

UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE
PÚBLICO URBANO: AVALIAÇÃO INTEGRADA DE
TECNOLOGIAS DE ÔNIBUS ZERO EMISSÃO
PARA PLANEJAMENTO E POLÍTICAS PÚBLICAS**

GABRIEL SANTOS RODRIGUES

SÃO PAULO

2025

UNIVERSIDADE PAULISTA - UNIP
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE PRODUÇÃO

**DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE
PÚBLICO URBANO: AVALIAÇÃO INTEGRADA DE
TECNOLOGIAS DE ÔNIBUS ZERO EMISSÃO
PARA PLANEJAMENTO E POLÍTICAS PÚBLICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista - UNIP como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia de Produção.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Tsuguio Okano

Área de Concentração: Gestão de Sistemas de Operação

Linha de Pesquisa: Redes de Empresas e Planejamento da Produção

Projeto de Pesquisa: Logística e Mobilidade nas Cadeias de Suprimentos Inteligentes e Sustentáveis

GABRIEL SANTOS RODRIGUES

SÃO PAULO

2025

Rodrigues, Gabriel Santos.

Descarbonização do transporte público urbano: avaliação integrada de tecnologias de ônibus zero emissão para planejamento e políticas públicas / Gabriel Santos Rodrigues. – 2025.

140 f. : il. + CD-ROM.

Tese de Doutorado Apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Paulista, São Paulo, 2025.

Área de concentração: Gestão de Sistemas de Operação.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Tsuguio Okano.

1. Ônibus de zero emissão. 2. Transporte público urbano.
3. Eletromobilidade. 4. Planejamento de transportes sustentáveis.
I. Okano, Marcelo Tsuguio (orientador). II. Título.

GABRIEL SANTOS RODRIGUES

**DESCARBONIZAÇÃO DO TRANSPORTE
PÚBLICO URBANO: AVALIAÇÃO INTEGRADA DE
TECNOLOGIAS DE ÔNIBUS ZERO EMISSÃO
PARA PLANEJAMENTO E POLÍTICAS PÚBLICAS**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação
em Engenharia de Produção da Universidade Paulista
- UNIP como requisito parcial para obtenção do título
de Doutor em Engenharia de Produção.

Aprovado em:_____

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Marcelo Tsuguio Okano
Universidade Paulista - UNIP

Prof. Dr. Rodrigo Carlo Toloi
Instituto Federal de Mato Grosso - IFMT

Prof. Dr. Marcelo Eloy Fernandes
Centro Paula Souza - CPS

Prof. Dr. Hécio Raymundo
Universidade Paulista - UNIP

Prof. Dr. Anderson Ribeiro Correia
Universidade Paulista - UNIP

DEDICATÓRIA

Dedico esse trabalho ao meu pai, Manuel Filipe Rodrigues. Impossível escrever esses textos, sem lembrar seu cuidado, quando eu era só um garotinho que gostava de andar de ônibus e metrô para cima e para baixo.

Dedico a minha mãe Marinalva dos Santos, que mesmo sem entender o processo, me apoiou muito na realização desse projeto.

Dedico ainda a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram, para que esse projeto tivesse êxito.

Por fim, não posso deixar de dedicar ao pequeno Gabriel, que na sua pequenês, sendo o Gabrielzinho, nunca imaginara um dia fazer ciência.

Essa é a história de um menino que gostava de observar ônibus da janela de casa, até que essa janela, se abriu para um caminho infinitamente maior do que os olhos daquele garoto poderiam alcançar.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus a oportunidade, de acordar todos os dias para evoluir na graça de ser um ser humano melhor, pelas pessoas que passaram e me deram força, coragem e confiança, e às que me muito ensinaram, sem ao menos terem dito uma palavra.

Preciso agradecer a minha mãe Marinalva, pela paciência que teve comigo nos momentos difíceis, a minha família e aos meus amigos que de alguma forma eu escolhi para fazerem parte da minha família também.

Entre essas pessoas, em especial, estão um casal de nerds que acreditaram que eu poderia fazer ciência João Gilberto e Sivanilza. A eles meu muito obrigado por confiarem a mim a oportunidade, sem eles, eu não teria ido tão longe (literalmente).

Jairo, Rosane e Robson, amigos que FATEC-ZL me deu, que me abraçaram antes de sair para conhecer o mundo e que me deram o primeiro abraço quando eu voltei, cheio de histórias para contar, muito obrigado!

João Paulo, Taline, Felipe e Vinícius, muito obrigado pelo incentivo, espero ter retribuído o carinho de vocês.

Gostaria de agradecer ao PPGE/UNIP, seus professores, em especial o Prof. Marcelo Okano que aceitou o desafio de me acompanhar após a saída do Prof. João. Aos funcionários, sempre muito prestativos que nos ajudam diariamente. Aos colegas, que contribuíram direta ou indiretamente nesse trabalho. Aos amigos que esse programa me deu: Paula, Jonatas, Acácio e Márcio, obrigado pelos ensinamentos e por fazerem parte desse caminho.

Agradeço as coordenadoras na Unidade de Planejamento e Gestão Estratégica (UPGE) da Secretaria Municipal de Educação de São Paulo (SME) Clarissa e Helena, ao Diretor Marcel e a Lider do Escritório de Processos Patrícia, que me permitiram conciliar o trabalho com o desenvolvimento dessa pesquisa.

Gostaria de agradecer ao Prof. Rodrigo Toloi, Prof. Marcelo Eloy, Prof. Hécio Raymundo e Prof. Anderson Ribeiro, membros da banca examinadora, e minha prima Profa. Jaira Santos pela revisão do texto dessa tese, que contribuíram com seu tempo, dedicação e conhecimento para o sucesso desse trabalho.

Por fim, agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES), pelo apoio essencial para a realização deste trabalho, por meio do financiamento proporcionado (Código de Financiamento 001). Sem este suporte, o desenvolvimento da pesquisa não teria sido possível.

EPÍGRAFE

“Ensinar não é transferir conhecimento, mas criar as possibilidades para a sua produção ou a sua construção.”

Paulo Freire

RESUMO

A descarbonização do transporte público urbano é fundamental para a construção de cidades mais saudáveis, eficientes e sustentáveis. No Brasil, onde os ônibus são o principal modo de deslocamento coletivo e dependem majoritariamente do diesel, a transição para tecnologias de emissão zero representa a oportunidade para reduzir emissões de Gases de Efeito Estufa, melhorar a qualidade do ar e fortalecer políticas públicas de mobilidade. Esta tese avalia de forma integrada a viabilidade técnica, operacional, econômica e ambiental das principais tecnologias de ônibus zero emissão — ônibus elétrico movido a bateria -BEB, ônibus elétrico movido a célula de combustível de hidrogênio - FCEB e trólebus — identificando suas complementaridades, limitações e aplicações potenciais em São Paulo. Os resultados são apresentados em cinco estudos que aprofundam o estado da arte, o desempenho comparado das tecnologias, as condições reais de operação e os requisitos sistêmicos para a eletrificação da frota. O primeiro estudo realiza uma análise bibliométrica; o segundo usa um modelo multicritério (AHP) para comparar ônibus elétricos e a diesel; o terceiro avalia a substituição de ônibus a diesel por elétricos no Expresso Tiradentes; o quarto detalha o desempenho e a relevância dos trólebus; e o quinto integra as evidências ao comparar custos, infraestrutura, eficiência energética e adequação operacional das tecnologias zero emissão. Os resultados mostram que as tecnologias são complementares: BEBs oferecem flexibilidade; FCEBs ampliam autonomia; e trólebus apresentam elevada confiabilidade e eficiência em corredores estruturados. A análise integrada evidencia que a descarbonização depende não só das características dos veículos, mas também de fatores como infraestrutura de recarga, disponibilidade energética, governança e modelos de financiamento. A tese contribui ao fornecer uma avaliação multidimensional e comparativa das tecnologias zero emissão no Brasil, oferecendo subsídios para o planejamento da mobilidade urbana sustentável, para políticas públicas de transição energética e para decisões sobre eletrificação de frotas.

Palavras-chave: Ônibus de zero emissão; Transporte público urbano; Eletromobidade; Planejamento de transportes sustentáveis.

ABSTRACT

Decarbonizing urban public transport is essential for building healthier, more efficient, and more sustainable cities. In Brazil, where buses remain the main mode of collective transport and depend predominantly on diesel, the transition to zero-emission technologies represents the opportunity to reduce greenhouse gas emissions, improve air quality, and strengthen mobility policies. This dissertation provides an integrated assessment of the technical, operational, economic, and environmental feasibility of the main zero-emission bus technologies—battery electric buses (BEB), hydrogen fuel cell electric buses (FCEB), and trolleybuses—identifying their complementarities, limitations, and potential applications in São Paulo. The results are presented across five studies that deepen the understanding of the state of the art, comparative technological performance, real operating conditions, and systemic requirements for fleet electrification. The first study conducts a bibliometric analysis; the second applies a multicriteria model (AHP) to compare electric and diesel buses; the third evaluates the replacement of diesel buses with electric buses in the Expresso Tiradentes corridor; the fourth examines the performance and relevance of São Paulo's trolleybus system; and the fifth integrates the evidence by comparing costs, infrastructure requirements, energy efficiency, and operational suitability of zero-emission technologies. The findings indicate that the technologies are complementary: BEBs offer operational flexibility; FCEBs provide extended range; and trolleybuses demonstrate high reliability and efficiency in structured corridors. The integrated analysis shows that decarbonizing public transport depends not only on vehicle characteristics but also on factors such as charging infrastructure, energy availability, governance, and financing models. This dissertation contributes by providing a multidimensional and comparative evaluation of zero-emission bus technologies in the Brazilian context, offering evidence to support sustainable urban mobility planning, energy transition policies, and decision-making regarding fleet electrification.

Keywords: Zero-emission buses; Urban public transport; Electromobility; Sustainable transport planning.

UTILIDADE DA TESE

A eletrificação das frotas de ônibus urbanos no Brasil é vista como uma maneira de tornar o Transporte Público Coletivo mais sustentável. No Brasil, 85,7% dos deslocamentos realizados através do Transporte Público são feitos por ônibus, o qual se insere em um sistema que privilegia o uso do transporte individual.

Ao integrar análise bibliométrica, método multicritério, avaliação operacional e o comparativo entre ônibus elétricos a bateria, trólebus e ônibus movidos a hidrogênio, o trabalho oferece uma base científica para estudos futuros sobre eletrificação de frotas, alicerçado em evidências econômicas, ambientais e sociais.

Os resultados oferecem informações objetivas e comparáveis, úteis aos gestores públicos, operadores de transporte, consultorias, fabricantes e reguladores que buscam implementar ou expandir frotas elétricas. Além disso, a metodologia utilizada pode ser adaptada e replicada por outras localidades, pois subsidia escolhas de tecnologias adequadas para diferentes contextos urbanos, avalia custos operacionais e estrutura modelos de financiamento e renovação de frota.

O estudo reforça que a transição para veículos de emissão zero pode ser economicamente racional e ambientalmente estratégica. Dessa maneira esse trabalho contribui com a redução de emissões e a melhoria da qualidade do transporte público nas cidades, fortalecendo a agenda de justiça ambiental e social.

Essas contribuições, estão alinhadas com três Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS): ODS 11 — Cidades e Comunidades Sustentáveis (Transporte seguro e sustentável), ODS 13 — Ação Contra a Mudança Global do Clima (Redução de emissões), e ODS 7 — Energia Acessível e Limpa (Aumentar a cooperação internacional para facilitar o acesso à pesquisa e tecnologia de energia limpa).

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

1	Estrutura da Tese	19
2	Resumos dos Relatórios de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)	22
3	A Mobilidade Urbana Sustentável no Relatório de Avaliação 6 do IPCC	27
4	Modelos de Ônibus Elétricos Zero Emissões (ZEB)	29
5	Trólebus	32
6	Tecnologia In-Motion Charging (IMC)	33
7	Ônibus Elétrico Movido a Bateria – BEBs	34
8	Recarga de Oportunidade	35
9	Ônibus Movido a Célula de Combustível de Hidrogênio (FCEB)	36
10	Ônibus Movido a Célula de Combustível de Hidrogênio Brasileiro	38
11	Faixa Exclusiva de Ônibus	40
12	Corredor de Ônibus	41
13	Bus Rapid Transit - BRT	42
14	13th IWACP.	49
15	ENERGIES	60
16	SUPTM 2024.	78
17	ENERGIES	83
18	SADSJ – South American Development Society Journal.	101

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AHP *Analytic Hierarchy Process*

ANTP Associação Nacional de Transportes Públicos

BEB *Battery Electric Bus* - Ônibus Elétrico a Bateria

BRT *Bus Rapid Transit* - Sistema de Ônibus Rápido

CAPES Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior

CAPEX *Capital Expenditure* - Despesas de Capital

CETESB Companhia Ambiental do Estado de São Paulo

CH₄ Metano

CO Monóxido de Carbono

CO₂ Dióxido de Carbono

E-Bus Radar Plataforma de Monitoramento de Frotas de Ônibus Elétricos

EMTU Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos S.A. de São Paulo

FCEB *Fuel Cell Electric Bus* - Ônibus Movido a Célula de Combustível de Hidrogênio

GEE Gases de Efeito Estufa

HVO *Hydrotreated Vegetable Oil* - Óleo Vegetal Hidrotratado

IMC *In-Motion Charging*

IPCC Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas

ITS *Intelligent Transport Systems* - Sistemas Inteligentes de Transporte

METRÔ-SP Companhia do Metropolitano de São Paulo

MP Material Particulado

N₂O Óxido Nitroso

NO Óxido Nítrico

NO_x Óxidos de Nitrogênio

NTU Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos

ODS Objetivos de Desenvolvimento Sustentável

ONU Organização das Nações Unidas

OPEX *Operational Expenditure* - Despesas Operacionais

O₃ Ozônio

PlanClima SP Política de Mudança do Clima no Município de São Paulo

PPGEP Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção

Proconve Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores

RMSP Região Metropolitana de São Paulo

SO₂ Dióxido de Enxofre

SPTTrans São Paulo Transporte S.A.

TTW *Tank-to-Wheel* - Do Tanque à Roda

UNIP Universidade Paulista

USP Universidade de São Paulo

WTT *Well-to-Tank* - Do Poço ao Tanque

WTW *Well-to-Wheel* - Do Poço à Roda

ZEB *Zero Emission Buses* - Ônibus Elétricos Zero Emissão

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
1.1	Considerações Iniciais	14
1.2	Motivação/Justificativa	16
1.3	Objetivos	16
1.3.1	Objetivo Geral	16
1.3.2	Objetivos Específicos	17
1.4	Estrutura da Tese	17
2	REVISÃO DE LITERATURA	20
2.1	Panorama das Mudanças Climáticas e Compromissos Globais	20
2.2	Mobilidade Urbana Sustentável e Descarbonização	25
2.3	Eletromobilidade	28
2.4	Tecnologias de Ônibus Elétricos Zero Emissão - ZEBs	30
2.4.1	Trólebus	31
2.4.2	Ônibus Elétrico Movido a Bateria – BEB	34
2.4.3	Ônibus Elétrico Movido a Hidrogênio – FCEB	36
2.5	Priorização dos sistemas de ônibus	38
3	METODOLOGIA	43
3.1	Pesquisa Qualitativa e Quantitativa	43
3.2	Pesquisa por artigos - Multipaper	43
3.3	Pesquisa Aplicada - Resumo das Metodologias dos Artigos	44
3.3.1	Artigo 1: “ <i>Bus Electrification Trends in the Literature: A Bibliometric Analysis</i> ” - Método Utilizado: Pesquisa Bibliométrica	44
3.3.2	Artigo 2: <i>A Study on the Viability of Adopting Battery Electric Vehicles in Bus Rapid Transit in Brazil Using the AHP Method</i> ” - Método Utilizado: <i>Analytic Hierarchy Process</i> - AHP	45
3.3.3	Artigo 3: <i>Analysis of the Substitution of Diesel Buses by Electric Ones in Rapid Systems: an Application of the Methodology in Expresso Tiradentes (São Paulo, Brazil)</i> - Método Utilizado: Pesquisa Quantitativa	46
3.3.4	Artigo 4: <i>Environmental Impact Reduction of a Trolleybus System in the City of São Paulo, Brazil</i> - Método Utilizado: Pesquisa Quantitativa	46

3.3.5	Artigo 5: A Tecnologia <i>Full Cell Electric Bus (FCEB)</i> na Eletromobilidade: Uma Comparação das Tecnologias Disponíveis e Seus Impactos na Operação - Método Utilizado: Revisão Bibliográfica	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	49
4.1	<i>13th International Workshop on Advances in Cleaner Production</i>	49
4.2	<i>ENERGIES</i>	60
4.3	<i>SUPTM 2024 : 2nd Conference on Future Challenges in Sustainable Urban Planning & Territorial Management</i>	78
4.4	<i>ENERGIES</i>	83
4.5	<i>SADJS – South American Development Society Journal</i>	101
4.6	Integração Analítica da Pesquisa	125
5	CONSIDERAÇÕES FINAIS	128
5.1	Conclusões	128
5.2	Limitações e Trabalhos Futuros	130
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	132

1 INTRODUÇÃO

1.1 Considerações Iniciais

As atividades humanas, intensificaram as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), que afetam a troca de calor entre o planeta Terra e o sistema solar. O aumento dessas emissões contribuem para o aumento da temperatura do planeta e colocam em risco a estabilidade dos sistemas naturais e sociais ([MEDEIROS; SCABIN, 2023](#)).

