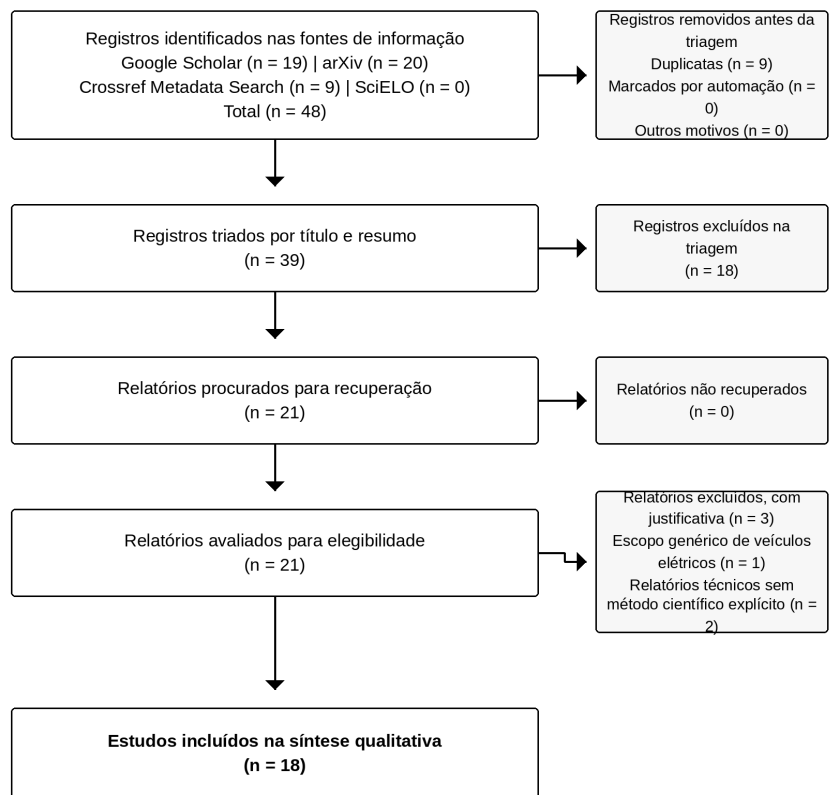
A síntese combinou contagem descritiva e análise temática. Frequências representam presença relevante de uma categoria nos 18 estudos, com possibilidade de múltiplas categorias por publicação. Essas contagens apoiam visualização da ênfase do corpus e possuem finalidade interpretativa. A heterogeneidade de métodos, cidades, tecnologias, moedas e premissas inviabilizou agregação estatística de efeitos. Dessa forma, o estudo desenvolveu síntese qualitativa comparativa.

A qualidade interpretativa foi reforçada por três procedimentos: correspondência entre cada afirmação específica e a fonte correspondente; distinção entre artigos revisados por pares, preprints e documentos institucionais; e leitura das conclusões à luz do contexto de aplicação. Resultados quantitativos de casos

particulares foram tratados como evidência contextual, preservando sua dependência de tarifas, clima, rede e desenho operacional.

As limitações decorrem da disponibilidade desigual de textos completos, da predominância de publicações em inglês, da rápida evolução tecnológica e da natureza dinâmica dos resultados apresentados por mecanismos de busca. Para preservar a rastreabilidade, os totais referem-se aos registros efetivamente salvos no arquivo de triagem, cada um identificado no Apêndice D. Uma revisão futura com acesso integral a bases por assinatura, avaliação formal de risco de viés e dupla triagem independente ampliaria a robustez. O procedimento adotado permite reproduzir as expressões, conferir as fontes, acompanhar a remoção de duplicatas e verificar os motivos individuais de exclusão.

Figura 1. Fluxograma PRISMA 2020 de identificação, triagem, recuperação, elegibilidade e inclusão dos estudos.



Fonte: Adaptado de Page *et al.* (2021), com dados da pesquisa (2026).

Quadro 1. Fontes de informação, estratégias registradas e resultados da busca.

Fonte / plataforma	Estratégia registrada	Recorte data e	Registros salvos
Google Scholar	Oito buscas separadas: “ônibus elétricos” AND “transporte público”; “mobilidade elétrica” AND “transporte coletivo”; “eletrificação de frotas” AND Brasil; “ônibus elétricos” AND “custo total de propriedade”; “electric buses” AND “public transport”; “electric bus fleet” AND “total cost of ownership”; “electric bus” AND “charging	2014-13 jul. 2026; português e inglês; busca em 13 jul. 2026.	19

	infrastructure”; “electric buses” AND “public policy”.		
arXiv	all:“electric bus” AND (all:“public transport” OR all:“transit” OR all:“bus fleet”); buscas complementares com “charging”, “total cost of ownership” e “V2G”.	Submissões de 2014 a 13 jul. 2026; busca em 13 jul. 2026.	20
Crossref Metadata Search	“electric bus” associado a “public transport”, “transit” e “charging”, com conferência por título, autoria, ano e DOI/identificador.	Publicações de 2014 a 13 jul. 2026; busca em 13 jul. 2026.	9
SciELO	(“ônibus elétrico” OR “ônibus elétricos” OR “mobilidade elétrica”) AND (“transporte público” OR “transporte coletivo”).	2014-13 jul. 2026; português, inglês e espanhol; busca em 13 jul. 2026.	0
Total	Registros efetivamente salvos no arquivo de triagem.	Antes da remoção de duplicatas.	48

Fonte: Elaboração própria a partir do registro de busca (2026).

4. RESULTADOS

O corpus final reúne 18 estudos publicados entre 2014 e 2026. A distribuição temporal evidencia três fases. Entre 2014 e 2018, predominam avaliações tecnológicas, comparações de custo e emissões e formulações sistêmicas. Entre 2019 e 2023, ampliam-se modelos de recarga inteligente, planejamento multiperíodo, armazenamento e uso de dados abertos. Entre 2025 e 2026, surgem

estudos com incerteza, degradação, V2G, tarifas dinâmicas e agentes digitais. A Figura 2 apresenta a evolução anual.

Quanto às abordagens, oito estudos utilizam otimização e planejamento, três realizam revisões ou sínteses, três desenvolvem avaliações técnico-econômicas e quatro articulam projeto, dados e sistemas. A predominância de modelos de decisão revela maturidade crescente do campo e necessidade de traduzir resultados para processos administrativos. A Figura 3 resume os métodos.

Infraestrutura e recarga aparecem em 15 estudos; operação e programação em 14; custos e TCO em 13; energia e rede elétrica em 10; emissões e saúde em nove; governança e políticas em oito; bateria e incerteza em sete; digitalização e dados em seis. Essas frequências indicam que a eletrificação é tratada como problema integrado. O veículo ocupa posição central e depende de múltiplos subsistemas. A Figura 4 organiza as categorias.

Os benefícios mais recorrentes são eficiência energética, redução de poluentes locais, economia operacional potencial, redução de emissões climáticas, menor ruído e modernização da gestão por dados. A eficiência decorre do rendimento da tração elétrica e da frenagem regenerativa. A ausência de combustão no veículo elimina emissões locais de escapamento. A economia operacional aparece de forma condicionada a quilometragem, tarifa, manutenção e financiamento. A Figura 5 apresenta as frequências.

As barreiras mais frequentes são infraestrutura de recarga, investimento inicial, autonomia e escala de serviço, gestão de energia e picos, financiamento e contratos, degradação de baterias,

lacunas de dados e capacitação. A infraestrutura lidera por combinar capital, espaço, conexão, prazo e confiabilidade. O investimento inicial aparece logo depois, refletindo o descasamento entre desembolso presente e economias futuras. A Figura 6 sintetiza esses resultados.

A análise econômica mostra ampla convergência sobre uso do TCO. Lajunen (2014) demonstra sensibilidade a ciclos operacionais e preços. Lajunen e Lipman (2016) incorporam ciclo de vida e emissões. Dirks, Schiffer e Walther (2021) integram trajetória de investimento e infraestrutura. Vijay *et al.* (2022) ampliam a avaliação com carbono e saúde. Em conjunto, os estudos apontam que a comparação de preço de compra possui alcance limitado e que o valor econômico emerge da operação ao longo do tempo.