Hoje as atividades nos centros urbanos, são responsáveis por 70% de todas as emissões de GEE do planeta. Aliado a isso, a população dos centros urbanos convive com o aumento dos casos de problemas respiratórios, cardiovasculares e até de mortes, decorrentes da poluição atmosférica local ([CAPOMACCIO, 2024](#)).

Um dos grandes desafios urbanos que contribui para a poluição atmosférica é a necessidade de circulação. [Ritchie \(2020\)](#), estimou que das emissões mundiais de GEE, 60,5% estão relacionadas as atividades de transporte, e que 12,7% estão diretamente ligadas ao deslocamento de pessoas.

No Brasil, houve um aumento dos deslocamentos motorizados a partir da década de 1950, devido a políticas de uso e ocupação do solo, que afastaram as pessoas de seus locais de trabalho. Sabe-se que a forma que as pessoas escolhem para se deslocar é feita individualmente, a partir de um conjunto pessoal de vantagens e desvantagens ([VASCONCELLOS, 2016](#)).

Os deslocamentos de pessoas com o uso de veículos motorizados particulares geram congestionamento, poluição e um aumento do número de acidentes ([AMICCI et al., 2018](#)).

Em pesquisa, os brasileiros, responderam que ônibus é o principal modo de transporte do país, com 35%, já os modos individuais motorizados (automóveis e motocicletas), somados, representam 21% do total ([IPSOS, 2025](#)).

Para [Vasconcellos \(2016\)](#), o ônibus é o modo de transporte motorizado menos competitivo por ter um tempo de viagem maior e um custo tarifário nem sempre competitivo. Além disso, as políticas públicas de financiamento existentes no Brasil, incentivam o uso do transporte individual. Diante disso, [Mishra \(2019\)](#), acredita que o impacto da mobilidade urbana na economia ainda é pouco considerado pelos formuladores de políticas públicas, principalmente nos países subdesenvolvidos.

Por isso deve-se pensar em uma forma sustentável de mobilidade, conectando pessoas às oportunidades, sem comprometer o futuro. Assim [Amicci et al. \(2018\)](#) ressalta que é tornando o transporte público coletivo competitivo em relação ao transporte individual, melhorando a qualidade e o tornando mais rápido, que a sociedade

escolherá o transporte público como forma usual de deslocamento

[Vasconcellos \(2016\)](#) menciona que quanto mais o transporte público atender as necessidades das pessoas em geral, menor serão as chances delas procurarem soluções individuais.

Sabe-se que as principais reclamações dos passageiros do transporte público coletivo são: tempo de espera longo, ônibus lotados e o demorado tempo de trajeto. Já as pessoas que não usam transporte público, afirmam não usá-lo pelos mesmos motivos acima mencionados. Apenas 5% dos pesquisados afirmaram não usar de modo algum o transporte público ([IPSOS, 2025](#)).

Assim, é possível inferir que, se houver uma redução do tempo de espera e de trajeto, além da lotação dos veículos, é possível fazer o caminho reverso e atrair novos usuários para o transporte público coletivo.

Para reduzir o tempo de viagem, uma das medidas a serem tomadas seria à priorização dos sistemas de transportes por ônibus, com a implantação de faixas exclusivas, corredores e BRTs (*Bus Rapid Transit*). Estes podem aumentar a velocidade comercial do sistema de ônibus em até 10 km/h, tornando-se assim mais rápido e reduzindo o tempo de viagem. Dessa forma, o sistema de ônibus fica mais eficiente e pode reduzir as tarifas em até 25% ([IEMA, 2017](#); [NTU, 2017](#); [AMICCI et al., 2018](#)).

Uma mobilidade urbana mais sustentável passa por formas de aliar a eficiência à sustentabilidade ambiental, através de fontes de energia menos poluentes como a eletricidade ([YIGITCANLAR, 2022](#)).

A cidade de São Paulo é a maior cidade brasileira, e está adotando medidas como a utilização de combustíveis mais sustentáveis em sua frota, incluindo a eletricidade ([PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2025d](#)).

Assim os ônibus elétricos já podem substituir os ônibus convencionais em muitas cidades do mundo ([TENG; CHEN; FAN, 2020](#)), melhorando a qualidade do ar tornando cidades mais habitáveis ([HAMURCU; EREN, 2020](#)).

Para [Tzeng, Lin e Opricovic \(2005\)](#), a eletricidade pode ser considerada o combustível alternativo com menor poluição de ar. [Wang et al. \(2017\)](#), afirmam que é mais econômico e ecológico a utilização de ônibus elétricos no sistema de transporte público.

Nesse sentido, cidades do mundo inteiro tem baseado suas estratégias de descarbonização de seus ônibus através da eletricidade ([YIGITCANLAR, 2022](#)).

Diante disso, esta tese busca através de levantamentos bibliográficos, análises multicritério realizadas através de ferramentas computacionais, e a simulação em um cenário real, estudar a viabilidade de ônibus elétricos nos sistemas de transporte público coletivo no Brasil, em especial, na cidade de São Paulo.

1.2 Motivação/Justificativa

A intensificação das emissões de Gases de Efeito Estufa e da poluição atmosférica nas cidades, representa um dos maiores desafios para o desenvolvimento sustentável. O conceito mais amplo do desenvolvimento sustentável, é o equilíbrio entre a satisfação das necessidades humanas e a proteção do ambiente natural, ou seja, além de satisfazer as necessidades presentes não pode comprometer a capacidade das próximas gerações no futuro (CARVALHO, 2016).

No Brasil, a mobilidade urbana é caracterizada pelo incentivo ao uso do transporte individual motorizado, gerando congestionamentos e uma divisão desigual do espaço público. Em consequência disso reflete no aumento da poluição atmosférica, e outras externalidades que prejudicam a saúde dos seres humanos e dos outros seres vivos (VASCONCELLOS, 2016; US EPA, 2015).

Para se alcançar uma mobilidade urbana sustentável deve-se aliar, proteção ambiental, sustentabilidade econômica e justiça social (CARVALHO, 2016). Para isso, deve-se pensar em aumentar a participação do transporte coletivo, que possui uma emissão proporcionalmente menor, aliadas à sustentabilidade econômica, ou seja, com formas claras de financiamento e custeio, e justiça social para permitir que mesmo as pessoas de baixa renda tenham acesso ao sistema de transporte (CARVALHO, 2016).

O ônibus é o principal modo de deslocamento do país, especialmente entre as pessoas de menor renda (IPSOS, 2025). A operação em condições desfavoráveis de tráfego e majoritariamente com tecnologia poluidora como o diesel, revela a necessidade de uma transição energética aliada aos princípios de sustentabilidade econômica e justiça social. Dessa maneira, essa pesquisa se justifica pela necessidade de se produzir uma análise integrada, capaz de orientar decisões e apoiar a construção de sistemas de transporte eficientes, equitativos e alinhados aos princípios mobilidade urbana sustentável.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Avaliar de forma integrada a viabilidade técnica, operacional, econômica e ambiental das principais tecnologias de ônibus zero emissão, identificando suas aplicabilidades e contribuições potenciais, para o planejamento e a formulação de políticas públicas de descarbonização do transporte público urbano.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos desta tese são:

1. Mapear e analisar a produção científica internacional sobre ônibus elétricos e tecnologias zero emissão, identificando tendências, abordagens predominantes e lacunas relevantes para o contexto brasileiro;
2. Comparar o desempenho técnico, econômico, ambiental e social de ônibus elétricos a bateria e ônibus a diesel, utilizando método multicritério (AHP - *Analytic Hierarchy Process*) para apoiar decisões de substituição tecnológica;
3. Avaliar a viabilidade operacional, econômica e ambiental da substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos em um corredor BRT em operação, considerando custos diretos, custos sociais e impactos ambientais;
4. Examinar o desempenho operacional, energético e ambiental do sistema de trólebus de São Paulo, identificando sua relevância como tecnologia elétrica consolidada na transição para frotas zero emissão;
5. Comparar as tecnologias de ônibus zero emissão (Ônibus Elétrico Movido a Bateria (BEB), Ônibus Movido a Célula de Combustível de Hidrogênio (FCEB) e Trólebus) quanto a custos, infraestrutura, eficiência energética e adequação operacional, identificando cenários de aplicação recomendados para o planejamento do transporte público urbano;

1.4 Estrutura da Tese

A tese está estruturada no formato de artigos, também chamada de *multipaper*, sendo composta por cinco artigos e cada um possui sua própria metodologia.

O Capítulo 1, mostra a importância da mobilidade urbana sustentável, define o problema de pesquisa, apresenta o objetivo principal e os objetivos específicos, além da estrutura da tese.

O Capítulo 2, apresenta uma revisão bibliográfica que aborda o panorama das mudanças climáticas, a descarbonização na mobilidade urbana sustentável, o conceito de eletromobilidade, as tecnologias de ônibus elétricos, além de formas que possam priorizar os sistemas de ônibus.

A fonte de pesquisa utilizada engloba as principais bases de dados de trabalhos científicos, como ScienceDirect, Scopus, Scielo, IEEE, Google Acadêmico, Willey, Taylor e Francis, bem como dados governamentais.

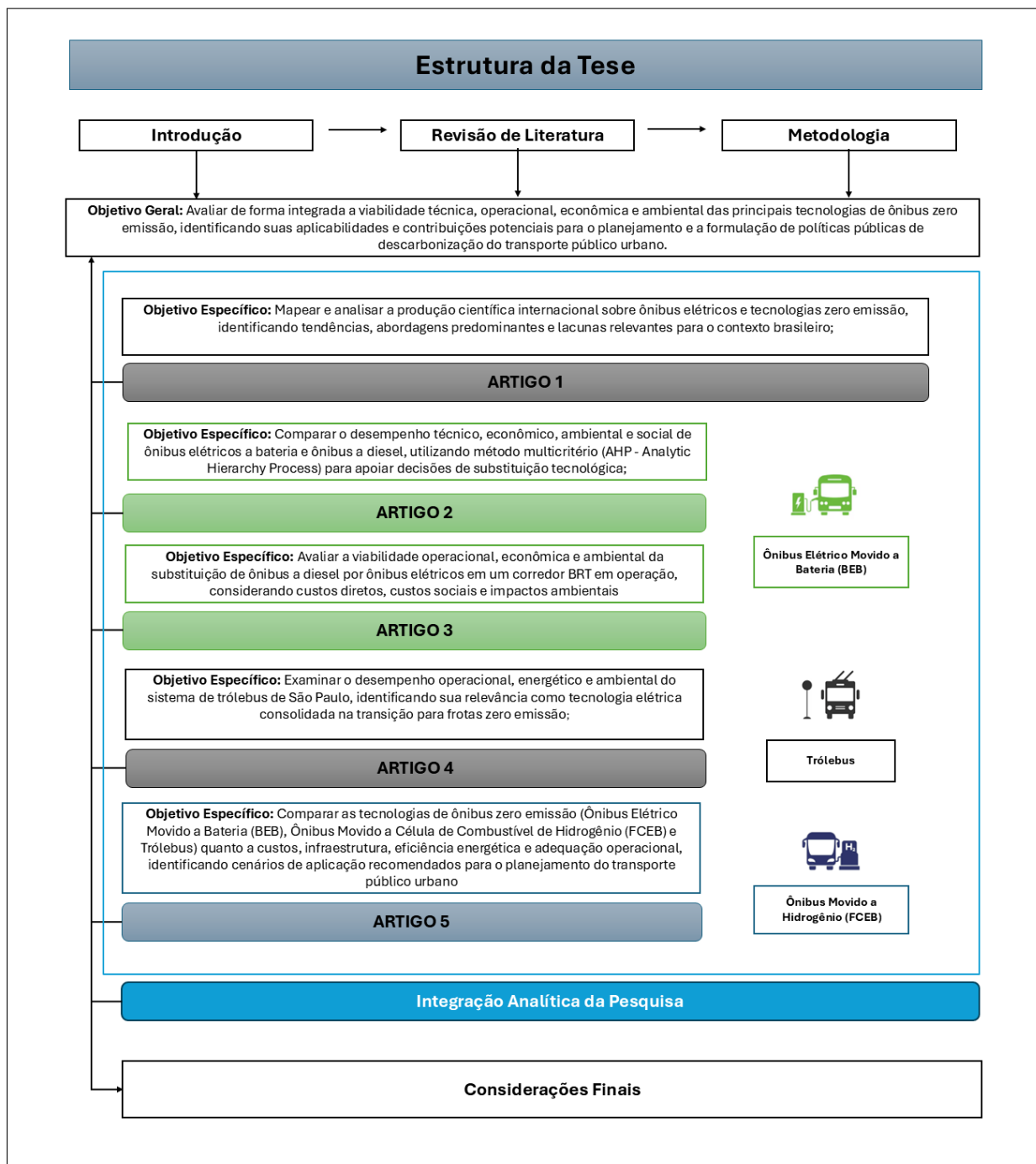
O Capítulo 3, descreve a metodologia de pesquisa utilizada e o formato *multi-paper*, além de uma revisão de cada método utilizado nos artigos que compõem a tese.

O Capítulo 4, apresenta os artigos produzidos na íntegra conforme foram publicados e a integração analítica da pesquisa que conecta todos os resultados.

O Capítulo 5, é o encerramento da tese, trazendo o desfecho do objetivo principal e as conclusões de cada artigo, interligando-os para uma melhor compreensão da proposta do trabalho. Ele também apresenta as limitações do estudo e propostas para trabalhos futuros.

Por fim, encontram-se as referências bibliográficas citadas que embasam o presente estudo. A Figura 1 mostra, de forma gráfica, organização dessa sequência.

Figura 1: Estrutura da Tese



Fonte: Elaborado pelo Autor

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Panorama das Mudanças Climáticas e Compromissos Globais

A intensificação das emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), decorrente de atividades humanas, como o transporte, tem impulsionado o aquecimento global e tem colocado em risco a estabilidade dos sistemas naturais e sociais contribuindo para aumento do Efeito Estufa, quando interagem com a radiação solar. O dióxido de carbono (CO_2), o gás metano (CH_4), o óxido nitroso (N_2O), o ozônio (O_3) estão entre os principais gases desse tipo (MEDEIROS; SCABIN, 2023).

O mais abundante deles é o CO_2 que pode ser emitido por diversas atividades que se utilizam de combustíveis fósseis. Somente os movimentos de deslocamento das pessoas, através de modos compartilhados ou individuais, são responsáveis por 12,7% de todo o CO_2 emitido no mundo (MEDEIROS; SCABIN, 2023; RITCHIE, 2020).