A quilometragem anual exerce papel duplo. Alta utilização acelera captura de economia de energia e manutenção. Ao mesmo tempo, exige autonomia, disponibilidade e recarga confiáveis. Rotas intensivas podem oferecer elevado retorno e demandar engenharia mais cuidadosa. A seleção inicial de linhas deve equilibrar impacto e risco.

A infraestrutura apresenta economias de escala e indivisibilidades. Transformadores, obras e sistemas de gestão podem atender expansão futura. Investimento antecipado reduz retrabalho e aumenta capital imobilizado. Rogge *et al.* (2018) e Legault, Cabral e Sun (2025) mostram valor do planejamento conjunto e temporal. A recomendação convergente consiste em dimensionar etapas compatíveis com um plano de longo prazo.

Nos resultados ambientais, a redução de emissões locais aparece como benefício robusto. O desempenho climático varia conforme eletricidade e ciclo de vida. Em matrizes mais limpas e operações intensivas, a vantagem tende a crescer. A saúde pública recebe menor atenção no corpus que energia e custo, embora Vijay *et al.* (2022) demonstrem viabilidade de incorporar efeitos sanitários por rota. Essa lacuna representa oportunidade para estudos brasileiros que conectem qualidade do ar, epidemiologia e planejamento de frota.

No campo operacional, autonomia emerge como resultado do sistema e não como atributo fixo. Consumo varia com velocidade, topografia, carga, temperatura e climatização. O dimensionamento precisa adotar margens e atualizar parâmetros com telemetria. Momen *et al.* (2025) quantificam efeitos relevantes de incerteza e mostram vantagem de modelos orientados por dados. Essa evidência possui grande aderência ao Brasil, onde condições urbanas e climáticas variam entre cidades.

A recarga inteligente constitui tendência consolidada. Moradipari *et al.* (2019) coordenam serviço, preço e geração solar. Caustur *et al.* (2025) incluem demanda máxima, armazenamento, V2G e degradação. Manzolli *et al.* (2026) avançam para agentes que monitoram perturbações e reotimizam. A progressão revela transformação da garagem em centro energético digital.

A literatura também identifica requisitos de dados. GTFS, telemetria, estado de carga, registros de manutenção e tarifas alimentam modelos. Guanetti *et al.* (2023) mostram ganhos de utilização com previsões e automação. Vijay *et al.* (2022) mostra que dados abertos apoiam priorização mesmo em cidades com menor capacidade

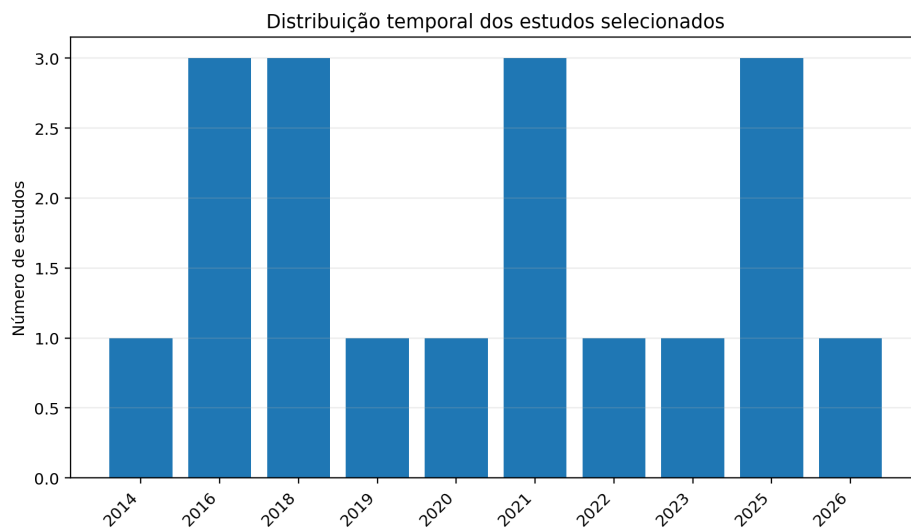
analítica. Para o Brasil, padrões nacionais de dados poderiam reduzir custo de estudos e acelerar comparação entre projetos.

Governança e contratos recebem tratamento crescente. Revisões orientadas à prática apontam que modelos acadêmicos frequentemente simplificam regras de operação, contingências e manutenção (Dirks *et al.*, 2021). A literatura de barreiras destaca financiamento, coordenação e modelos de negócio (Sclar *et al.*, 2019). Estudos de agregação energética acrescentam transparência tarifária e distribuição de valor (Manzolli *et al.*, 2026). Esses achados reforçam a centralidade da Administração na eletrificação.

O contexto brasileiro apresenta aderência às principais categorias. Grandes cidades possuem frotas extensas e metas climáticas, enquanto restrições fiscais e contratos fragmentados dificultam o investimento. A diversidade de garagens e operadores exige planejamento por território. A matriz elétrica fortalece o desempenho ambiental, e a capacidade local de rede varia. A presença de indústria de ônibus e componentes abre espaço para política produtiva, qualificação e inovação.

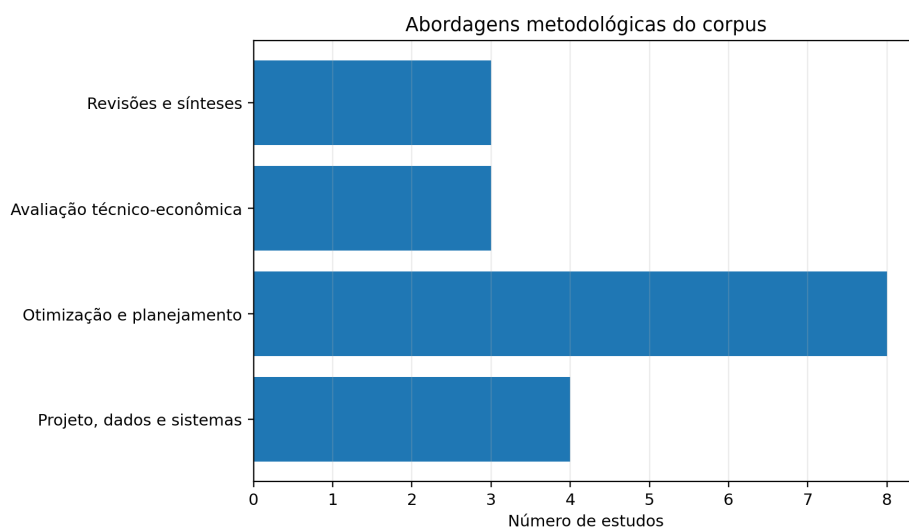
O Quadro 4 sintetiza os estudos e evidencia que cada contribuição aborda parcela do sistema. A integração das parcelas oferece uma estrutura gerencial composta por seis decisões: selecionar rotas; dimensionar veículos e baterias; projetar infraestrutura e energia; estruturar financiamento e contratos; preparar operação e pessoas; e monitorar desempenho para ajustar a expansão.

Figura 2. Distribuição temporal dos estudos selecionados.



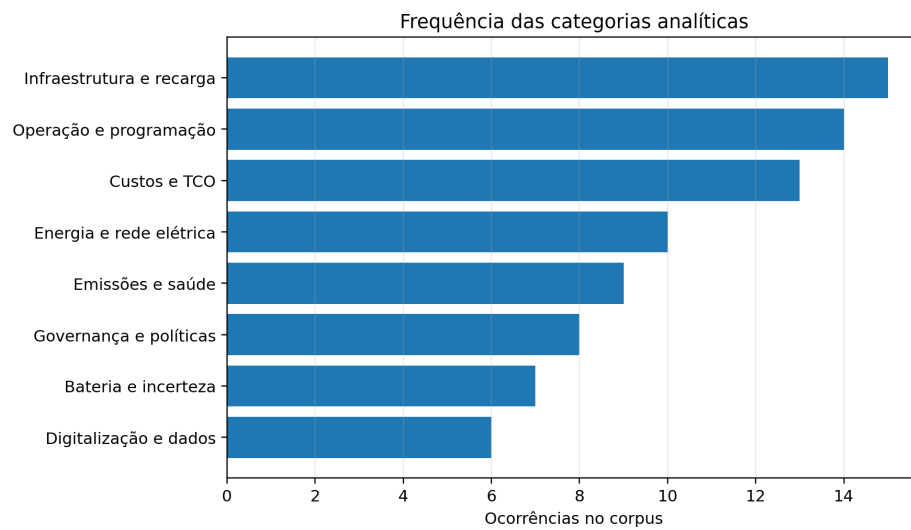
Fonte: Elaboração própria com base no corpus da revisão (2026).

Figura 3. Abordagens metodológicas do corpus.



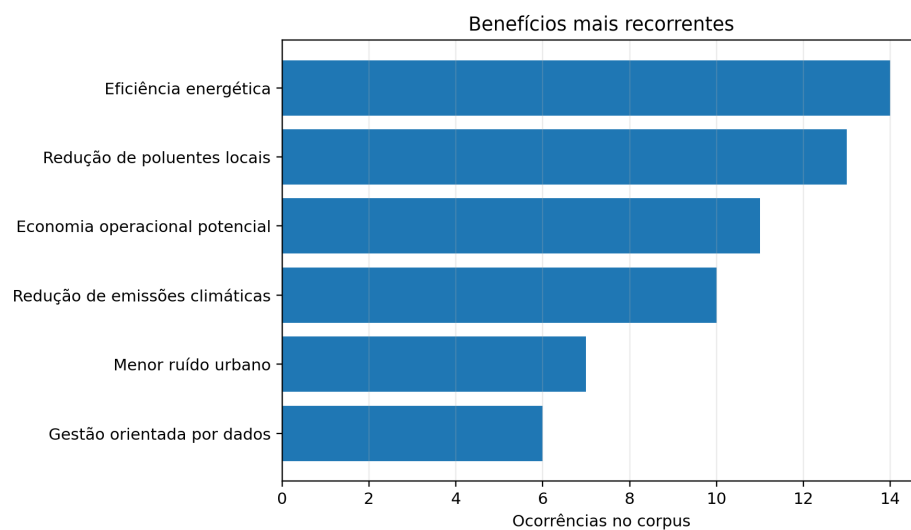
Fonte: Elaboração própria com base no corpus da revisão (2026).

Figura 4. Frequência das categorias analíticas.



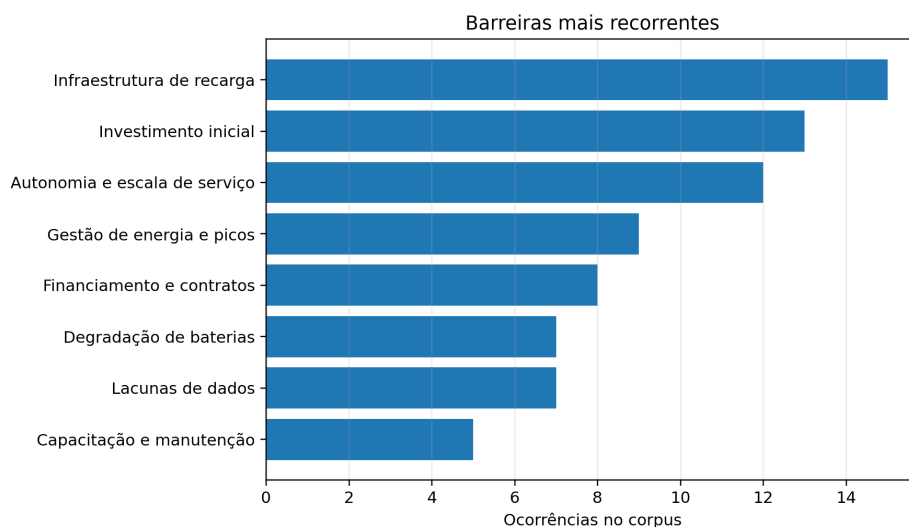
Fonte: Elaboração própria com base no corpus da revisão (2026).

Figura 5. Benefícios mais recorrentes nos estudos.



Fonte: Elaboração própria com base no corpus da revisão (2026).

Figura 6. Barreiras mais recorrentes nos estudos.



Fonte: Elaboração própria com base no corpus da revisão (2026).

Quadro 2. Síntese das evidências por dimensão administrativa.

Dimensão	Evidência central	Implicação para a gestão
Tecnologia	Eficiência de tração, frenagem regenerativa e múltiplas estratégias de bateria e recarga.	Compatibilizar tecnologia com rota, clima, carga e garagem.
Economia	Economia operacional potencial e forte sensibilidade do TCO às premissas.	Usar cenários, valor presente e análise de sensibilidade.
Infraestrutura	Carregadores, conexão e layout condicionam disponibilidade e expansão.	Planejar obras e energia antes da entrada dos veículos.
Operação	Autonomia varia e recarga precisa acompanhar programação de viagens.	Usar telemetria, margens e contingências.
Ambiente e saúde	Redução de poluentes locais, ruído e emissões climáticas conforme matriz.	Priorizar corredores de alta exposição e medir benefícios.
Contratos	Investimento inicial e ativos de longa duração exigem novos arranjos.	Definir propriedade, garantias, desempenho e matriz de riscos.

Governança	Coordenação entre município, operador, energia, fornecedor e financiador.	Instituir programa intersetorial e indicadores auditáveis.
Dados e inovação	Otimização, dados abertos, gêmeos digitais e V2G ampliam eficiência.	Garantir acesso, interoperabilidade e segurança de dados.

Fonte: Elaboração própria com base nos 18 estudos selecionados (2026).

5. DISCUSSÃO

Os resultados sustentam uma compreensão da eletrificação como transformação sistêmica. A adoção alcança maior consistência quando veículo, infraestrutura, energia, operação, finanças e governança são planejados em conjunto. Esse achado aparece em estudos de projeto (Göhlich *et al.*, 2018), otimização de frota (Rogge *et al.*, 2018), transformação multiperíodo (Dirks; Schiffer; Walther, 2021) e investimentos integrados (Legault; Cabral; Sun, 2025). A convergência metodológica indica que decisões fragmentadas ampliam custos de coordenação e risco de indisponibilidade.

No Brasil, programas públicos podem adotar arquitetura por fases. A primeira fase reúne diagnóstico de dados, garagens, rotas e contratos. A segunda desenvolve projeto-piloto com escala suficiente para testar manutenção, energia e desempenho. A terceira amplia frotas em corredores compatíveis, aproveitando infraestrutura. A quarta integra recarga inteligente, geração, armazenamento e serviços de rede quando economicamente justificados. Cada fase produz dados para a seguinte e preserva capacidade de correção.

O TCO é condição necessária para decisão econômica e precisa de governança de premissas. Taxa de desconto, inflação, preço de diesel, tarifa de eletricidade, quilometragem, vida útil e valor residual podem alterar o resultado. Um estudo de viabilidade deve apresentar cenários e análise de sensibilidade. A publicação das premissas fortalece controle social e comparação entre propostas. A Administração obtém maior segurança ao exigir modelos auditáveis e dados de operação local.

Externalidades ampliam o valor social. Redução de poluentes, ruído e emissões climáticas gera benefícios distribuídos entre saúde, meio ambiente e qualidade urbana. A tarifa de transporte raramente captura esses ganhos. Financiamento público e climático encontra justificativa nesse descompasso. Uma avaliação socioeconômica pode combinar TCO financeiro e valor social, preservando distinção entre fluxo de caixa do operador e retorno para a sociedade.