O Efeito Estufa é um processo importante para a existência de vida no planeta Terra, pois ele mantém a temperatura média global em 14°C ; sem ele, as temperaturas girariam em torno de -18°C . Esse controle de temperatura é feito pela absorção de parte do calor emitido pelo sol pela superfície e pelos oceanos (MEDEIROS; SCABIN, 2023).

Com o aumento da presença de GEE na atmosfera, uma parcela maior de calor fica retida e não é devolvida totalmente ao espaço, aumentando a temperatura média do planeta e das águas dos oceanos, gerando o fenômeno conhecido como Aquecimento Global (MEDEIROS; SCABIN, 2023).

O primeiro estudo que previu um aquecimento do planeta Terra causado pelas atividades humanas, também chamadas de antropogênicas, é de 1896. Svante Arrhenius, quantificou através de modelos matemáticos, os efeitos das variações de CO_2 em diversas regiões do planeta e verificou que o planeta Terra aqueceria, caso houvesse, um aumento das emissões (ARRHENIUS, 1896).

Já o primeiro estudo que fez previsões sobre um aquecimento significativo da superfície da Terra, foi publicado em 1967. Syukuro Manabe e Richard Wetherald previram um aquecimento significativo da superfície da Terra em $2,3^\circ\text{C}$, um valor próximo das estimativas mais modernas sobre o tema, fazendo com que o estudo deles seja considerado o pioneiro em desenvolvimento de modelos climáticos globais (MANABE; WETHERALD, 1967).

Hansen *et al.* (1981), previram que o impacto do aumento do CO_2 atmosférico na temperatura global seria entre 2 e $3,5^\circ\text{C}$, aprontado um valor mais provável de $2,8^\circ\text{C}$. Eles utilizaram modelos computacionais e observações reais para verificar que

o aquecimento do planeta seria detectável por volta do ano 2000.

Os resultados desse estudo foram apresentados ao Congresso Nacional dos Estados Unidos em 1988, como um dos primeiros alertas sobre o tema de aquecimento global causado por seres humanos.

Muitos autores, abordam uma necessidade de descarbonização urgente, incluindo o conceito de limites planetários para que a humanidade opere com segurança, mas que caso fossem ultrapassados, poderiam causar mudanças irreversíveis nos sistemas terrestres. Um exemplo disso é o limite seguro de CO₂ atmosférico em 350 ppm (partes por milhão), que em 2009 já tinha sido ultrapassado em 37ppm ([ROCKSTRÖM et al., 2009](#)).

Para [Meinshausen et al. \(2009\)](#), existe um limite total de CO₂ que pode ser emitido para que a humanidade mantenha o aquecimento global abaixo de 2°C, em relação aos níveis pré-industriais, mas que se forem ultrapassados, o risco de eventos climáticos perigosos e irreversíveis será real, pois à medida em que as emissões cumulativas de CO₂ aumentam, a temperatura global aumenta proporcionalmente.

Esses estudos embasaram diversos acordos internacionais visando a contenção do aumento da temperatura média global. O Acordo de Paris, firmado na 21ª Conferência das Partes (COP21), é o principal marco internacional nesse sentido. Ele estabelece como meta manter o aumento da temperatura média do planeta abaixo de 2°C em relação aos níveis pré-industriais, com esforços para limitar esse aumento a 1,5°C.

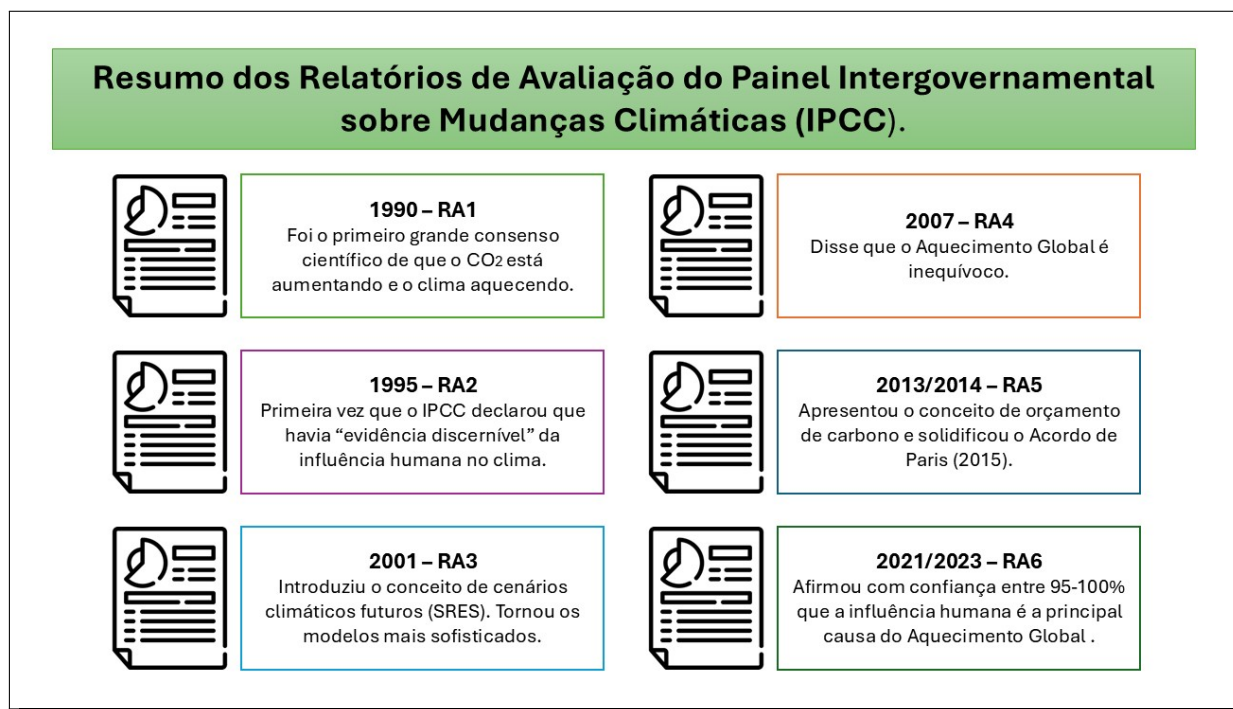
Outros compromissos relevantes sobre o tema, incluem o Acordo de Copenhague realizado na COP15, que previa ajuda financeira dos países desenvolvidos para os em desenvolvimento, e a Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que delinea os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) ([BRASIL, 2025](#); [ONU, 2018](#)).

O estudo realizado por [Rogelj et al. \(2016\)](#), avaliou que os compromissos assumidos no Acordo de Paris não seriam suficientes para manter o aquecimento dentro dos limites propostos, mesmo com todos os objetivos cumpridos. Dessa forma, a temperatura do planeta Terra excederia acima da meta, e o papel da ação precoce mitigaria os efeitos do planeta mais quente.

O Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) é um órgão da ONU criado em 1988, que emite relatórios de avaliação, para contribuir com a formulação de políticas climáticas internacionais. Desde então, ele avalia os estudos científicos relacionados a mudanças climáticas e fornece aos países informações que subsidiam a formulação de políticas públicas sobre este tema ([IPCC, 2025](#)).

Desde 1990, o IPCC já publicou seis Relatórios de Avaliação. O resumo e os destaques de cada relatório podem ser observados na Figura 2.

Figura 2: Resumos dos Relatórios de Avaliação do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC)



Fonte: Elaborado pelo Autor

Esses relatórios são lançados a cada seis ou sete anos, e possuem três volumes, sendo que, cada um deles é elaborado por um grupo de trabalho.

O primeiro grupo, explica como o clima está mudando e qual a ação humana está por trás disso, além do que é esperado no futuro em decorrência dessas ações.

O segundo grupo, analisa como as mudanças climáticas afetam a natureza e a sociedade, mostrando os riscos para a agricultura, saúde, biodiversidade e para a segurança hídrica, e de que forma a sociedade deve se adaptar para as novas situações decorrentes das ações antropogênicas.

O terceiro grupo foca em como reduzir as emissões de GEE avaliando políticas, tecnologias e cenários futuros, além de discutir as transições necessárias para energias limpas e mudanças nos usos da terra.

Hoje as atividades dos centros urbanos são responsáveis por 70% de todas as emissões de GEE do mundo, porém além do impacto dos GEE na atmosfera, deve-se observar também o impacto dos poluentes atmosféricos locais na população daquela área onde eles foram emitidos ([CAPOMACCIO, 2024](#)).

Os poluentes são qualquer substância presente no ar que possa torná-lo impróprio, nocivo ou ofensivo a saúde dos seres vivos, causando inconvenientes ou prejuízos para quem vive no local onde foram emitidos ([CETESB, 2025](#)).

Eles podem ser classificados em poluentes primários quando emitidos de forma

direta na atmosfera ou poluentes secundários que se formam na atmosfera através de reações químicas entre os poluentes primários e os componentes naturais da própria atmosfera ([CETESB, 2025](#)).

O Material Particulado (MP), o Dióxido de Enxofre (SO₂), os Óxidos de Nitrogênio (NO_x), o Monóxido de Carbono (CO) e o Ozônio troposférico (O₃) são os principais poluentes locais que diferentemente dos GEE, possuem efeitos imediatos para a população local já que eles ficam apenas algumas horas ou dias presentes na atmosfera ([CETESB, 2025](#)).

Esses tipos de gases são provenientes da queima de combustíveis fósseis, que são um grupo de combustíveis não renováveis formados há milhares de anos a partir dos restos de seres vivos e que representa mais de 75% da demanda energética mundial, são amplamente utilizados em veículos, indústrias e residências ([AZEVEDO, 2023](#)).

O combustível fóssil mais utilizado é o petróleo, uma mistura de moléculas de carbono e hidrogênio, originados de matéria orgânica decomposta em ambientes com pouco oxigênio. Ele é obtido em bacias sedimentares específicas formadas por camadas (ou lençóis) de areia, arenitos ou calcários. Através do seu refino é possível obter outros materiais chamados de derivados, como o diesel e a gasolina ([AZEVEDO, 2023](#)). Além de combustível, o petróleo também é utilizado na medicina, indústria de cosméticos e na fabricação de plásticos ([WWF-BRASIL, 2022](#)).

Diversos impactos ambientais são gerados devido ao processamento do petróleo, sendo alguns deles reversíveis e outros não. Esses efeitos, não impactam somente na poluição atmosférica, mas também, no solo, e na água, atingindo por consequência todos os seres vivos ([WWF-BRASIL, 2022](#)).

A queima dos derivados de petróleo é uma das principais causas dos efeitos da poluição atmosférica local e do aumento dos GEE, pois lançam uma grande quantidade de CO e CO₂ na atmosfera ([DRUMM et al., 2014](#); [CAPOMACCIO, 2024](#)).

Os efeitos da poluição do ar mataram cerca de 8,1 milhões de pessoas em 2021. No Brasil, calculou-se que aproximadamente 170 mil crianças com menos de cinco anos, perderam a vida devido as consequências da poluição do ar. Sem contar o crescimento de 14% do número de mortes decorrentes da poluição, entre 2006 e 2016 ([ONU, 2024](#); [MENDES, 2022](#)).

Além das crianças outro grupo vulnerável a esses efeitos nocivos são os idosos. Estudos realizados no Reino Unido mostraram que, pessoas mais velhas, que vivem em locais com alta concentração de poluição atmosférica tem uma maior propensão a sofrer Acidentes Vasculares Cerebrais (AVC) e declínio cognitivo, por outro lado, eles não consideram importantes questões relacionadas ao meio ambiente e de qualidade do ar para a sociedade ([IMPACT ON URBAN HEALTH, 2018](#)).

As atividades de transporte, atualmente, são responsáveis por cerca de 21%

das emissões globais de CO₂, grande parte produzidas pelo modal rodoviário (75%), sendo que a maior parte (60,5%) provém dos deslocamentos de pessoas (RITCHIE, 2020).

Espera-se que no futuro a demanda por transporte (em passageiros/quilometro) dobre até o ano 2070, sabe-se, com as inovações tecnológicas haverá uma redução nas emissões de carbono, contudo com as novas tecnologias, não se espera uma eliminação total das emissões provenientes de carros e ônibus até essa data (IEA, 2020; RITCHIE, 2020).

Além dos efeitos da poluição do ar, (tanto pelos poluentes atmosféricos locais quanto pelos GEE), o trânsito pode ser responsável por aumento nos casos de estresse, fadiga, diminuição da qualidade de vida, problemas alérgicos e respiratórios, além de câncer, aumentando a necessidade atendimentos nos sistemas de saúde e consequentemente, mortes prematuras (US EPA, 2015; CAPOMACCIO, 2024).

Nas cidades brasileiras com mais de 60 mil habitantes, passou a prevalecer o uso de veículos motorizados que se tornaram mais importantes que o uso dos meios públicos coletivos. Assim quanto mais carros nas ruas, mais poluição é gerada (CARVALHO, 2016).

Por exemplo, na cidade de São Paulo 73% dos GEE são emitidos por automóveis e motocicletas que carregam apenas 30% dos passageiros. Dessa maneira, o transporte público representa uma importante estratégia para enfrentar questões relacionadas à sustentabilidade (CAPOMACCIO, 2024).

O principal modo de transporte público no Brasil é o ônibus urbano, que concentra 85,7% das viagens realizadas. no entanto mas a cada ano que passa, a frota fica mais velha e poluente. Considerando os últimos cinco anos, a idade média da frota aumentou 1,6 ano, passando de 5,5 anos em 2020 para 7,1 em 2025. Atualmente a idade média da frota é 2,9 anos mais velha do que em 2010, ano que a idade média foi a mais baixa (4,2 anos) (NTU, 2025).

Observa-se que ônibus mais velhos possuem motores menos rígidos com relação a emissões de poluentes. O Proconve (Programa de Controle da Poluição do Ar por Veículos Automotores) é o principal instrumento de controle das emissões de poluentes no Brasil (IBAMA, 2022).

Quando nos referimos ao alinhamento com o Padrão Euro, nos remete dizer que os veículos fabricados no Brasil devem atender os mesmos requisitos de emissões dos veículos produzidos na Europa, tal parâmetro facilita a padronização tecnológica e a competitividade internacional.

Desde 2023, está em vigor o Proconve P8, similar à norma Euro 6, que exige uma redução nos limites de emissões de NO_x (80%), Material Particulado (50%) nos limites de Hidrocarbonetos (72%) quando comparado ao Proconve P7/ Euro 5 (em vigor entre 2012 e 2022) (IBAMA, 2022).

A exposição a gases de escape do diesel, agrava o acúmulo de ozônio troposférico. Esse acúmulo causa danos às vegetações além de provocar chuvas ácidas que afetam o solo, lagoas e córregos, interferindo na cadeia alimentar (NTU, 2025; US EPA, 2015).

O Proconve não regula as emissões de GEE, focando mais nos poluentes atmosféricos locais que afetam a saúde pública.

2.2 Mobilidade Urbana Sustentável e Descarbonização

A mobilidade urbana sustentável pode ser pensada dentro do conceito amplo de desenvolvimento sustentável, sendo um equilíbrio entre a satisfação das necessidades humanas e a proteção do ambiente natural. Em linhas gerais, significa, atender as demandas da população de forma estável e regular ao longo do tempo sem comprometer a capacidade das próximas gerações (CARVALHO, 2016).

Nos últimos 20 anos, os estudos sobre soluções sustentáveis de transporte aumentaram em 700%, passando de 15 mil em 2003 para 120 mil em 2023, o que demonstra o interesse da academia na redução dos impactos ambientais do transporte (TEIXEIRA, 2025).

Assim para pensar em sustentabilidade na mobilidade urbana deve-se basear em três pressupostos básicos: proteção ambiental, sustentabilidade econômica, e justiça social (CARVALHO, 2016).

De acordo com Vasconcellos (2016), no Brasil, a partir da década de 1950, houve um aumento dos deslocamentos motorizados. Somados ao uso, as políticas de uso e ocupação do solo afastaram a moradia das pessoas de renda mais baixa das áreas mais centrais. Essa combinação repercutiu negativamente no acesso as oportunidades de educação, trabalho, e no acesso aos serviços públicos a população que teoricamente mais precisa.