O investimento inicial requer mecanismos compatíveis com ativos de longa duração. Contratos curtos ou receitas instáveis elevam risco e custo de capital. Modelos de leasing, locação e pagamento por disponibilidade distribuem despesas, e sua eficiência depende de competição, garantias e matriz de riscos. A experiência latino-americana sugere valor na participação de provedores de ativos e empresas de energia. Para o Brasil, a adaptação deve considerar regime de concessões, propriedade das garagens e capacidade de garantia pública.

A infraestrutura apresenta caráter estratégico. Uma garagem elétrica permanece útil por vários ciclos de veículos e pode atender múltiplos contratos. Esse atributo favorece tratamento patrimonial separado. Municípios podem avaliar propriedade pública, concessão

específica ou sociedade de propósito dedicado. A escolha deve considerar acesso à terra, financiamento, neutralidade entre operadores e capacidade técnica.

A rede elétrica exige coordenação antecipada. Prazos de conexão podem superar o prazo de entrega dos ônibus. A governança deve incorporar concessionária de distribuição desde os estudos iniciais. Mapas de capacidade, cronogramas de reforço e alternativas de localização orientam decisões. A recarga inteligente reduz picos e pode postergar investimentos, criando valor econômico e sistêmico.

Armazenamento e V2G oferecem oportunidades em estágio de desenvolvimento. Ahmadian *et al.* (2021) e Caustur *et al.* (2025) mostram potencial de redução de demanda e arbitragem. Manzolli *et al.* (2026) demonstra implicações de preço e compartilhamento de valor. A adoção brasileira pode avançar por projetos demonstrativos regulados, com monitoramento da degradação e regras transparentes. O serviço principal de transporte deve permanecer protegido por reservas de energia e prioridades operacionais.

A autonomia precisa ser administrada probabilisticamente. Valores nominais fornecidos em condições padronizadas possuem utilidade inicial. A operação urbana acrescenta variação. O estudo de Momen *et al.* (2025) mostra que médias podem ocultar cenários inviáveis. Frotas brasileiras se beneficiariam de campanhas de medição em diferentes estações, horários, cargas e topografias. A atualização contínua transforma o modelo de energia em ativo organizacional.

A telemetria amplia controle e cria desafios de governança de dados. Contratos devem garantir acesso, portabilidade, formato, segurança

cibernética e continuidade. Dados de veículo e carregador precisam permanecer disponíveis durante toda a concessão. Interfaces padronizadas reduzem dependência do fornecedor. Políticas de privacidade e segurança devem proteger trabalhadores, usuários e infraestrutura crítica.

A manutenção passa por requalificação. A redução de tarefas mecânicas convive com maior especialização elétrica. Oficinas precisam de ferramentas isoladas, áreas seguras e protocolos. Programas de formação podem envolver fabricantes, institutos técnicos e universidades. A transição justa inclui qualificação e redesenho de funções, aproveitando experiência acumulada das equipes.

O desenho contratual deve incorporar desempenho energético sem criar incentivos adversos. Pagamentos exclusivamente ligados a menor consumo poderiam afetar conforto térmico ou oferta. Indicadores balanceados combinam regularidade, disponibilidade, segurança, satisfação, energia e condição da bateria. Metas por faixa e mecanismos de melhoria contínua favorecem cooperação.

A seleção de rotas pode utilizar critérios multicritério. Quilometragem, consumo, emissões locais, exposição populacional, topografia, tempo de parada, retorno à garagem e infraestrutura disponível formam conjunto de avaliação. Rotas com alta aderência e benefício social elevado devem receber prioridade. Essa abordagem aumenta transparência e reduz decisões baseadas em visibilidade política isolada.

A política industrial oferece dimensão adicional. A escala pública pode apoiar produção local de veículos, baterias, carregadores e

software. Requisitos de conteúdo local precisam acompanhar desempenho e competição. Pesquisa aplicada pode adaptar sistemas a clima tropical, pavimento, topografia e operação brasileira. Programas de inovação orientados por desafios conectariam cidades, empresas e universidades.

O ciclo de vida das baterias requer política específica. Garantia, diagnóstico, reparo, segunda vida e reciclagem compõem cadeia de valor. A propriedade da bateria influencia incentivos. Quando o fornecedor mantém responsabilidade, existe estímulo à durabilidade e destinação. Quando o operador possui o ativo, contratos de manutenção e mercado secundário tornam-se relevantes. A rastreabilidade oferece suporte ambiental e financeiro.

A equidade deve orientar distribuição dos benefícios. Linhas em áreas de maior poluição e vulnerabilidade podem receber peso adicional. Garagens e infraestrutura também produzem impactos locais e precisam de licenciamento e diálogo comunitário. A eletrificação pode melhorar ambiente de trabalho de motoristas e equipes, com redução de ruído e vibração. Indicadores sociais ampliam avaliação do programa.

A relação entre tecnologia e qualidade do serviço merece atenção. Ônibus novos frequentemente incorporam climatização, acessibilidade, informação e conforto. A percepção positiva do usuário pode reforçar demanda e legitimidade. A gestão deve assegurar que a modernização tecnológica acompanhe frequência e confiabilidade. Um sistema limpo e irregular entrega parte do valor potencial, enquanto integração operacional converte inovação em serviço público melhor.

A literatura internacional oferece métodos transferíveis e resultados dependentes de contexto. Custos, tarifas e clima variam. A aplicação brasileira exige recalibração. O valor principal dos estudos está nas relações causais e estruturas de decisão: uso intenso melhora diluição do investimento; recarga coordenada reduz pico; dados reais reduzem incerteza; contratos de longo prazo favorecem financiamento; e integração entre atores sustenta a execução.

As lacunas identificadas incluem poucos estudos acadêmicos brasileiros com dados operacionais abertos, integração limitada entre saúde e planejamento de rotas, escassez de análises de contratos e financiamento locais, e necessidade de avaliações longitudinais de bateria e manutenção em clima tropical. Uma agenda nacional de pesquisa poderia criar repositório padronizado com consumo, disponibilidade, falhas, custos e emissões, respeitando confidencialidade comercial.

A rápida evolução de 2025 e 2026 aponta para digitalização mais profunda. Otimização robusta, gêmeos digitais, agentes e V2G expandem possibilidades. A adoção dessas ferramentas deve seguir maturidade institucional. Sistemas simples com boa qualidade de dados podem gerar valor elevado. A complexidade tecnológica deve acompanhar capacidade de operar, auditar e manter.

Em síntese, a eletrificação brasileira depende menos de uma solução universal e mais de uma competência pública de desenho e coordenação. Tecnologias estão disponíveis em múltiplas configurações. O desafio administrativo consiste em combinar metas, financiamento, contratos, infraestrutura, pessoas e dados em trajetória coerente. Essa competência se desenvolve com planejamento, execução gradual e aprendizado mensurável.

Quadro 3. Matriz de decisão para programas de eletrificação.

Etapa	Conteúdo principal	Produto esperado
1. Diagnóstico	Frota, rotas, consumo, garagens, contratos, qualidade do ar.	Base de dados validada e mapa de oportunidades.
2. Priorização	Aderência energética, benefício social, quilometragem e infraestrutura.	Carteira de rotas e garagens por fase.
3. Projeto	Veículo, bateria, carregador, conexão, layout e contingência.	Projeto executivo integrado.
4. Viabilidade	TCO, externalidades, sensibilidade, financiamento e valor residual.	Modelo econômico e fontes de recursos.
5. Contratação	Propriedade, garantia, dados, desempenho, energia e riscos.	Editais e contratos alinhados ao ciclo de vida.
6. Implantação	Obras, treinamento, testes, peças, segurança e comunicação.	Entrada gradual em operação.
7. Monitoramento	Energia, disponibilidade, falhas, emissões, custo e satisfação.	Painel de desempenho e auditoria.
8. Expansão	Lições, atualização de premissas e capacidade de rede.	Novo lote com risco reduzido.

Fonte: Elaboração própria (2026).

6. RECOMENDAÇÕES PARA A GESTÃO PÚBLICA E OPERADORES

Com base na síntese, propõe-se uma agenda gerencial em dez diretrizes. A primeira consiste em instituir programa de eletrificação com governança própria, metas, responsáveis e orçamento plurianual. A segunda consiste em construir inventário de rotas, garagens, contratos, rede e emissões. A terceira envolve medir consumo real em linhas representativas antes de aquisições em escala.