É válido dizer que gênero, idade, família, classe social e as atividades diárias afetem a mobilidade das pessoas. Ademais, a escolha dos modos de transporte depende da comparação de vantagens e desvantagens, feita por cada um individualmente, bem como da disponibilidade dos modos de transporte. Assim há dois motivos mais determinantes para essa tomada de decisão: o custo direto (quanto a pessoa desembolsa pela viagem) e o tempo de percurso (VASCONCELLOS, 2016).

Considerando os três modos de transportes motorizados mais difundidos (motocicleta, automóvel e ônibus), o ônibus é o menos vantajoso. Em um deslocamento de nove quilômetros em uma cidade de grande porte, um automóvel é 38,9% mais rápido, com um custo somente 20% superior do que ônibus já a motocicleta é 58,3% mais rápida do que ônibus custando apenas 30% da tarifa do modo coletivo (VASCONCELLOS, 2016).

Para [IPSOS \(2025\)](#), o uso do transporte coletivo é maior nas classes mais baixas, que consideram o preço das tarifas e a lotação os dois principais problemas do sistema de ônibus urbano. Na cidade de São Paulo o número de pessoas que reclamam da alta lotação dos veículos é de aproximadamente 33%.

Segundo a Companhia do Metropolitano de São Paulo - [METRÔ-SP \(2025\)](#), através pesquisa Origem-Destino de 2023, verificou-se que na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP), o uso do transporte individual superou o uso do transporte coletivo. Considerando que, o transporte coletivo apresentou redução de 19,8% no número de viagens contra 0,9% do transporte individual motorizado.

Para os pesquisadores, há um decréscimo da preferência pelos modos coletivos e uma continuidade do automóvel em relação a penúltima pesquisa realizada em 2017. Essa redução aconteceu principalmente para as pessoas com renda entre R\$ 2.640,00 e R\$ 5.280,00 (ou aproximadamente entre 1,75 e 3,5 salários-mínimos) ([METRÔ-SP, 2025](#)).

De acordo com a [IPSOS \(2025\)](#), considerando os não usuários do transporte coletivo, 42% dizem que usariam o transporte coletivo se o tempo de espera fosse reduzido e 35%, se o tempo de trajeto fosse mais rápido. Ainda assim 5% dizem que nunca usariam o sistema.

Para [Vasconcellos \(2016\)](#) a política pública de mobilidade adotada no Brasil incentiva o uso do transporte individual e a sociedade não cobra os custos indiretos de quem o usa. Sem isso, os ônibus tiveram uma elevação tarifária e taxas superiores a da inflação dificultando ainda mais o acesso ao transporte coletivo ([VASCONCELLOS, 2016](#)).

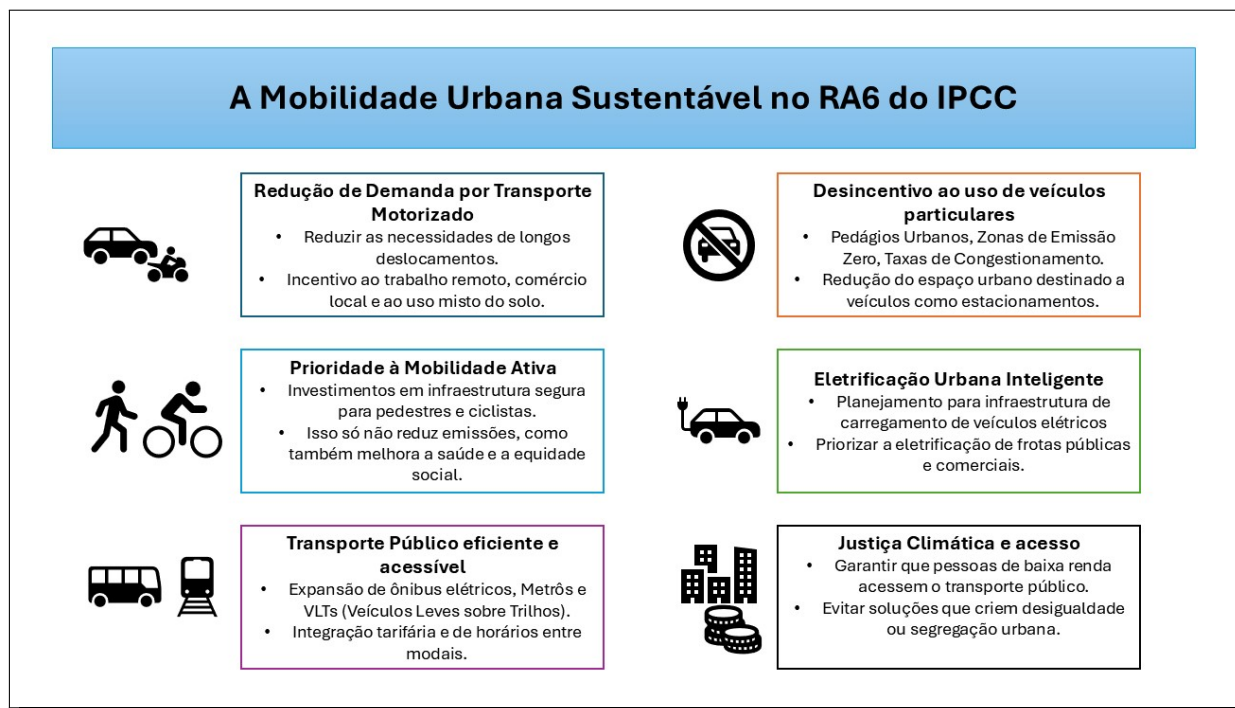
Um desses custos indiretos é o uso do espaço urbano. O transporte individual, ocupa entre 80% e 90% do leito carroçável (parte da via destinada à circulação de veículos) das principais vias. Isso significa que uma pessoa dentro de um carro está consumindo uma área 25 vezes maior do que uma pessoa que está dentro de um ônibus. Além disso o custo de estacionamento que é um outro aspecto a ser considerado, pois o custo é zero em muitas ruas. Dessa maneira é possível concluir que, o patrimônio público é distribuído de forma desigual pelas pessoas ([VASCONCELLOS, 2016](#)).

Por isso, para planejar um transporte sustentável também deve-se levar em consideração a justiça social, visando transformações estruturais na organização das cidades. Além de aumentar a acessibilidade a diferentes modais deve-se levar em consideração o custo-benefício dos impactos dos projetos de infraestrutura para a sociedade de forma equitativa ([LITMAN, 2025](#)). Para [Banister \(2008\)](#), uma mobilidade urbana sustentável, deve ir além da mitigação dos impactos negativos, e promover transformações estruturais na forma como as cidades se organizam.

As questões sobre Mobilidade Urbana Sustentável foram incluídas no Relatório

de Avaliação 6 do IPCC da ONU, publicado em 2022. Na Figura 3 é possível ver um resumo sobre os principais pontos abordados.

Figura 3: A Mobilidade Urbana Sustentável no Relatório de Avaliação 6 do IPCC



Fonte: Elaborado pelo Autor

Para o IPCC, a Mobilidade Urbana Sustentável é parte importante na mitigação das mudanças climáticas, levando em consideração a equidade social. Assim, deve-se tornar o transporte público eficiente e acessível para desincentivar o uso de automóveis particulares. É necessário garantir que as pessoas de renda mais baixa acessem o sistema, contribuindo para redução das desigualdades.

Conforme [Banister \(2008\)](#) uma Mobilidade Urbana mais sustentável deve ser focada na redução das necessidades de deslocamento, com planejamento integrado de uso e ocupação do solo, de forma que ele inclua as externalidades de deslocamento, incentive a mudança de comportamento e não de tecnologia. Por isso é imprescindível pensar em formas de tornar o transporte público mais atrativo para quem não usa.

[Santos \(2017\)](#) afirma que a descarbonização do transporte exige mudanças estruturais, com incentivos ao transporte público e aos modos ativos (caminhada e bicicleta), para promover a mudança de comportamento das pessoas e gerar um impacto redistributivo da forma de deslocamento, o que favorece especialmente as populações de baixa renda que dependem dos sistemas de transporte público.

Juntas, essas medidas combinam eficácia ambiental com potencial de equidade, desde que bem desenhadas e acompanhadas de políticas sociais integradas ([SANTOS, 2017](#)).

No Brasil, políticas integradas de financiamento para o transporte público existem, mas de certa forma limitadas pela fragmentação institucional e pela escassez de recursos, sem um planejamento integrado orientado, à redução das distâncias e priorização de modos sustentáveis (CARVALHO, 2016; VASCONCELLOS, 2016).

2.3 Eletromobilidade

A eletromobilidade é a utilização de energia elétrica em substituição aos combustíveis fósseis. Engana-se quem pensa que o uso da eletricidade é algo recente. Ele é anterior ao padrão do motor a combustão, ou seja, quando convencionou-se a utilização de motores a combustão já existiam veículos elétricos movidos a bateria, que foram substituídos posteriormente por modelos híbridos ou somente a combustão por conta de sua baixa autonomia (NTU, 2019).

Notavelmente, veículos elétricos garantem um ar mais limpo para as cidades, tornando essas tecnologias preferíveis, especialmente em áreas altamente povoadas para melhor qualidade do ar e cidades mais habitáveis (HAMURCU; EREN, 2020).

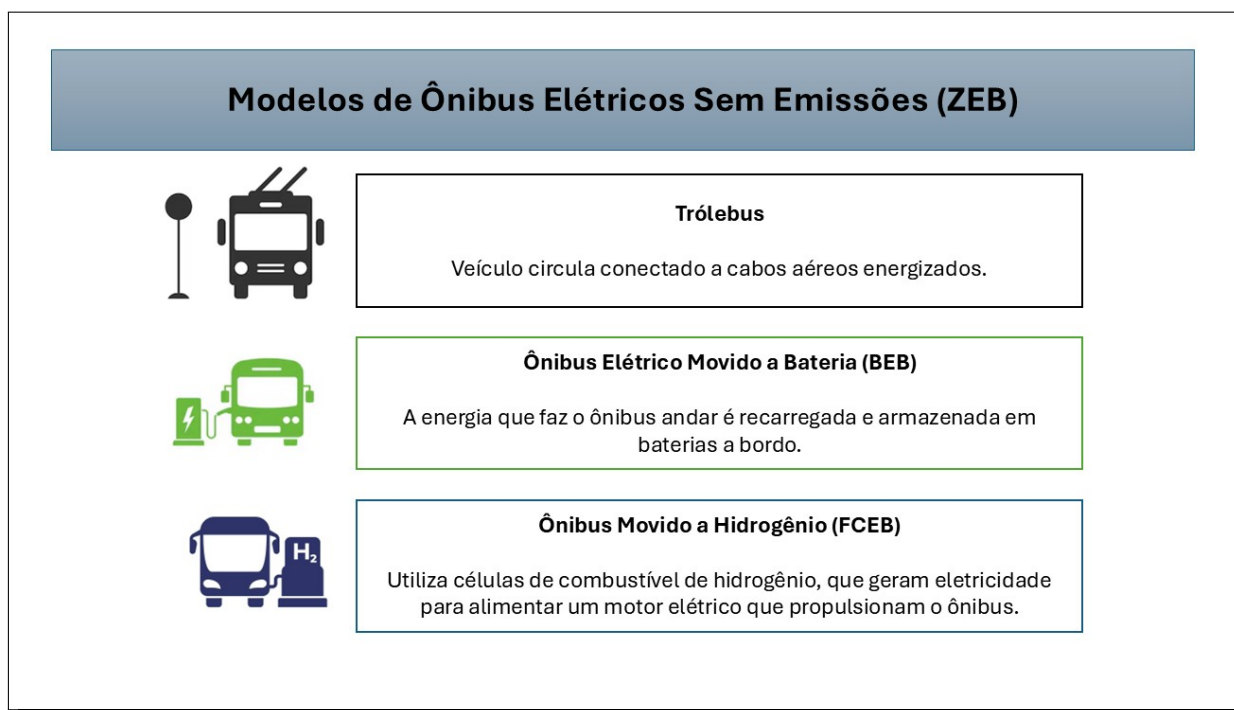
Entretanto, a fonte de energia de um veículo elétrico é um componente importante para alcançar um modelo de transporte inteligente e sustentável. Dessa forma, um veículo é tão sustentável, quanto a fonte de energia utilizada para se produzir a eletricidade que o abasteceu (YIGITCANLAR, 2022).

No Brasil, a matriz elétrica é predominantemente renovável, ou seja, 84,25% de toda energia elétrica é obtida a partir de fontes renováveis. A maior parte por meio de usinas hidrelétricas (55%), eólicas (14,8%), e biomassa (8,4%) (AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL), 2024). Sendo assim, a utilização de veículos elétricos pode contribuir para uma forma mais sustentável de se deslocar no Brasil.

Atualmente, a China, é referência na operação de ônibus elétricos (SUMMIT MOBILIDADE URBANA, 2020). Entretanto, o efeito da substituição de matriz energética gera novos problemas como, por exemplo, o que fazer com as baterias usadas. Existe a possibilidade de utilização das baterias que seriam descartadas, como uma opção viável para armazenamento de energia e melhoramento da estabilidade da rede elétrica, porém ainda não existe um padrão para essa utilização e controle de qualidade dessa operação (LIU *et al.*, 2020; SHEN, 2024).

A eletrificação das frotas de ônibus de transporte público pode ser realizada utilizando diferentes soluções tecnológicas, como Trólebus, Ônibus Elétrico Movido a Bateria (BEB) e Ônibus Movido a Célula de Combustível de Hidrogênio (FCEB) (Figura 4) (ROGGE; WOLLNY; SAUER, 2015) .

Figura 4: Modelos de Ônibus Elétricos Zero Emissões (ZEB)



Fonte: Elaborado pelo Autor

O trólebus, realiza suas viagens conectado a uma rede aérea composta por dois cabos paralelos energizados sendo uma das tecnologias mais adequadas em termos ambientais, pois possuem tecnologia já consolidada e confiável (SPTRANS, 2025). No início, os trólebus eram vistos como substitutos dos bondes e tiveram um baixo custo de implantação, pois aproveitaram-se da infraestrutura elétrica dos bondes existentes. Na época seu diferencial era a flexibilidade, pois eram capazes de contornar obstáculos que poderiam estar no caminho e facilitar o embarque de passageiros (FRANÇA; FLEURY, 2023).

No entanto, como eles precisam estar conectados à rede aérea e subestações de energia, acabam sendo menos flexíveis que os ônibus convencionais, com isso, qualquer planejamento ou mudança em sua operação deve considerar a rede aérea.

Os ônibus elétricos movidos à bateria (BEBs) são alimentados por uma bateria presente no próprio veículo. Modelos de veículos elétricos a bateria, eram comuns até a segunda década do século XX. No entanto, os ônibus elétricos neste período foram fabricados em pequena escala devido à baixa autonomia e ao peso das baterias (NTU, 2019). Desde o início do século XXI, os ônibus elétricos a bateria, voltaram a ser considerados vantajosos pois adquiriram uma autonomia considerável para operações urbanas e não poluam.

O conjunto de baterias é uma das principais partes desse tipo de veículo, pois é através delas que os veículos são alimentados. Estas baterias são recarregadas atra-

vés de equipamentos para abastecimento de veículos elétricos (FRANÇA; FLEURY, 2023). Atualmente, a autonomia de um ônibus elétrico a bateria é cerca de 250 km e pode ser recarregado durante a noite ou receber pequenas cargas durante a operação comercial, bem como pode existir uma operação mista dos dois modelos.

Os ônibus movidos a hidrogênio, do inglês *Full Cell Electric Bus (FCEB)*, se utilizam de células de combustível de hidrogênio para alimentar um motor elétrico que realiza a propulsão do veículo (STOLZENBURG; WHITEHOUSE; WHITEHOUSE, 2020).

Como o trólebus e o BEB, o FCEB não possuem emissões de gases poluentes resultantes de sua operação. Contudo, o modelo é atualmente o mais caro dos três. A dificuldade de se obter hidrogênio de fontes limpas e renováveis, e a falta de estrutura para reabastecimento, ainda são impeditivos para ampliação de suas operações, mesmo com a vantagem de uma autonomia maior, em relação a um BEB ou um trólebus e com tempo de recarga semelhante ao de um veículo a combustão (HENSHER; MULLEY, 2015).