A quarta diretriz recomenda utilizar TCO financeiro e análise socioeconômica, com cenários e sensibilidades. A quinta orienta estruturar expansão por fases, sincronizando ônibus, obras, conexão, treinamento e peças. A sexta estabelece padrões de dados e interoperabilidade para veículos, carregadores e sistemas de gestão.

A sétima recomenda contratos de longo prazo com matriz de riscos, garantias de bateria, indicadores balanceados e acesso público a resultados agregados. A oitava direciona mecanismos financeiros que distribuam investimento inicial, incluindo leasing, provedores de ativos, crédito climático e garantias. A nona prevê plano de capacitação e segurança para motoristas, manutenção, despacho, energia e fiscalização.

A décima diretriz cria rotina de avaliação. Cada lote deve produzir relatório de consumo, disponibilidade, custo, emissões, satisfação e lições. A expansão seguinte deve utilizar essas evidências. Esse ciclo transforma projetos isolados em política pública adaptativa.

Para projetos iniciais, recomenda-se priorizar garagens com conexão viável e rotas de alta quilometragem, retorno previsível e benefício ambiental. A infraestrutura deve receber capacidade modular. Contratos de energia devem ser estudados antes da entrada em

serviço. Estoques críticos, assistência e contingência energética precisam estar disponíveis desde o início.

No âmbito federal, políticas podem apoiar padronização de estudos, crédito de longo prazo, garantias e assistência técnica. Bancos públicos podem exigir indicadores e promover agrupamento de projetos. Universidades e institutos podem desenvolver protocolos de medição e formação. A coordenação nacional reduziria custo de aprendizagem e ampliaria acesso de municípios médios.

7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A revisão sistemática identificou que a implantação de ônibus elétricos oferece benefícios consistentes de eficiência energética, redução de poluentes locais, menor ruído e potencial de redução de custos operacionais e emissões climáticas. Esses benefícios ganham escala em operações de alta utilização, com eletricidade de menor intensidade de carbono e planejamento integrado. A qualidade do resultado depende da configuração completa do sistema.

Os principais desafios concentram-se em investimento inicial, infraestrutura de recarga, capacidade da rede, autonomia sob condições reais, vida útil da bateria, financiamento, contratos, dados e capacitação. A literatura demonstra que esses desafios possuem soluções gerenciais e tecnológicas condicionadas ao contexto. Planejamento por fases, TCO, recarga inteligente, telemetria, otimização robusta e modelos de negócio de longo prazo formam conjunto coerente de respostas.

O problema de pesquisa pode ser respondido pela seguinte síntese: ônibus elétricos apresentam elevada capacidade de gerar valor público, e sua viabilidade brasileira emerge da coordenação entre

política de mobilidade, política climática, engenharia, finanças e administração de contratos. O veículo constitui um componente de uma rede de ativos e decisões. A transição bem estruturada transforma garagens, rotinas, competências e relações entre atores.

Para o Brasil, a matriz elétrica, a escala do transporte por ônibus e a capacidade industrial criam condições favoráveis. A diversidade urbana exige soluções adaptadas. Grandes metrópoles podem desenvolver portfólios de garagens e contratos; cidades médias podem iniciar por corredores e linhas selecionadas. Em ambos os casos, dados reais e transparência devem orientar expansão.

A contribuição administrativa do estudo consiste em organizar a eletrificação em seis eixos: seleção de rotas, dimensionamento tecnológico, infraestrutura e energia, financiamento e contratos, preparação operacional e monitoramento. Esses eixos permitem converter metas ambientais em programa executável. A institucionalização de governança específica reduz fragmentação e preserva continuidade entre gestões.

As limitações incluem heterogeneidade do corpus, predominância internacional e presença de preprints recentes. Essas características reforçam a necessidade de avaliações locais e atualização contínua. Pesquisas futuras podem aprofundar TCO brasileiro, desempenho de baterias em clima tropical, impactos sanitários por corredor, modelos contratuais, capacidade elétrica de garagens, cadeia de reciclagem e efeitos sobre trabalho e usuários.

A eletrificação dos ônibus representa oportunidade de modernizar transporte coletivo e gestão pública. O alcance dessa oportunidade aumenta quando investimento, operação e benefício social

permanecem conectados desde o diagnóstico até a avaliação. A trajetória mais sólida combina ambição climática, prudência financeira, competência técnica e aprendizagem institucional.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

_____. BRASIL. **Lei nº 12.587, de 3 de janeiro de 2012.** Institui as diretrizes da Política Nacional de Mobilidade Urbana. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 4 jan. 2012.

_____. SÃO PAULO (Município). **Lei nº 16.802, de 17 de janeiro de 2018.** Altera a Lei nº 14.933, de 5 de junho de 2009, para estabelecer metas de redução de emissões na frota de transporte coletivo. Diário Oficial da Cidade de São Paulo: São Paulo, 18 jan. 2018.

AHMADIAN, Amirhossein; DEO, Atharva Sunil; GARG, Paawan; ELAYYAN, Omar. **Electrification of commercial e-buses by utilizing stationary battery energy storage systems for mass transportation network in Los Angeles.** ArXiv:2104.10744, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520: informação e documentação - citações em documentos - apresentação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6022: informação e documentação - artigo em publicação periódica técnica e/ou científica - apresentação.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6023: informação e documentação - referências - elaboração.** Rio de Janeiro: ABNT, 2018.

CAUSTUR, Louise; HERTOEGHE, Penelope; MA, Tai-Yu; VANDEBROEK, Martina. **Integrated charging scheduling for electric buses with time-of-use tariffs, peak power, V2G, battery ageing, and renewables.** ArXiv:2509.05940, 2025.

CHEN, Yuche *et al.* **A review and outlook of energy consumption estimation models for electric vehicles.** ArXiv:2003.12873, 2020.

DIRKS, Nicolas; SCHIFFER, Maximilian; WALTHER, Grit. **On the integration of battery electric buses into urban bus networks.** ArXiv:2103.12189, 2021.

DIRKS, Nicolas; WAGNER, Dennis; SCHIFFER, Maximilian; WALTHER, Grit. **A concise guide on the integration of battery electric buses into urban bus networks.** ArXiv:2104.10752, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balanço Energético Nacional 2025: ano base 2024.** Rio de Janeiro: EPE, 2025.

GÖHLICH, Dietmar *et al.* **Design of urban electric bus systems.** Design Science, Cambridge, v. 4, e15, 2018.

GUANETTI, Jacopo *et al.* **Increasing electric vehicles utilization in transit fleets using learning, predictions, optimization, and automation.** ArXiv:2305.14732, 2023.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate change 2022: mitigation of climate change.** Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY. **Global EV Outlook 2025.** Paris: IEA, 2025.

LAJUNEN, Antti; LIPMAN, Timothy. **Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of diesel, natural gas, hybrid electric, fuel cell hybrid and electric transit buses.** Energy, Amsterdam, v. 106, p. 329-342, 2016.

LAJUNEN, Antti. **Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses.** Transportation Research Part C: Emerging Technologies, Amsterdam, v. 38, p. 1-15, 2014.

LEGAULT, Robin; CABRAL, Filipe; SUN, Xu Andy. **Integrated bus fleet electrification planning through accelerated logic-based Benders decomposition and restriction heuristics.** ArXiv:2508.05863, 2025.

LI, Jianqiu. **Battery-electric transit bus developments and operations: a review.** International Journal of Sustainable Transportation, London, v. 10, n. 3, p. 157-169, 2016.

MAHMOUD, Mohamed; GARNETT, Ryan; FERGUSON, Mark; KANAROGLOU, Pavlos. **Electric buses: a review of alternative powertrains.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, Amsterdam, v. 62, p. 673-684, 2016.

MANZOLLI, Jônatas Augusto; ESLAMI, Ali; MIRANDA-MORENO, Luis; YU, Jiangbo. **When agents meet electric bus fleet operations: pricing behavior, trade-offs, and policy implications in an aggregator framework.** ArXiv:2606.26400, 2026.

MENON, Unnikrishnan; PANDA, Divyani. **Design and evaluation of electric bus systems for metropolitan cities.** ArXiv:2010.15606, 2020.

MOMEN, Sara; MAKNOON, Yousef; VAN AREM, Bart; SHARIF AZADEH, Shadi. **Designing a robust and cost-efficient electrified**

bus network with sparse energy consumption data.

ArXiv:2501.05939, 2025.

MORADIPARI, Ahmadreza; TUCKER, Nathaniel; ZHANG, Tuo; CEZAR, Gustavo; ALIZADEH, Mahnoosh. **Mobility-aware smart charging of electric bus fleets.** ArXiv:1912.05681, 2019.

PAGE, Matthew J. *et al.* **The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews.** BMJ, London, v. 372, n. 71, 2021. doi: 10.1136/bmj.n71.

ROGGE, Matthias; VAN DER HURK, Evelien; LARSEN, Allan; SAUER, Dirk Uwe. **Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure.** Applied Energy, Amsterdam, v. 211, p. 282-295, 2018.

SCLAR, Ryan; GORGUNPOUR, Camron; CASTELLANOS, Sebastian; LI, Xue. **Barriers to adopting electric buses.** Washington, DC: World Resources Institute, 2019.

VIJAY, Upadhi *et al.* **Valuation of public bus electrification with open data.** arXiv:2209.12107, 2022.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **WHO global air quality guidelines: particulate matter, ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide.** Geneva: WHO, 2021.

XYLIA, Maria; SILVEIRA, Semida. **The role of charging technologies in upscaling the use of electric buses in public transport: experiences from demonstration projects.** Transportation Research Part A: Policy and Practice, Amsterdam, v. 118, p. 399-415, 2018.

APÊNDICE A - MATRIZ DE CARACTERIZAÇÃO DOS ESTUDOS

A matriz apresenta os 18 estudos que sustentam a síntese qualitativa. Os registros de 2025 e 2026 identificados como arXiv correspondem a preprints e foram utilizados pela atualidade metodológica, com interpretação compatível com seu estágio de publicação.

Quadro 4. Caracterização individual dos estudos selecionados.

Autor/ano	Método e contexto	Categorias	Resultado principal	Implicação administrativa
Lajunen (2014)	Avaliação técnico-econômica. Ciclos urbanos simulados.	Custo/TCO; Energia; Operação	O desempenho econômico depende da intensidade de uso, do consumo real, do preço da energia e da configuração do sistema de propulsão.	A decisão de compra requer análise de ciclo de vida e cenários operacionais próprios de cada rede.
Li (2016)	Revisão de literatura. Experiências internacionais.	Tecnologia; Recarga; Operação	A autonomia, o carregamento e o dimensionamento da bateria formam um sistema integrado de decisão.	A seleção tecnológica precisa acompanhar o perfil de rotas, garagens e oportunidades de recarga.

Mahmoud <i>et al.</i> (2016)	Revisão comparativa. Tecnologias de propulsão.	Tecnologia; Energia; Emissões	As arquiteturas elétricas apresentam vantagens energéticas e ambientais, com requisitos distintos de infraestrutura e maturidade.	A administração deve comparar soluções por desempenho, disponibilidade tecnológica e risco de implantação.
Lajunen e Lipman (2016)	Custo e emissões no ciclo de vida. Comparação de powertrains.	Custo/TCO; Emissões; Ciclo de vida	Custos e emissões variam conforme matriz elétrica, preço dos combustíveis, quilometragem e vida útil dos componentes.	O TCO deve incorporar externalidades e cenários de energia ao longo do contrato.
Rogge <i>et al.</i> (2018)	Otimização matemática. Planejamento de frota e recarga.	Recarga; Operação; Custo/TCO	Frota, tecnologia e pontos de recarga precisam ser dimensionados conjuntamente para reduzir custos e manter a operação.	Compras isoladas de veículos elevam o risco de ociosidade e de infraestrutura subdimensionada.
Xylia e Silveira (2018)	Análise de projetos demonstrati	Recarga; Política; Escala	A tecnologia de recarga influencia a expansão, a	Padronização técnica e planejamento de

	vos. Projetos europeus.		interoperabilidade e a organização operacional.	infraestrutura favorecem ganhos de escala.
Göhlich <i>et al.</i> (2018)	Projeto sistêmico. Sistemas urbanos.	Projeto; Recarga; Operação	O sistema elétrico urbano reúne veículo, bateria, carregador, rede, serviço e manutenção em uma arquitetura única.	A governança precisa integrar engenharia, operação, finanças e planejamento urbano.
Moradipari <i>et al.</i> (2019)	Programação inteira mista. Stanford Marguerite Shuttle.	Recarga; Energia; Operação	A coordenação entre alocação de rotas, tarifas horárias e previsão solar reduz o custo diário de energia.	Sistemas digitais de despacho e recarga agregam valor econômico à frota.
Menon e Panda (2020)	Estrutura de projeto e avaliação. Cidades metropolitanas.	Projeto; Tecnologia; Recarga	A avaliação exige compatibilização de veículo, powertrain, bateria, rota e carregamento.	Modelos de decisão multicritério apoiam escolhas transparentes e adaptadas à cidade.
Dirks, Schiffer e Walther (2021)	Otimização multiperíodo. Rede real de ônibus.	Custo/TCO; Recarga; Emissões	Planos graduais de transformação conectam investimento, infraestrutura,	A transição por fases reduz risco e permite aprendizado

			viabilidade operacional e redução de NOx.	contratual e tecnológico.
Dirks <i>et al.</i> (2021)	Revisão orientada à prática. Modelos de planejamento.	Governança; Operação; Planejamento	Existe distância entre requisitos cotidianos dos operadores e simplificações frequentes dos modelos acadêmicos.	A modelagem precisa incorporar regras trabalhistas, contingências, manutenção e restrições locais.
Ahmadian <i>et al.</i> (2021)	Modelagem técnico-econômica. Los Angeles.	Rede elétrica; Armazenamento; Custo/TCO	Armazenamento estacionário reduz picos de demanda e amplia a flexibilidade da recarga.	Garagens elétricas podem ser tratadas como ativos energéticos integrados.
Vijay <i>et al.</i> (2022)	Dados abertos e aprendizado de máquina. Boston e Milão.	Custo/TCO; Emissões; Saúde	Dados GTFS permitem estimar consumo, carbono, impactos sanitários e custo total por rota.	Cidades com recursos analíticos limitados podem priorizar rotas mediante dados abertos.
Guanetti <i>et al.</i> (2023)	Gêmeo digital e otimização. Operação de frota.	Digitalização; Operação; Energia	Predições de energia e automação de despacho ampliam a utilização dos veículos	Telemetria, qualidade de dados e capacidade analítica tornam-se

			elétricos em cenários simulados.	recursos estratégicos.
Momen <i>et al.</i> (2025)	Otimização robusta orientada por dados. Roterdã.	Incerteza; Recarga; Custo/TCO	Ignorar a variabilidade energética aumenta a incidência de viagens inviáveis; modelos robustos equilibram custo e confiabilidade.	Contratos e projetos precisam prever margens operacionais e atualização contínua dos parâmetros.
Legault, Cabral e Sun (2025)	Otimização de investimentos. Chicago.	Planejamento; Recarga; Custo/TCO	O planejamento integrado melhora a sequência temporal de aquisição de frota e implantação de carregadores.	Portfólios de investimento por fases favorecem disciplina financeira e expansão coordenada.
Caustur <i>et al.</i> (2025)	Programação inteira mista. Bruxelas.	Recarga; Rede elétrica; Bateria	Tarifas horárias, demanda máxima, armazenamento, energia solar e V2G alteram substancialmente o custo operacional.	A gestão energética precisa integrar contratos de energia, degradação e incentivos regulatórios.