Os ônibus híbridos mesmo sendo considerados ônibus elétricos, ainda emitem gases poluentes. Eles são intermediários e vistos como uma ponte entre o uso de motores de combustão e a eletrificação da frota e são cerca de 40% mais eficientes do que os motores a combustão interna (NTU, 2019; VAZ; BARROS; CASTRO, 2015). Eles possuem um motor elétrico que é usado quando o motor de combustão tem baixa eficiência. Portanto, a combinação de duas fontes de energia torna o motor híbrido, mais eficiente do que o motor de combustão e o motor totalmente elétrico (FRANÇA; FLEURY, 2023).

2.4 Tecnologias de Ônibus Elétricos Zero Emissão - ZEBs

Estimam-se que as emissões de CO₂ provenientes de ônibus a combustão não serão totalmente eliminadas até 2070. A descarbonização do transporte público pode combinar diversas tecnologias como trólebus, BEBs, FCEBs e biocombustíveis sustentáveis dependendo da vocação regional ou da estrutura do sistema de transporte (ANTP, 2024).

O Brasil possui uma frota de aproximadamente 107.000 ônibus em operação (NTU, 2025). No entanto, em setembro de 2025 contabilizou-se apenas 1.335 ônibus elétricos, o que representa aproximadamente 1% da frota brasileira de ônibus (NTU, 2025; E-BUS RADAR, 2025).

A eletrificação da frota ainda enfrenta algumas barreiras como o custo de aquisição dos veículos elétricos e a infraestrutura de recarga, que não são mitigadas devido a entraves institucionais como: ausências de linhas de financiamento estáveis e incentivos fiscais para a operação desse tipo de veículo (NESPOLI, 2023).

Os biocombustíveis sustentáveis emergem como uma alternativa estratégica, especialmente em regiões onde a eletrificação enfrenta limitações técnicas ou econômicas, porém não substituem a eletrificação, e sim a complementam em sistemas intermunicipais e locais com rede elétrica frágil (ANTP, 2024; IEA, 2020).

Entretanto, transportadores relatam que o uso de biodiesel a base de éster como o utilizado no Brasil, está ligado a alguns efeitos negativos como problemas mecânicos, falhas no sistemas de injeção, formação de borra nos tanques e até aumento no consumo de combustível e emissões (SERINI, 2025).

Para Xylia *et al.* (2019), a eletricidade quando obtida de forma renovável, tem um impacto menor do que um biocombustível de primeira geração como o biodiesel a base de éster.

Dessa maneira, no contexto da transição energética no transporte público, os ônibus elétricos zero emissões se destacam, pois esses veículos não geram emissões diretas de GEE durante a sua operação, mas podem não ser tão competitivos quando comparados aos biocombustíveis de segunda geração como o HVO (Óleo Vegetal Hidrotratado) (XYLIA *et al.*, 2019).

2.4.1 Trólebus

Os trólebus (Figura 5), são ônibus elétricos que trafegam conectados a rede aérea bifilar energizada. Derivado do inglês “*trolleybus*” é a junção das palavras “*trolley*”, que significa “fio”, e “*bus*”, que significa “ônibus”, seu nome já diz muito sobre ele. Ele surgiu através da criação de Siemens e Holske chamada de “*Elektromote*” em 1882 (FERREIRA, 1995).

Figura 5: Trólebus



Fonte: Queiroz (2023)

As primeiras linhas de trólebus surgiram na Inglaterra em 1911. Por volta de 1920, já existia produção de trólebus nos Estados Unidos e uma alta aceitação desse tipo de veículo por lá. Paralelamente na Europa Oriental, também existiam sistemas de Trólebus em operação ([MACEDO, 2017](#)).

f início, os trólebus aproveitaram parte das estruturas utilizadas pelos bondes elétricos o que facilitou a sua implantação, e por possuírem pneus, os trólebus, eram mais flexíveis e podiam ser manobrados, assim desviando de obstáculos e parando para embarcar e desembarcar os passageiros na calçada ([GRIGORIEVA; NIKULSHIN, 2023](#)).

O melhor período da história dos trólebus foi entre 1930 e 1950. Diversos países possuíam trólebus em seus sistemas de transporte. Londres chegou a ter a maior frota de trólebus da Europa Ocidental com 1.764 veículos, já os Estados Unidos possuíam mais de 7.000 trólebus em operação em 1952 ([FERREIRA, 1995](#)).

Atualmente, cerca de 300 sistemas ainda estão em operação espalhados pelo mundo e muitos deles complementam os sistemas de transporte existentes ([LANDGEIST, 2021](#); [UITP, 2023](#)). A maioria deles está concentrada na Ásia e na Europa Oriental, sistemas que foram impulsionados durante as restrições impostas pelo Ocidente na Guerra Fria ([BOROWIK; CYWIŃSKI, 2016](#)).

Lituânia, Estônia e Letônia, estão localizados na Europa Oriental, e já pertenceram a União Soviética, hoje em dia fazem parte da União Europeia, e são considerados referência em eletromobilidade no continente, devido a utilização de trólebus nas suas

frotas de ônibus.

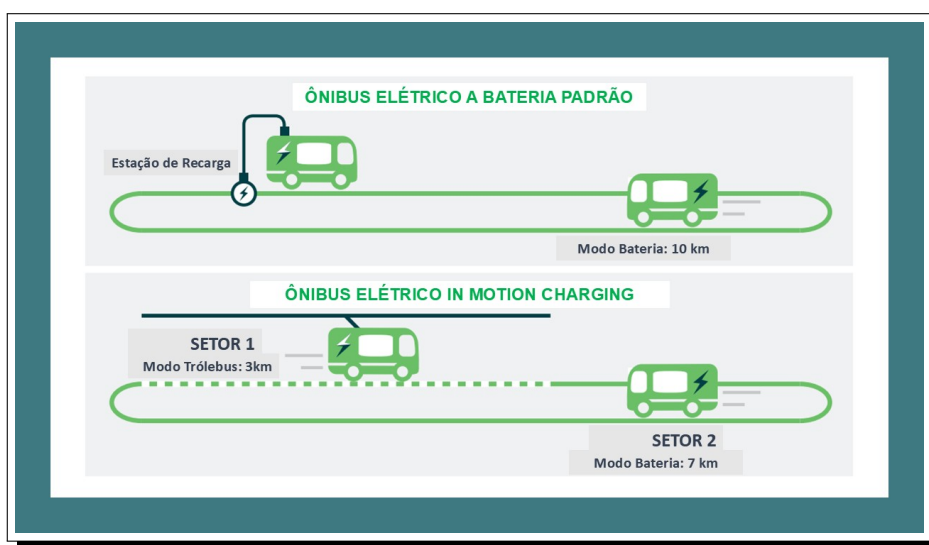
As três capitais, Vilnius, Tallin e Riga, possuem sistemas de trólebus em operação e em ampliação, inclusive 12 novas linhas de ônibus elétricos serão implantadas na capital lituana para expandir e melhorar a rede de transporte público (BERNHARDT, 2024).

Na Europa Ocidental, Itália e Suíça possuem sistemas de trólebus (LANDGEIST, 2021). Na América Latina existem 1.141 trólebus em operação, com destaque para o Sistema da Cidade do México que possui 442 veículos operando inclusive em BRTs (E-BUS RADAR, 2025). O segundo maior sistema de trólebus é o de São Paulo com 189 veículos, na capital paulista e mais 126 em operação no Corredor ABD (São Mateus - Jabaquara) na Região Metropolitana (E-BUS RADAR, 2025).

Os dois sistemas em operação passam por situações distintas. Enquanto o da capital paulista (gerenciado pela São Paulo Transporte S/A - SPTrans), pode ser suprimido nos próximos anos devido ao custo de manutenção da rede (SANT'ANNA; QUEIROZ, 2023), o da Região Metropolitana vem sendo ampliado. Em 2025, foram integrados 10 novos trólebus. Com a implantação do novo BRT ABC, que conectará os Terminal Sacomã ao Corredor ABD (São Mateus – Jabaquara) no Terminal São Bernardo, serão incorporados mais trólebus com tecnologia In Motion Charging (IMC) (NEXT MOBILIDADE, 2025; EMTU, 2025).

A tecnologia IMC (Figura 6), permite que os trólebus circulem desconectados à rede aérea, utilizando-se de uma bateria, permitindo uma maior flexibilidade para os sistemas trólebus, inclusive em caso de falhas de alimentação da rede aérea.

Figura 6: Tecnologia In-Motion Charging (IMC)



Fonte: Adaptado de Gunter et al. (2019)

Além dos trólebus, os BEBs também podem utilizar este sistema diminuindo a

necessidade de recargas de longa duração, geralmente efetuadas durante a noite. Estima-se que cada quilômetro conectado permite que o trólebus trafegue mais dois ou três desconectado. Dessa forma diluindo o custo operacional da infraestrutura dos trólebus e permitindo o compartilhamento da rede para carregamento dos ônibus a bateria (GUNTER *et al.*, 2019).

Para Moraes (2025), a rede de trólebus da cidade de São Paulo é subutilizada, em cerca de 50%, podendo atender pelo menos mais 200 veículos através da tecnologia IMC, que são 30% mais baratos que um similar movido a bateria.

2.4.2 Ônibus Elétrico Movido a Bateria – BEB

Ônibus Elétricos Movidos a Bateria (Figura 7) dependem exclusivamente da energia elétrica armazenada em uma bateria a bordo para se movimentar.

Figura 7: Ônibus Elétrico Movido a Bateria – BEBs



Fonte: PREFEITURA DE SÃO PAULO (2025d)

Os veículos elétricos a bateria, principalmente automóveis, eram comuns até a segunda década do século XX. Nesse período também existiam os ônibus a bateria, mas eram fabricados em uma pequena escala, sendo logo substituídos por ônibus híbridos e ônibus a combustão devido a baixa autonomia e ao peso das baterias antigas (NTU, 2019).

Em 2003, a empresa Arotech, apresentou um ônibus de 12 metros movido com uma bateria de zinco-ar e um ultra capacitor, com uma autonomia de 232 quilômetros (NTU, 2019).

A cidade de Shenzhen foi a primeira cidade do mundo a eletrificar sua frota de 16.359 ônibus em 2017, com o apoio de políticas públicas e investimentos significativos em infraestrutura de recarga. Dessa forma, Shenzhen reduziu as emissões de carbono obtendo resultados ambientais e financeiros positivos (LIN *et al.*, 2019).

No Brasil, os testes de desempenho com BEB se iniciaram em 2013, com um veículo fornecido pela BYD Company Limited que tinha uma autonomia de 250 quilômetros. Outro veículo articulado de 18 metros foi testado pela EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos) e tinha uma autonomia de 220 quilômetros. Esse ônibus também tinha a capacidade de realizar recargas de oportunidade em 4 minutos nos intervalos entre as viagens (Figura 8) (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2013; GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

Figura 8: Recarga de Oportunidade



Fonte: GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO (2014)

Somente em 2018, se iniciou a operação comercial de ônibus movidos a bateria na cidade de São Paulo, na linha 6030/10 – UNISA Campus 1 – Terminal Santo Amaro na Zona Sul. Na época a linha possuía 29,7 quilômetros de extensão e 17 veículos que transportavam, em média, 17,5 mil passageiros por dia útil.

Em 2022, foi proibida pela Prefeitura de São Paulo a aquisição de ônibus movidos a diesel pelas operadoras, com o objetivo de se atingir as metas da Lei 14.933/2009 que instituiu a Política de Mudança do Clima no Município de São Paulo (PlanClima SP). Essa lei propunha uma redução de 50% das emissões de CO₂, 90% de redução de Material Particulado (MP) e de 80% das emissões de Óxido Nítrico (NO) em 2028, em relação ao ano de 2016 (PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2021; PREFEITURA DE

[SÃO PAULO, 2025b](#)).

Um ônibus movido a bateria possui custo maior de aquisição se comparado a um ônibus diesel equivalente, porém os elétricos oferecem uma redução de 80% dos custos operacionais, tornando a substituição viável financeiramente ([PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2025c](#)).

Na América Latina, existem 6.747 BEBs em operação, sendo que a maior frota está em Santiago, capital do Chile, com 2.548 ônibus, em segundo lugar Bogotá, capital da Colômbia, com 1.486 ônibus e São Paulo fica na terceira colocação com 640 ônibus ([E-BUS RADAR, 2025](#)). É a maior frota de ônibus elétricos do Brasil mas é um número pequeno se comparado a frota total 13.460 ônibus da cidade. Dessa maneira os BEBs representam aproximadamente apenas 4,75% da frota ([PREFEITURA DE SÃO PAULO, 2025a](#)).

2.4.3 Ônibus Elétrico Movido a Hidrogênio – FCEB

O Ônibus Movido a Célula de Combustível de Hidrogênio ou *Full Cell Electric Bus (FCEB)* (Figura 9), possui uma tecnologia híbrida, que utiliza célula de combustível, para fornecer a maior parte da energia utilizada para a locomoção do veículo, e uma bateria (ou ultra capacitor), para aumentar a disponibilidade de energia, em caso de uma aceleração rápida ou alguma subida ([STOLZENBURG; WHITEHOUSE; WHITEHOUSE, 2020](#)).

Figura 9: Ônibus Movido a Célula de Combustível de Hidrogênio (FCEB)



Fonte: [SOLARIS BUS \(2018\)](#)

Um ônibus movido a hidrogênio, possui uma autonomia entre 300 e 500 quilômetros e por serem capazes de recuperar energia com a frenagem alcançam uma au-

onomia maior que a nominal e uma vantagem energética de 40% quando comparado a um ônibus diesel. Sendo que o desenvolvimento dos ônibus movidos a hidrogênio podem facilitar a utilização das células de combustível para outros veículos rodoviários (DIAZ; BOILLOT, 2024).

O ônibus movido a hidrogênio possui vantagens em relação ao ônibus movido a bateria. O FCEB possui uma maior autonomia e uma redução do tempo de reabastecimento (HENSHER; WEI; BALBONTIN, 2022). Outra vantagem é uma variação menor de consumo devido a temperatura ambiente, já que os ônibus movidos a bateria perdem performance em dias mais quentes devido ao calor. Por outro lado, a eficiência energética do ônibus movido a bateria é maior do que a do ônibus movido a hidrogênio (POGGIO *et al.*, 2023).

O custo de aquisição de um FCEB também é maior do que o do BEB. Além disso, as estações de abastecimento de hidrogênio não são amplamente disponíveis dificultando a sua adoção em larga escala. (DIAZ; BOILLOT, 2024; BURKE *et al.*, 2023; WANG *et al.*, 2021)

Outro debate que deve ser incluído na discussão é a forma de obtenção de hidrogênio. Isso define o quão limpo é o combustível utilizado pelo ônibus. A China é o maior produtor de hidrogênio do mundo, entretanto, quase todo o hidrogênio é obtido através de combustíveis fósseis. Quando o hidrogênio é obtido de forma renovável as eficiências energéticas entre ônibus a bateria e ônibus a hidrogênio são próximas (LI; VOEGE, 2017).

No Brasil, a forma de obtenção de hidrogênio ainda não é limpa, pois grande parte é obtida através de gás natural, contudo, existe um grande potencial para exportação de hidrogênio de baixo carbono, obtido através de energia eólica, solar e hídrica (OLIVEIRA, 2022).

O Brasil foi o primeiro país da América Latina a possuir um ônibus movido a hidrogênio em circulação. Os estudos para utilização do hidrogênio em ônibus, se iniciaram em 2009, quando um ônibus protótipo que utilizava hidrogênio obtido através da eletrólise da água, entrou em operação no Corredor ABD (São Mateus – Jabaquara) durante um ano (BAZANI, 2024).