Manzoli <i>et al.</i> (2026)	Agentes e otimização operacional. Garagem e V2G.	Governança; V2G; Operação	Agregadores digitais apoiam reotimização e flexibilidade, com efeitos distributivos ligados à formação de preços.	Regras auditáveis de tarifa e compartilhamento de valor protegem o interesse público.
------------------------------	--	---------------------------	---	---

Fonte: Elaboração própria (2026).

APÊNDICE B - PROTOCOLO REPRODUZÍVEL DA REVISÃO

Data da busca: 13 de julho de 2026. Todas as decisões foram registradas no mesmo dia em planilha de triagem e transpostas para o Apêndice D.

Recorte: publicações de 1º de janeiro de 2014 a 13 de julho de 2026, em português e inglês. A SciELO também foi pesquisada em espanhol para ampliar a recuperação latino-americana.

Fontes de informação: Google Scholar, arXiv, Crossref Metadata Search e SciELO. A busca recuperou e salvou 19, 20, 9 e 0 registros, respectivamente. Os nove registros da Crossref foram classificados como duplicatas após correspondência com títulos já obtidos no Google Scholar ou arXiv.

Unidade de análise: estudo científico diretamente relacionado à eletrificação de ônibus urbanos de transporte público e capaz de fornecer dados ou argumentos sobre tecnologia, operação, infraestrutura, energia, custos, emissões, planejamento ou governança. Legislação e documentos institucionais foram utilizados

somente para contextualização e permaneceram fora da síntese científica.

Triagem: leitura de título e resumo de 39 registros únicos. Foram excluídos 18 registros, com justificativa individual no Apêndice D. Os 21 relatórios restantes foram recuperados integralmente. Na elegibilidade, um registro foi excluído por escopo genérico de veículos elétricos e dois por natureza de relatório técnico sem método científico explícito.

Extração: autor, ano, título, fonte, método, contexto, tecnologia, categorias, resultados e implicações administrativas. A decisão final de cada registro recebeu um código R01-R48, preservando a ligação entre busca, triagem e síntese.

Síntese: análise temática qualitativa e frequências descritivas com múltipla codificação. A heterogeneidade metodológica impediu metanálise. Os 18 estudos incluídos foram caracterizados individualmente no Quadro 4.

Atualização recomendada: repetir as estratégias do Quadro 1, registrar a data e o total efetivamente salvo em cada fonte, comparar títulos e identificadores com R01-R48, aplicar os mesmos critérios e acrescentar estudos publicados após 13 de julho de 2026.

APÊNDICE C - RELATÓRIO METODOLÓGICO COMPLEMENTAR

A pesquisa reuniu 48 registros e selecionou 18 estudos. A escolha privilegiou diversidade metodológica e cobertura das decisões administrativas. O corpus inclui revisões tecnológicas, avaliações de custo e ciclo de vida, modelos de otimização, estudos de dados

abertos, sistemas de armazenamento e trabalhos recentes sobre incerteza e V2G.

As categorias com maior frequência foram infraestrutura e recarga, operação e programação, e custos e TCO. Esse padrão confirma que a transição depende de integração entre ativos, energia e serviço. As categorias de saúde, governança e trabalho aparecem em menor número e constituem agenda de pesquisa.

A principal limitação está na heterogeneidade e na predominância internacional. A principal força está na convergência entre métodos distintos sobre planejamento integrado, dados reais, implantação por fases e contratos de longo prazo. O artigo mantém os campos de identificação acadêmica editáveis e pode ser ajustado ao template específico da instituição quando disponibilizado.

APÊNDICE D - REGISTRO DOCUMENTAL DE IDENTIFICAÇÃO, TRIAGEM E ELEGIBILIDADE

Este apêndice documenta os 48 registros que compõem o fluxograma. Cada item recebeu um identificador único, uma fonte de recuperação, uma decisão e uma justificativa. As duplicatas foram mantidas no registro para demonstrar a contagem inicial e vinculadas ao registro único correspondente. Os estudos excluídos permaneceram fora da síntese de resultados.

Quadro 5. Registros incluídos na síntese qualitativa (n = 18).

ID	Fonte	Registro	Decisão	Justificativa
R01	Google Scholar	Lajunen (2014) - Energy consumption	Incluído	Avaliação técnico-econômica

		and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses.		diretamente relacionada ao TCO e à operação de ônibus urbanos.
R02	Google Scholar	Li (2016) - Battery-electric transit bus developments and operations: a review.	Incluído	Revisão específica sobre desenvolvimento, operação, autonomia e recarga de ônibus elétricos.
R03	Google Scholar	Mahmoud <i>et al.</i> (2016) - Electric buses: a review of alternative powertrains.	Incluído	Revisão comparativa de tecnologias de propulsão aplicáveis ao transporte coletivo.
R04	Google Scholar	Lajunen e Lipman (2016) - Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of transit buses.	Incluído	Apresenta custos e emissões no ciclo de vida com comparação entre tecnologias.

R05	Google Scholar	Rogge <i>et al.</i> (2018) - Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure.	Incluído	Integra dimensionamento de frota, composição tecnológica e infraestrutura de recarga.
R06	Google Scholar	Xylia e Silveira (2018) - The role of charging technologies in upscaling the use of electric buses in public transport.	Incluído	Analisa tecnologias de recarga e expansão de projetos demonstrativos de transporte público.
R07	Google Scholar	Göhlich <i>et al.</i> (2018) - Design of urban electric bus systems.	Incluído	Apresenta visão sistêmica de veículo, bateria, recarga, rede e operação urbana.
R08	Google Scholar	Dirks, Schiffer e Walther (2021) - On the integration of battery electric buses into urban bus networks.	Incluído	Planejamento multiperíodo de transição de frota e infraestrutura.
R09	Google Scholar	Dirks <i>et al.</i> (2021) - A concise guide on the integration of battery electric buses into	Incluído	Síntese orientada à prática e às necessidades dos operadores.

		urban bus networks.		
R10	Google Scholar	Vijay <i>et al.</i> (2022) - Valuation of public bus electrification with open data.	Incluído	Integra energia, carbono, saúde e TCO por rota com dados abertos.
R11	arXiv	Moradipari <i>et al.</i> (2019) - Mobility-Aware Smart Charging of Electric Bus Fleets (arXiv:1912.05681).	Incluído	Coordena atribuição de rotas, tarifas e recarga de frota de ônibus elétricos.
R12	arXiv	Menon e Panda (2020) - Design and Evaluation of Electric Bus Systems for Metropolitan Cities (arXiv:2010.15606).	Incluído	Estrutura integrada de projeto de veículo, propulsão e recarga para cidades metropolitanas.
R13	arXiv	Ahmadian <i>et al.</i> (2021) - Electrification of commercial e-buses by utilizing stationary battery energy storage systems (arXiv:2104.10744).	Incluído	Avalia armazenamento estacionário e impactos econômicos da recarga de ônibus.
R14	arXiv	Guanetti <i>et al.</i> (2023) -	Incluído	Aplica dados, previsão e

		Increasing electric vehicles utilization in transit fleets using learning, predictions, optimization, and automation (arXiv:2305.14732).		automação à utilização de frota de transporte coletivo.
R15	arXiv	Momen <i>et al.</i> (2025) - Designing a robust and cost-efficient electrified bus network with sparse energy consumption data (arXiv:2501.05939).	Incluído	Trata incerteza energética, robustez operacional e custos em rede de ônibus.
R16	arXiv	Legault, Cabral e Sun (2025) - Integrated Bus Fleet Electrification Planning Through Accelerated Logic-Based Benders Decomposition and Restriction Heuristics (arXiv:2508.05863).	Incluído	Integra investimentos anuais, frota, carregadores, programação e política operacional.
R17	arXiv	Caustur <i>et al.</i> (2025) - Integrated charging	Incluído	Integra tarifas, picos, armazenamento, V2G,

		scheduling for electric buses with time-of-use tariffs, peak power, V2G, battery ageing, and renewables (arXiv:2509.05940).		degradação e renováveis.
R18	arXiv	Manzoli <i>et al.</i> (2026) - When Agents Meet Electric Bus Fleet Operations (arXiv:2606.26400).	Incluído	Aborda agregadores digitais, reotimização, tarifas e implicações de política pública.