Em 2015 o projeto foi ampliado para quatro ônibus, que posteriormente foram encostados devido a questões técnicas e financeiras. Esses mesmos veículos, em 2023, passaram a fazer parte de um projeto da EMTU e da USP (Universidade de São Paulo) (Figura 10) que incluem uma fábrica de hidrogênio, dessa vez obtido através do etanol. De acordo com os estudos coordenados pela universidade é menos poluente que o processo anterior (BAZANI, 2024).

Figura 10: Ônibus Movido a Célula de Combustível de Hidrogênio Brasileiro



Fonte: Bastos (2023)

2.5 Priorização dos sistemas de ônibus

Nas cidades brasileiras, acima de 60 mil habitantes, 42% das viagens são realizadas através de modos ativos (a pé e de bicicleta), já 30% das viagens são realizadas por modos motorizados individuais (automóveis e motocicletas) e apenas 28% são realizadas através do transporte público coletivo (NTU, 2025).

A pesquisa efetuada pelo IPSOS (2025), mostrou que a população estaria disposta a trocar os modos individuais pelo coletivo: 1- Se houvesse, tempo menor de espera, 2- se a tarifa fosse mais baixa, 3- se os ônibus atendessem seu percurso, 4- se o trajeto utilizando transporte público fosse mais rápido.

Levando em conta tempo médio de espera (24 minutos) e de deslocamento (128 minutos) em São Paulo uma pessoa passa duas horas e meia em um transporte considerado lotado, caro, inseguro e atrasado pela maioria dos usuários (IPSOS, 2025).

Considerando o ano de 2025, 35 milhões de viagens são transportadas de ônibus diariamente (NTU, 2025). O número de passageiros equivalentes transportados pelos sistemas de ônibus caiu em 44,1% na última década. Tal situação ocorre pela redução de demanda, pela falta de priorização dos ônibus dentro do tráfego, pela falta de atratividade do sistema (NTU, 2024).

Trabalhadores sentem que sua qualidade de vida é afetada pelo tempo gasto no transporte durante seus deslocamentos, muitas vezes chegando atrasados ou es-

tressados em seus locais de trabalho, sem contar as recusas a ofertas de trabalhos devido ao tempo gasto no transporte (MOURA, 2024).

Quando não existe um transporte público coletivo de qualidade, as pessoas passam a resolver seus problemas de deslocamento, de forma individual, criando um ciclo vicioso reduzindo a capacidade de investimento no transporte público (MOURA, 2024).

O aumento da velocidade comercial é uma alternativa para aumentar a eficiência e atratividade do sistema de ônibus reduzindo o tempo de permanência do passageiro dentro do sistema de transporte, pois, quanto mais livre for a circulação dos ônibus, melhor será a regulação da oferta, melhorando a eficiência e a produtividade da rede de transporte (NTU, 2017; ANTP, 2021).

Investir em infraestruturas que priorizem os sistemas de ônibus, como faixas exclusivas, corredores de ônibus e BRTs, tem grande potencial para melhorar a qualidade do transporte público coletivo nas médias e grandes cidades, onde muitas vezes o ônibus é o único modo de transporte coletivo, em um período curto (NTU, 2024).

Muitas vezes o ônibus é visto apenas como um “automóvel maior” e tem-se a ideia de que se o gestor melhorar a fluidez do tráfego em geral, seria suficiente para melhorar a velocidade do ônibus, o que é um empecilho para a implantação de infraestruturas de prioridade para ônibus (IEMA, 2017).

A Faixa Exclusiva de Ônibus (Figura 11) é o nível de prioridade mais básico para ônibus. Essas faixas são amplamente viáveis em várias cidades, porque o investimento para sua implantação é baixo dentre as formas de priorização custando cerca de R\$ 330.000/km. Além disso, período para início da operação é curto dependendo apenas da implantação de sinalização horizontal e vertical (IEMA, 2017; ANTP, 2021).

Essa sinalização restringe o tráfego geral da via, priorizando os ônibus (AMICCI *et al.*, 2018). A velocidade média nas faixas exclusivas em São Paulo está entre 17 km/h e 26km/h (SPTRANS, 2025). Assim, os ônibus podem viajar até 3 km/h mais rápido em comparação com um ônibus em operação junto com o trânsito geral, que tem velocidade comercial entre 15 e 23 km/h (SPTRANS, 2025).

Figura 11: Faixa Exclusiva de Ônibus



Fonte: [Arantes \(2013\)](#)

Os Corredores de Ônibus Centrais (Figura 12) são o nível intermediário de priorização, onde a faixa exclusiva para ônibus está localizada no lado esquerdo da via para reduzir a interferência do tráfego geral nas operações. As paradas são construídas no canteiro central, ou em ilhas quando o embarque é feito pelo lado direito e possuem uma distância de cerca de 500 e 600 metros para aumentar a velocidade ([IEMA, 2017](#)).

Os corredores reduzem o tempo e o custo operacional das viagens tornando o serviço mais eficiente. O custo de implementação de um corredor de ônibus é em torno de R\$ 7,5 milhões/km e aumenta em 25% a velocidade operacional de um ônibus quando comparadas as outras vias sem espaço dedicado ([ANTP, 2021](#); [SPTRANS, 2025](#)).

Figura 12: Corredor de Ônibus



Fonte: [Arantes \(2015\)](#)

O nível mais alto de priorização é o *Bus Rapid Transit* ou BRT (Figura 13). O custo de implementação de um BRT é de aproximadamente R\$ 40,8 milhões/km ([ANTP, 2021](#))

As cinco principais características de um BRT são: infraestrutura segregada com circulação exclusiva; alinhamento das faixas de ônibus principalmente no canteiro central; cobrança de tarifas fora do ônibus; embarque em nível; e cruzamentos de condução com prioridade de ultrapassagem ([ITDP, 2024](#)).

Figura 13: Bus Rapid Transit - BRT



Fonte: [NEXT MOBILIDADE](#) (2025)

Outra ferramenta que permite otimizar os sistemas de transporte são os Sistemas Inteligentes de Transporte (ITS), eles contribuem para a melhora do desempenho operacional, a eficiência e a segurança dos usuários nos sistemas de transporte ([PHILLIPS; KENLEY, 2022](#)). É importante que os passageiros conheçam e entendam como funciona o sistema de transporte, para que sejam atraídos para o sistema ([SCOTT; GEORGE; PRYBUTOK, 2016](#)).

OS ITSs permitem que os passageiros tenham uma melhoria da percepção da qualidade do serviço, pois fornecem informações em tempo real que auxiliam a tomada de decisão, além de reduzir o tempo de espera, aumentar a confiabilidade e melhorar a percepção de segurança e conforto. Tudo isso acaba incentivando a adoção de novos usuários ao sistema de transporte coletivo ([SILVA, 2020](#); [BARABINO; FRANCESCO, 2016](#)).

Sistemas de priorização semafórica e monitoramento contínuo da frota contribuem para a redução dos atrasos e maior regularidade dos serviços, favorecendo também para a satisfação do usuário ([CEDER, 2007](#); [CATS; WEST; ELIASSON, 2016](#)).

3 METODOLOGIA

Essa tese analisa a viabilidade operacional de ônibus elétricos sem emissões de gases também chamados de *Zero Emission Buses* (ZEB), seguindo o modelo de pesquisa por artigo ou *multipaper*.

Composta por cinco artigos discutidos e integrados entre si que respondem ao Objetivo Geral e aos Objetivos Específicos da pesquisa.

Vendo de forma mais ampla, os passos executados nessa tese foram:

- Uma revisão de literatura sobre o tema;
- Cinco artigos publicados (que não estão em ordem cronológica, mas baseado nas descobertas ao longo do caminho); e
- Por fim, desenvolveu-se uma discussão conjunta sobre o desenvolvimento dos artigos.

3.1 Pesquisa Qualitativa e Quantitativa

A abordagem metodológica dessa tese é considerada mista combinando técnicas qualitativas e quantitativas.

A abordagem qualitativa é empregada quando se deseja compreender o que será investigado dentro do contexto em que aparece. É útil para pesquisar algo que ainda não está definido e delinear estudos exploratórios para se construir o problema de pesquisa ou a formação das hipóteses (GIL, 2022; MARCONI; LAKATOS, 2022). Já a abordagem quantitativa se caracteriza pela utilização da quantificação e de técnicas estatísticas (RICHARDSON, 2017).

O pesquisador deve adequar tanto a abordagem qualitativa quanto a abordagem quantitativa a sua questão de pesquisa e considerar os recursos disponíveis para lidar com sua pergunta de pesquisa utilizando-se da melhor forma teórico-metodológica que permita a chegar a um resultado procurado (GUNTER *et al.*, 2019).

Dessa forma, cada artigo apresenta sua própria metodologia. Assim, é apresentada nessa seção, um resumo essencial de cada um dos artigos para melhorar a compreensão da tese.

3.2 Pesquisa por artigos - Multipaper

A pesquisa por artigo ou *multipaper*, é utilizada por diversas instituições pois permite agilizar a redação e a avaliação das suas teses e dissertações. Diferente-

mente do modelo tradicional, na pesquisa por artigo, os capítulos são substituídos por artigos científicos que mantem uma conexão lógica e robusta entre si (NASSI-CALÒ, 2016; KUBOTA *et al.*, 2018).

É um erro afirmar que esse modelo é mais fácil do que o modelo tradicional, ou que são apenas artigos compilados junto com uma introdução e conclusão. Como no modelo tradicional, existem dificuldades e desafios. Porém, os desafios/dificuldades relacionados ao modelo *multipaper* estão mais relacionados a direitos autorais, coautoria dos artigos e principalmente na amarração que conecta os artigos (KUBOTA *et al.*, 2018).

Produzir uma tese nesse modelo é vantajoso pois os artigos produzidos e publicados são mais lidos e recebem mais citações do que uma tese realizada no modelo tradicional que geralmente ficam nas bibliotecas das universidades (NASSI-CALÒ, 2016).

Nesta tese, foi escolhida a metodologia de pesquisa por artigo para possibilitar dos estudos de forma exploratória os diversos modelos de ônibus elétricos, que podem operar simultaneamente ou colocado onde suas características, melhor se adaptem e por consequência apresentam uma contribuição mais ampla para a sociedade.

3.3 Pesquisa Aplicada - Resumo das Metodologias dos Artigos

3.3.1 Artigo 1: “*Bus Electrification Trends in the Literature: A Bibliometric Analysis*” - Método Utilizado: Pesquisa Bibliométrica

O primeiro artigo chamado “*Bus Electrification Trends in the Literature: A Bibliometric Analysis*”, foi apresentado no 13th *International Workshop on Advances in Cleaner Production* (2024).

Nesse artigo, foi realizada uma revisão bibliométrica que permitiu mapear e avaliar a produção científica sobre um determinado tema e identificar os padrões, tendências e conexões entre os artigos, pesquisadores, instituições e países que estão estudando determinado tema.

O objetivo foi verificar as tendências de pesquisa, os autores relevantes, os países e os centros de pesquisa envolvidos em estudos sobre eletromobilidade, especialmente em ônibus elétricos.

Foram identificados, 406 artigos publicados sobre o tema “ônibus elétricos” entre os anos de 2013 e 2023. Também foram verificadas a relevância das seguintes palavras-chave: *Electric Bus*, *Battery Electric Bus*, *Trolleybus* e *Public Transport*, no entanto a maioria dos artigos focava no consumo de energia.

China e EUA, são os países mais relevantes na produção científica sobre o tema principalmente com relação a utilização de veículos a bateria. Brasil, México,

Lituânia e Polônia, são países que possuem trólebus em operação, e formam um outro cluster.

Mesmo com o crescimento nos estudos acadêmicos sobre o assunto, as investigações sobre o tema ainda são insuficientes frente aos desafios práticos da descarbonização do transporte público.

3.3.2 Artigo 2: *A Study on the Viability of Adopting Battery Electric Vehicles in Bus Rapid Transit in Brazil Using the AHP Method*” - Método Utilizado: *Analytic Hierarchy Process* - AHP

O segundo artigo intitulado “*A Study on the Viability of Adopting Battery Electric Vehicles in Bus Rapid Transit in Brazil Using the AHP Method*”, foi publicado na Revista *MDPI Energies* em junho/2023.

Nesse artigo, verificou-se a viabilidade da adoção de ônibus elétricos a bateria (BEBs) em sistemas de BRT no Brasil, utilizando o método de decisão multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*). A análise considera três pilares da sustentabilidade: econômico, ambiental e social.

A metodologia AHP é uma análise multicritério criada pelo Professor Thomas Saaty para a resolução de problemas complexos com base em comparações de importância hierárquica de um critério sobre os demais. No AHP divide-se o problema em níveis hierárquicos para facilitar o entendimento e as comparações podem ser realizadas tanto por critérios qualitativos quanto quantitativos definindo a sua importância através de uma comparação paritária, ou seja, de dois em dois ([WOLFF, 2008](#)).

Os julgamentos de critérios e alternativas foram realizados através do software *Expert Choice®* v.11.

Os principais resultados são na pontuação geral: ônibus elétrico foi melhor e obteve 60,9% contra 39,1% do diesel. O impacto econômico: representa apenas 13,5% na decisão sendo vantajoso para o BEB a longo prazo, no impacto ambiental também houve vantagem para o BEB de 83,9% e no impacto social BEB obteve 53,8%, com destaque para menor impacto na saúde e maior conforto. Outros dados importantes são que emissão de gases por ônibus a diesel representa até 90% do valor do veículo em impactos indiretos e que matriz energética brasileira (82,9% renovável) favorece a adoção de veículos elétricos.

O estudo conclui que, embora os ônibus elétricos a bateria tenham, um custo de aquisição mais elevado que os modelos a diesel, seus benefícios ambientais e sociais compensam esse investimento ao longo do tempo. Com vantagens nos impactos sociais (melhoria na saúde pública e redução da poluição sonora), impactos ambientais (uso de matriz energética limpa) acabam sendo mais relevantes que os econômicos na decisão de adoção.

A metodologia AHP utilizada permite uma avaliação mais abrangente, considerando o bem-estar da população e a sustentabilidade urbana. Assim, a adoção de ônibus elétricos em sistemas BRT é viável e recomendada, desde que haja planejamento e apoio governamental.

3.3.3 Artigo 3: *Analysis of the Substitution of Diesel Buses by Electric Ones in Rapid Systems: an Application of the Methodology in Expresso Tiradentes (São Paulo, Brazil)* - Método Utilizado: Pesquisa Quantitativa

O terceiro artigo denominado *Analysis of the Substitution of Diesel Buses by Electric Ones in Rapid Systems: an Application of the Methodology in Expresso Tiradentes (São Paulo, Brazil)*, foi apresentado no SUPTM 2024 – *2nd Conference on Future Challenges in Sustainable Urban Planning & Territorial Management* (2024).

Esse artigo vem complementar a metodologia AHP calculando -se os custos da substituição da frota em um BRT em operação. Dessa maneira foi possível analisar principalmente os aspectos financeiros dessa mudança, sendo subsidiada pelos custos das externalidades operacionais dos ônibus a diesel (Poluição atmosférica local, GEE e Ruído).

Nesse estudo considerou-se a quilometragem mensal (22 dias úteis, 4 sábados, 4 domingos) das linhas 5105-10 – Terminal Sacomã – Terminal Mercado e 5109-10 – Terminal Vila Prudente – Terminal Mercado, além de sua frota planejada (25 veículos articulados).

O resultado mostrou que os elétricos custam cerca de 10,5% a mais por mês (EUR 103,3 mil contra EUR 93,5 mil). Entretanto, ao reduzir o custo das externalidades dos motores a diesel da conta – (menos poluição atmosférica local, ruído e gases de efeito estufa), o saldo foi positivo, com ganho estimado de EUR 33 mil/mês. Isso indica que, apesar do investimento inicial maior, os ônibus elétricos geram vantagens econômicas e ambientais quando se consideram as externalidades.

Assim, o estudo concluiu que é viável a substituição dos ônibus a diesel por ônibus elétricos contribuindo para redução das emissões locais e de Gases de Efeito Estufa no transporte urbano. Embora o custo de aquisição seja elevado, os ônibus elétricos são mais sustentáveis, gerando benefícios sociais, que justificam a transição da matriz energética.