Fonte: Elaboração própria a partir do registro de triagem (2026).

Quadro 6. Registros excluídos na triagem de título e resumo (n = 18).

ID	Fonte	Registro	Motivo individual de exclusão
R19	Google Scholar	Lai e McCulloch (2016) - Levelized Cost of Energy for PV and Grid Scale Energy Storage Systems.	Sistemas de geração e armazenamento; ausência de ônibus e transporte público.
R20	Google Scholar	Kumar (2023) - Estimation of Remaining Useful Life and SOH of Lithium Ion Batteries (For EV Vehicles).	Estudo genérico de baterias; ausência de aplicação específica a ônibus urbanos.

R21	Google Scholar	Liu <i>et al.</i> (2024) - Battery swapping station location for electric vehicles: a simulation optimization approach.	Infraestrutura de troca para veículos elétricos em geral; escopo distinto do ônibus urbano.
R22	Google Scholar	Jia <i>et al.</i> (2017) - Optimizing Electric Taxi Charging System: A Data-Driven Approach.	Frota de táxis; dinâmica operacional diferente do transporte coletivo por ônibus.
R23	Google Scholar	Deza, Huang e Metel (2018) - Charging station optimization for balanced electric car sharing.	Carsharing individual; ausência de transporte coletivo programado.
R24	Google Scholar	Ma e Xie (2020) - Optimal fast charging station locations for electric ridesharing service.	Ridesharing flexível; ausência de frota regular de ônibus urbanos.
R25	Google Scholar	Rumpf e Kaul (2021) - A public transit network optimization model for equitable access to social services.	Planejamento de rede de transporte; ausência de eletrificação, bateria ou recarga.
R26	arXiv	Bai <i>et al.</i> (2026) - Rollout-Based Charging Scheduling for Electric Truck Fleets in Large Transportation Networks (arXiv:2604.02768).	Transporte rodoviário de cargas; fora do escopo de ônibus públicos.
R27	arXiv	Wendimagegnehu <i>et al.</i> (2026) - Coupled Routing and Charge Schedule Optimization	Frotas de entrega; fora do transporte público coletivo.

		of Electrified Delivery Truck Fleets (arXiv:2606.00792).	
R28	arXiv	Bertucci, Salazar e Hofman (2026) - Battery Electric Truck Infrastructure Co-design (arXiv:2604.00659).	Infraestrutura de caminhões elétricos e logística.
R29	arXiv	Luke <i>et al.</i> (2021) - Joint Optimization of Autonomous Electric Vehicle Fleet Operations and Charging Station Siting (arXiv:2107.00165).	Frota autônoma de veículos leves; ausência de ônibus de transporte público.
R30	arXiv	KC e Song (2025) - Evolving School Transport Electrification (arXiv:2511.00600).	Transporte escolar e roteamento de estudantes; população e operação distintas do transporte urbano regular.
R31	arXiv	Khele, Jiang e Wang (2023) - Fairness-Aware Optimization of Vehicle-to-Vehicle Interaction for Smart EV Charging Coordination (arXiv:2304.02232).	Coordenação genérica entre veículos elétricos; ausência de aplicação a ônibus.
R32	arXiv	Yang <i>et al.</i> (2024) - Optimizing Electric Carsharing System Operations and Battery Management (arXiv:2407.06472).	Sistema de compartilhamento de automóveis; fora do transporte coletivo por ônibus.

R33	arXiv	Vehlhaber e Salazar (2026) - Energy Management Strategies for Electric Aircraft Charging (arXiv:2601.23108).	Aviação elétrica; escopo modal incompatível.
R34	arXiv	Wang <i>et al.</i> (2021) - Public Transport Planning: When Transit Network Connectivity Meets Commuting Demand (arXiv:2103.16084).	Desenho de rotas; ausência de eletrificação e infraestrutura energética.
R35	arXiv	Liu <i>et al.</i> (2025) - Time Sensitive Multiple POIs Route Planning on Bus Networks (arXiv:2512.22893).	Roteamento de passageiros; ausência de análise de frota elétrica.
R36	arXiv	Weng <i>et al.</i> (2020) - Towards Better Bus Networks: A Visual Analytics Approach (arXiv:2008.10915).	Análise visual de redes e rotas; ausência de tecnologia elétrica.

Fonte: Elaboração própria a partir do registro de triagem (2026).

Quadro 7. Relatórios excluídos após avaliação de texto completo (n = 3).

ID	Fonte	Registro	Justificativa individual
R37	Google Scholar	Sclar <i>et al.</i> (2019) - Barriers to Adopting Electric Buses.	Relatório institucional de orientação. O documento foi mantido como fonte contextual, enquanto permaneceu fora do corpus científico por ausência de desenho de

			pesquisa primária ou protocolo de revisão explicitado para extração na matriz.
R38	Google Scholar	Eudy e Jeffers (2017) - Foothill Transit Battery Electric Bus Demonstration Results: Second Report.	Relatório técnico de monitoramento de um projeto demonstrativo. A publicação oferece dados operacionais, porém sua estrutura não correspondeu aos critérios metodológicos definidos para a síntese científica.
R39	arXiv	Chen <i>et al.</i> (2020) - A Review and Outlook of Energy Consumption Estimation Models for Electric Vehicles (arXiv:2003.12873).	Revisão de veículos elétricos em geral. O texto identifica ônibus como lacuna futura e não fornece resultados específicos de transporte coletivo para a matriz de extração.

Fonte: Elaboração própria a partir do registro de triagem (2026).

Quadro 8. Registros removidos como duplicatas antes da triagem (n = 9).

ID	Fonte	Registro duplicado	Vínculo de deduplicação
R40	Crossref	Lajunen (2014) - Energy consumption and cost-benefit analysis of hybrid and electric city buses.	Duplicata de R01; título, autoria e ano coincidentes.
R41	Crossref	Li (2016) - Battery-electric transit bus developments and operations: a review.	Duplicata de R02; título,

			autoria e ano coincidentes.
R42	Crossref	Mahmoud <i>et al.</i> (2016) - Electric buses: a review of alternative powertrains.	Duplicata de R03; título, autoria e ano coincidentes.
R43	Crossref	Lajunen e Lipman (2016) - Lifecycle cost assessment and carbon dioxide emissions of transit buses.	Duplicata de R04; título, autoria e ano coincidentes.
R44	Crossref	Rogge <i>et al.</i> (2018) - Electric bus fleet size and mix problem with optimization of charging infrastructure.	Duplicata de R05; título, autoria e ano coincidentes.
R45	Crossref	Xylia e Silveira (2018) - The role of charging technologies in upscaling the use of electric buses in public transport.	Duplicata de R06; título, autoria e ano coincidentes.
R46	Crossref	Göhlich <i>et al.</i> (2018) - Design of urban electric bus systems.	Duplicata de R07; título, autoria e ano coincidentes.
R47	Crossref	Dirks, Schiffer e Walther (2021) - On the integration of battery electric buses into urban bus networks.	Duplicata de R08; título, autoria e ano coincidentes.
R48	Crossref	Vijay <i>et al.</i> (2022) - Valuation of public bus electrification with open data.	Duplicata de R10; título, autoria e ano coincidentes.

Fonte: Elaboração própria a partir do registro de triagem (2026).

¹ Doutorando em Energia e Sustentabilidade pela UNILA, Mestre em Políticas Públicas e Desenvolvimento pela UNILA, Especialista em Gestão de Organizações Públicas pela UFPR. Tem experiência na área de Administração Pública, Gestão de Projetos, Planejamento Estratégico, Planejamento Urbano, Economia e Política e Políticas Públicas. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

² Docente Doutor em Engenharia Elétrica do PPGIES da UNILA. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)