3.3.4 Artigo 4: *Environmental Impact Reduction of a Trolleybus System in the City of São Paulo, Brazil* - Método Utilizado: Pesquisa Quantitativa

O quarto artigo da tese intitulado “*Environmental Impact Reduction of a Trolleybus System in the City of São Paulo, Brazil*” também foi publicado na revista MDPI

Energies em março/2024.

Esse artigo, aborda o impacto ambiental do sistema de trólebus de São Paulo em comparação com ônibus a diesel e ônibus elétricos movidos a bateria (BEBs), focando em corredores de média e alta demanda de transporte.

Como no artigo anterior, considerou-se a quilometragem mensal (22 dias úteis, 4 sábados, 4 domingos) das 10 linhas de trólebus em operação na cidade de São Paulo em 2023. Analisou-se o custo de aquisição (CAPEX) e de operação (OPEX), modelando o consumo energético baseados nas características operacionais e quantificando as externalidades.

A operação de trólebus evita o lançamento de 1.039 toneladas de CO₂ na atmosfera por mês (o que equivale a EUR 66.522,29 em créditos de carbono mensais e EUR 140.731,22 por mês) em custos relacionados à emissão de gases locais e de efeito estufa. O custo operacional dos trólebus é de EUR 570.641,95 e o custo das externalidades cobrem 36,1% desse valor. Discutiu-se a manutenção da rede de trólebus e a utilização de trólebus com tecnologia IMC (*In-Motion Charging*) permite que os trólebus carreguem suas baterias enquanto conectados à rede, podendo rodar até 2–3 km desconectados para cada km conectado.

O estudo concluiu que o sistema de trólebus de São Paulo é uma alternativa viável e estratégica para a redução de emissões no transporte público urbano, oferecendo benefícios ambientais significativos como a diminuição de CO₂, NO_x e outros poluentes, além de vantagens econômicas com geração de créditos de carbono e menor custo operacional a longo prazo. A tecnologia de recarga em movimento (IMC) aumenta a flexibilidade dos trólebus, permitindo operação fora da rede aérea e complementando a transição para ônibus elétricos. Apesar dos desafios de infraestrutura e custos iniciais, os trólebus se mostram uma solução sustentável e eficiente, que pode ser integrada a outros modais para promover cidades mais limpas e saudáveis.

3.3.5 Artigo 5: A Tecnologia *Full Cell Electric Bus* (FCEB) na Eletromobilidade: Uma Comparação das Tecnologias Disponíveis e Seus Impactos na Operação - Método Utilizado: Revisão Bibliográfica

O quinto e último artigo da tese intitulado “A Tecnologia *Full Cell Electric Bus* (FCEB) na Eletromobilidade: Uma Comparação das Tecnologias Disponíveis e Seus Impactos na Operação” foi publicado na revista *South American Development Society Journal* em abril/2025.

Nesse artigo pretendeu-se comparar três tecnologias de ônibus elétricos de emissão zero (ZEBs): Trólebus, Ônibus Elétrico a Bateria (BEB) e Ônibus Elétrico com Célula de Combustível (FCEB), o único modelo zero emissões até então não avaliado pelas suas características operacionais, custos e impactos ambientais.

A análise é baseada em revisão bibliográfica, dados técnicos e operacionais, além de estudos de caso nacionais e internacionais. São comparadas autonomia, tempo de recarga, custo de aquisição e operação. Verificou-se que o FCEB permite uma autonomia maior que o BEB e o Trólebus, um tempo de recarga menor quando comparado com o BEB, no entanto, os custos de aquisição e operação são consideravelmente maiores tornando difícil sua operacionalização.

Outros pontos importantes no comparativo é que o BEB é mais eficiente energeticamente e mais sensível a variações climáticas e a importância da forma de obtenção de hidrogênio para avaliar sua sustentabilidade.

Concluiu-se que os três modelos têm papéis complementares na transição para uma mobilidade urbana sustentável. A escolha ideal depende do perfil operacional da linha, da infraestrutura disponível e da matriz energética. Desta forma os BEBs são mais adequados para distâncias curtas e médias, como as da cidade de São Paulo, enquanto os FCEBs são promissores para rotas mais longas, embora ainda enfrentem barreiras de custo e infraestrutura. Já os trólebus, apesar da dependência da rede aérea, são ideais para corredores exclusivos e linhas de alta demanda, sendo uma tecnologia consolidada e eficiente para a descarbonização do transporte público.

Agora, no Capítulo 4 - Resultados e Discussões é possível visualizar a integração dos artigos publicados e a Integração Analítica de todos cinco na pesquisa.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Esta seção tem o propósito de apresentar os resultados obtidos por meio de artigos publicados em congressos e revistas, no intuito de responder os objetivos gerais e específicos apresentados na seção 1 - Introdução. Os artigos são apresentados na ordem da dissertação e não de publicação.

4.1 *13th International Workshop on Advances in Cleaner Production*

Foi publicado nos anais no **13th International Workshop on Advances in Cleaner Production** que ocorreu de forma híbrida na PUCPR - Pontifícia Universidade Católica do Paraná em Curitiba – PR em novembro de 2024, o trabalho intitulado “**Bus Electrification Trends in the Literature: A Bibliometric Analysis**”. Nesse artigo foi feita uma revisão bibliométrica para mapear e avaliar a produção científica sobre ônibus elétricos.

Figura 14: 13th IWACP.



Fonte: Autor

Curitiba
Brazil
November
5th to 8th, 2024



“Fostering Sustainability:
ESG Strategies for
Cleaner Production,
Social Equity and
Ethical Governance”

INTERNATIONAL WORKSHOP ON ADVANCES IN CLEANER PRODUCTION

Bus Electrification Trends in the Literature: A Bibliometric Analysis

RODRIGUES, G. S. ^{a*}, REIS, J. G.M. ^{a,b}, MACHADO, S. T.^{a,c}, MACEDO NETO, A. P. ^{a,d*}, XAVIER, D. S. R. ^a

a. RESUP - Grupo de Pesquisa em Redes de Suprimentos e Logística, Universidade Paulista, São Paulo

b. Centro de Ciências Sociais Aplicadas, Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo

c. NAPOLE, Instituto Federal de São Paulo, Suzano

d. CECONPORT - Centro de Conhecimento Portuário e Retroportuário, Guarujá

**Corresponding author, bielrodrigues@outlook.com*

Abstract

Electric energy has been used in public transport modes since the 19th century in trams, trains, and subway systems. At the beginning of the 20th century, the technology reached bus systems with the development of trolleybuses. Currently, it is present in most high and medium-capacity systems, but bus systems usually adopt diesel engines due to flexibility, costs, and easiness of obtaining the fuel. However, due to pollution in main cities worldwide, the greenhouse gases (GHG) emitted by transport, and the technological advances in battery vehicles, make legislators propose the substitution of diesel for electric energy buses. In this context, it is essential to comprehend if academia has been contributing in response to these demands. Thus, the study proposes exploratory research using a bibliometric analysis to identify the main ideas on the topic, authors, countries, and research centers involved. To do so, the metadata was obtained from the Scopus database and analyzed using VosViewer software for network visualization. The results indicated that research is concentrated on Electric Buses, Battery Electric Buses, Trolleybuses, Public Transport, and Energy Consumption where centers in the US and China are ahead of the research topic. Moreover, we found a high concentration of the publication in only three authors from China. Our study points out that despite having a growing trend of research, it is insufficient to face the urge for matrix energy change in public transport.

Keywords: Public transport; Electromobility; Energy matrix; Bus service; Bibliometry.

1. Introduction

Transport systems are fundamental in urban dynamics. It is through them that everyday thousands of people travel for their daily activities. The result of this urban dynamic is the emission of local gases and greenhouse gases (GHG) into the atmosphere that harm life on the planet and generate various diseases in the population (Saldiva, 2007). Alternatives are currently being studied to reduce these vehicle emissions around the world, mainly the replacement of

“FOSTERING SUSTAINABILITY: ESG STRATEGIES FOR CLEANER PRODUCTION, SOCIAL EQUITY AND ETHICAL GOVERNANCE”

Curitiba – Brazil – November 5th to 8th, 2024

fossil fuels with other renewable energy sources.

One of the most discussed energy matrices in the world as a viable alternative for this replacement is electric energy and anyone who believes that this is a recent alternative is mistaken. Electrical energy began to be used in transport vehicles at the end of the 19th century, and electric automobiles were produced until the second decade of the 20th century (NTU, 2019).

In addition to discussing the energy matrix, another relevant issue for urban mobility is the use of urban space. How to make cities more productive and sustainable? There is no point in replacing energy matrices and maintaining congested roads because as a society, behavior does not change. Many vehicles stopped, people wasted time in their lives, and companies losing the agility of their operations due to congested traffic is unacceptable. Therefore, collective public transport systems must be thought a fast, safe, and accessible to the entire population, so that they are an alternative for people, reflecting their needs and way of traveling (Amicci et al., 2018).

Electric vehicles have also been used in collective public transport since trams, trains, and subways at the end of the 19th century. At the beginning of the 20th century, the first bus system to adopt the electric energy raises: trolleybus. They operate connected to the overhead network and take advantage of part of the existing electrical network of trams. However, due to the use rubber tires, trolleybus become more flexible and could avoid objects during travel routes (NTU, 2019). At that time, battery-powered buses also appeared; but due to the low autonomy of the batteries they not evolved.

Another century-old technology, often seen as recent, is the hybrid technology. It was adapted to provide the autonomy that batteries did not have and the reliability that combustion engines only achieved in the late 1920s (NTU, 2019).

Today, the majority of medium and high-capacity rail systems are powered by electrical energy. These systems are considered important for reducing individual vehicle traffic and congestion in cities. However, they are not present in many cities. At the end of 2020, only 193 cities had a subway system (Huang et al., 2023). Thus, the bus is the main mode of transport in cities, and the main fuel used is diesel, a non-renewable and polluting fossil fuel that causes several heart and respiratory diseases (Silva, 1999). In Brazil alone, around 3,000 people die each year due to air pollution (Silva, 1999).

To reduce emissions from bus fleets, many cities are planning electrification using battery electric buses (BEBs). For those that have a trolleybus system in operation, many intents use them as complementary modes through the advances in hybrid technologies (NTU, 2019). Figure 1 represents the main types of electric buses available nowadays.

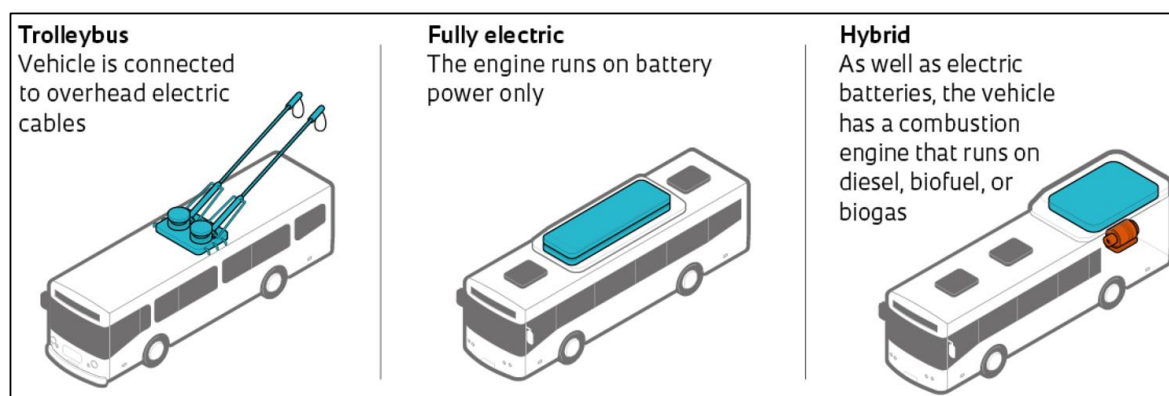


Fig. 1. Types of Electric Bus. Source: Adapted from Zaparolli (2019).

All those things considered; it is necessary to know how the Academia is contributing to this discussion. Therefore, the first step to do so is to perform a bibliometric analysis to quantify this contribution. In this paper, we investigated the research in electric bus public transport systems in the last ten years (2015-2024) using the strings: Battery Bus, Electric Bus, E-bus, and Trolleybus. The bibliometric study allows us to identify:

- The main keywords used by authors in published articles;
- Which authors are more relevant to the topic covered;
- Which countries have more publications; and
- Which are the research centers that stand out in the study of this topic?

The research was carried out with data obtained from the Scopus database and the VOSviewer software and will be part of a doctoral thesis that aims to address the topic of electrification of bus fleets in Brazil.

The article is divided into four sections, after this Introduction, the Methods section presents the steps of bibliometric analysis. The Results and Discussion section quantifies the bibliometric and discusses the findings. Finally, in the Conclusions, we present the final remarks of the study.

2. Methods

This article adopted the bibliometric study method to analyze electric vehicles' state of the art in public bus transport systems. Moreover, we decided on a timeframe of articles published between 2015 to April 2024 and available in the Scopus database. Our sample consisted of papers published in conferences and journals. Scopus database was chosen because it is the most consolidated database for obtaining data from high-quality journals and conferences

The bibliometric study is necessary in research because quantitatively analyzes the scientific production in the area of knowledge using bibliographic data such as citations, and collaborations of publications to identify trends in the field of study and map fields of research (Zupic and Čater, 2015).

In this research, the terms: Battery Bus, Electric Bus, E-bus, and Trolleybus were adopted. The data was extracted from the Scopus database. CSV format and processed in Microsoft Excel 365 version 16.0, subsequently analyzed in the software VOSviewer version 1.6.20. VOSviewer is a software that allows the construction and visualization of bibliometric networks based on citations, authors, journals, etc to obtain analysis, questions, quantities, and other data mining functions (De Souza et al., 2022; Okubo, 1997; van Eck and Waltman, 2010). The research flow can be seen in Figure 2.

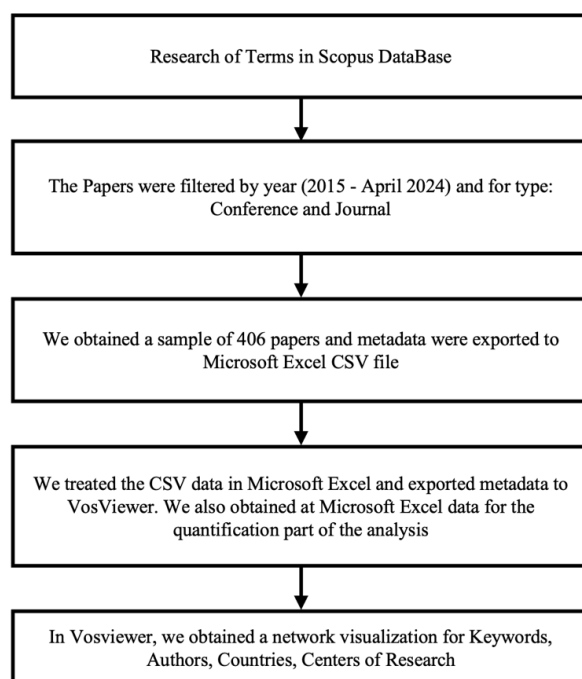


Fig. 2. Research flow

3. Results and Discussion

As mentioned previously, the bibliometric study brought 406 studies regarding bus electrification using the words: Battery Bus, Electric Bus, E-bus, and Trolley Bus distributed by year, as can be seen in Figure 3.

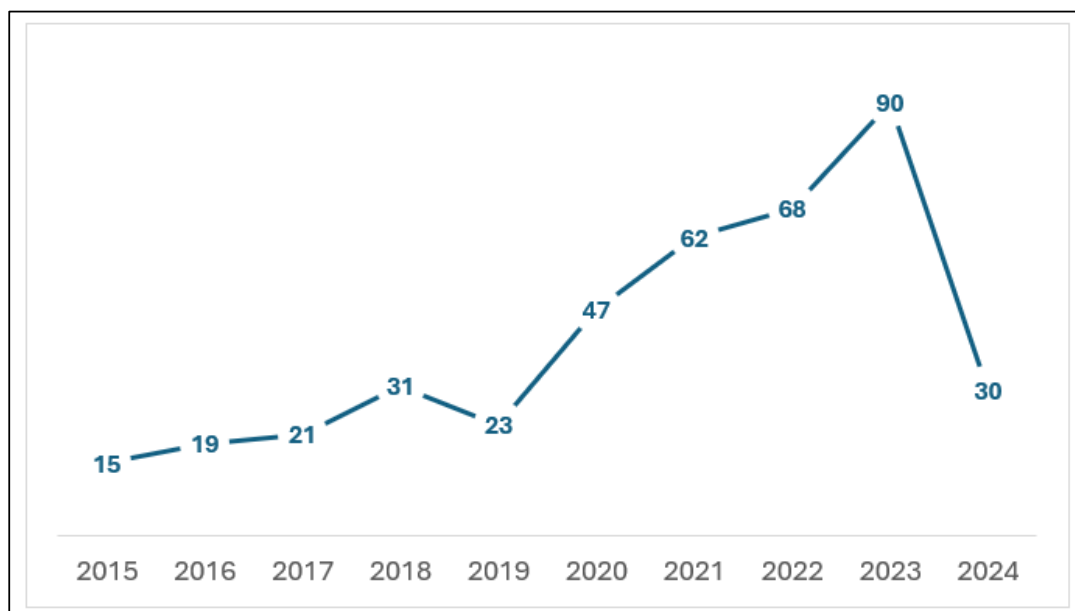


Fig. 3. Papers per year

“FOSTERING SUSTAINABILITY: ESG STRATEGIES FOR CLEANER PRODUCTION, SOCIAL EQUITY AND ETHICAL GOVERNANCE”

Curitiba – Brazil – November 5th to 8th, 2024

The 406 articles found were cited 6,815 times, with the ten most cited articles receiving 1,460 citations. Around 67 had no citations. The sources that have more published papers are presented in Table 1.

Position	Journal	Papers
1	Energies	37
2	Transportation Research Part D: Transport and Environment	30
3	Sustainability	21
4	Energy	17
5	IEEE Access	14
6	IEEE Transactions on Intelligent Transport Systems	14

The relevant keywords were Electric Bus, Battery Electric Bus, Trolleybus, and Public transport, connected to energy consumption as one of the main subjects studied. Topics related to energy consumption are receiving attention from researchers as consumption directly affects vehicle battery autonomy and consequently the operating costs of electric buses (Gunter et al., 2019).

“FOSTERING SUSTAINABILITY: ESG STRATEGIES FOR CLEANER PRODUCTION, SOCIAL EQUITY AND ETHICAL GOVERNANCE”

to the keyword of In Motion Charging (IMC) technology which means they use the overhead network as charging infrastructure to carry out their operations even disconnected (Gunter et al., 2019)., Figure 5.

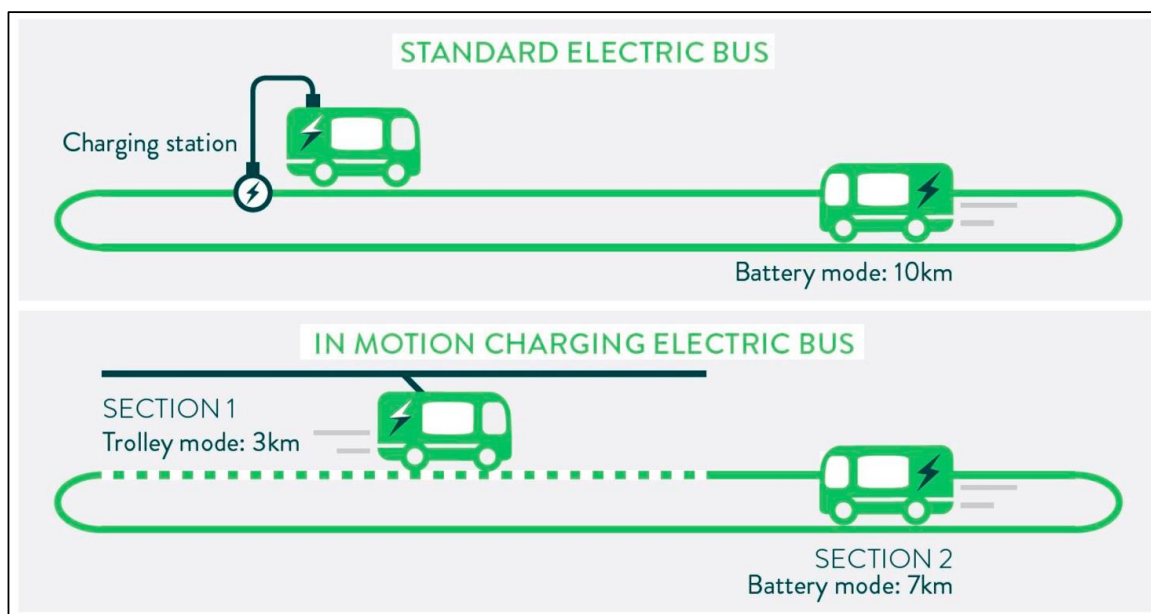


Fig. 5. In Motion in Charge Technology. Source: Gunter et al. (2019)

The second network analysis using VosViewer was of the most relevant authors, Figure 6.

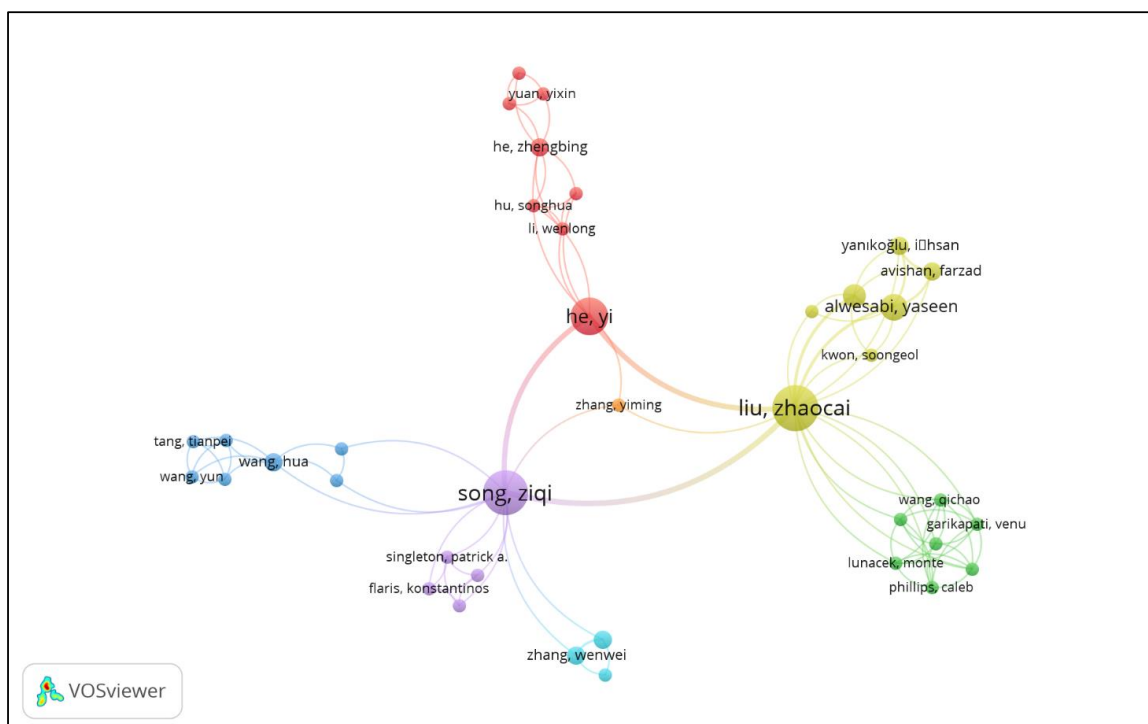


Fig. 6. Authors

“FOSTERING SUSTAINABILITY: ESG STRATEGIES FOR CLEANER PRODUCTION, SOCIAL EQUITY AND ETHICAL GOVERNANCE”

Curitiba – Brazil – November 5th to 8th, 2024

The figure presents three clusters led by Chinese researchers that concentrated the publications and co-authors. The number of papers most relevant authors is presented in Table 2.

Table 2. Authors with more publications

Position	Journal	Papers
1	Liu Zhaocai	15
2	Ziqi Song	15
3	Yi Hi	8

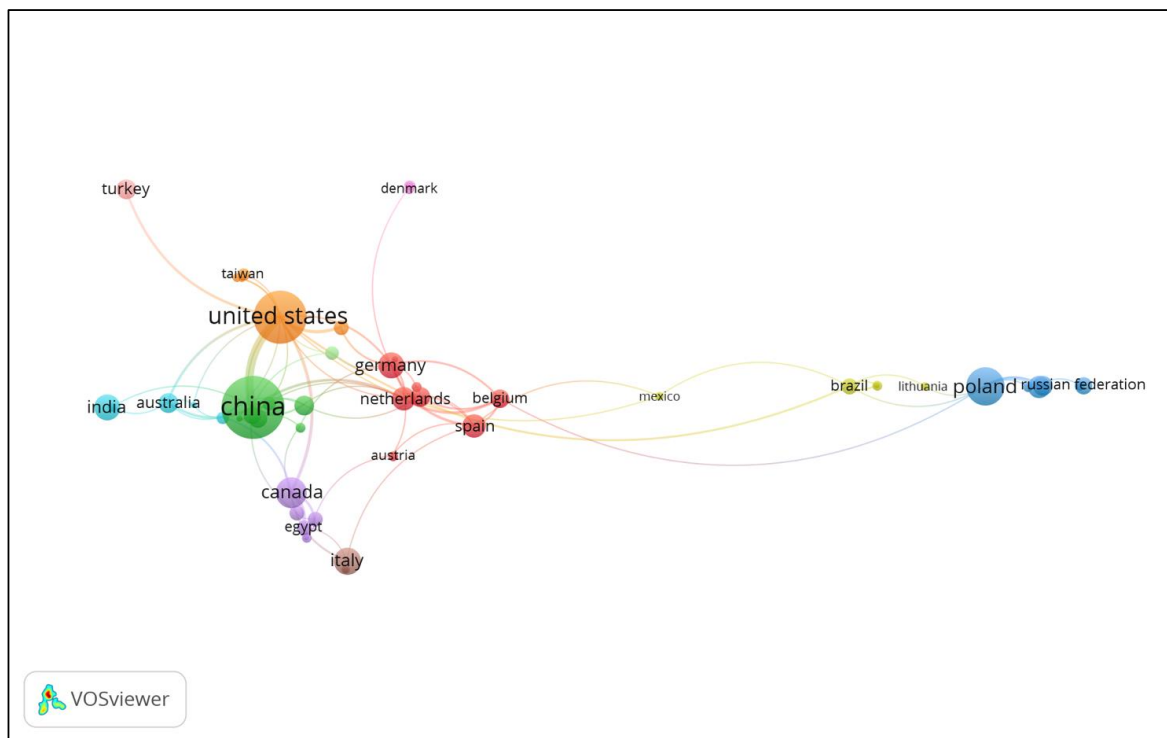


Fig. 7. Countries

The studies are mainly concentrated in China and the United States connected to European countries (Germany, Netherlands, Belgium, Spain, Austria Italy, and Turkey). Canada and Egypt are linked to the United States. Australia and India formed a smaller cluster connecting to the United States and China.

In these countries of the studies, the operation of electric buses is consolidated. As an example, the Chinese city of Shenzhen electrified its fleet of 16,000 buses, reducing fuel consumption by more than 300 tons and avoiding the emission of more than 1 million tons of CO₂ in the atmosphere (Summit Mobilidade Urbana, 2020). The US government is financing studies of electric buses to mitigate the impacts of transport on air quality (Deliali et al., 2021).

Our study also showed a connection between Latin America, Mexico, and mainly Brazil, with Eastern Europe Lithuania, and Poland. These countries have in common the use of trolleybuses in their transport systems. In figures, Mexico and Brazil have the largest trolleybus fleets in Latin America with 525 and 302 vehicles respectively (E-Bus Radar, 2023). Poland has a fleet of 240 trolleybuses (Wołek et al., 2020), and in Vilnius (Lithuania) the trolleybus fleet has 251 vehicles (ERBD, 2023). However, there are predictions of the expansion of trolleybus in Eastern Europe

“FOSTERING SUSTAINABILITY: ESG STRATEGIES FOR CLEANER PRODUCTION, SOCIAL EQUITY AND ETHICAL GOVERNANCE”

Curitiba – Brazil – November 5th to 8th, 2024

while in Brazil, there are studies to suppress the network due to maintenance costs Summit Mobilidade (Rodrigues et al., 2024).

Our final analysis using the VosViewer network was to identify the centers of research, Figure 8.

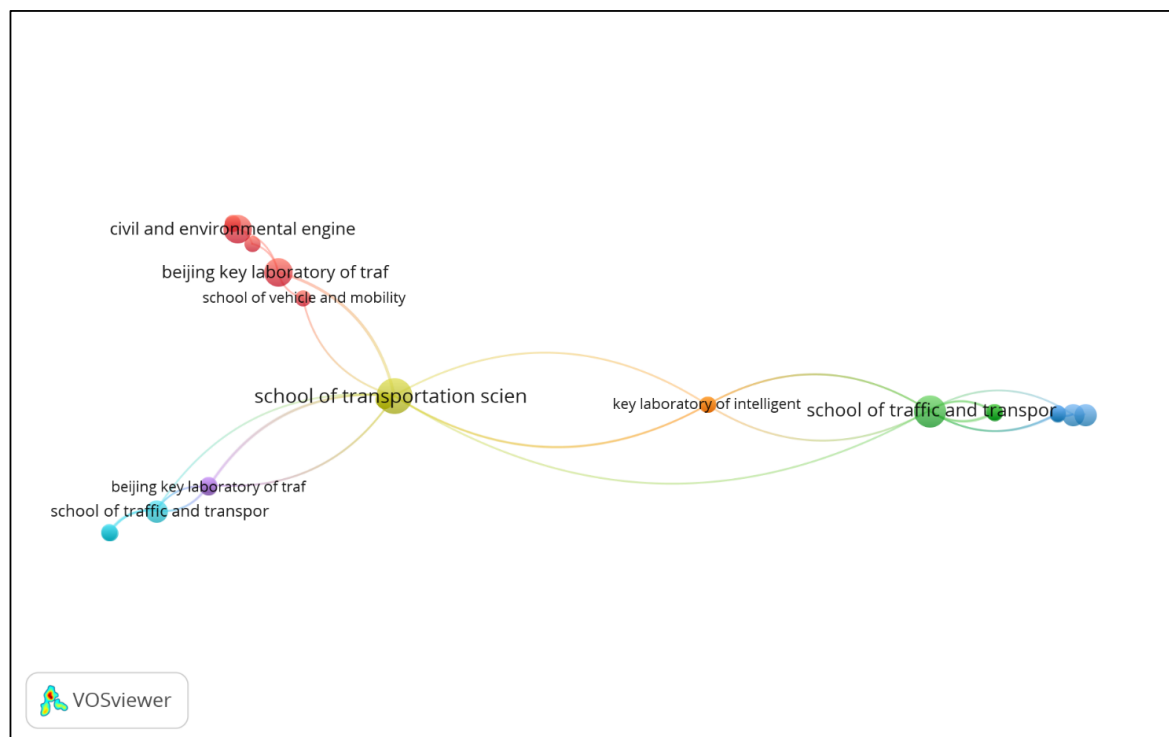


Fig. 8. Centers of research

School of Transportation Science appears as the main gateway of the network regarding electric buses. The School of Traffic and Transport is important in figures but with less importance on the network than the School of Transportation Science. We also observe a predominance of researchers connected to Civil, Transport, and Electrical Engineering, and Technology.

This result indicates the need for more research centers connected to countries that are investing in battery buses but those that have trolleybus systems in operation as Brazil, México, Poland, and Lithuania among others. The purpose is to know if trolleybus using IMC can be sustained in the network as a complementary system.

4. Conclusions

This research aimed to verify the state of the art on electric buses over the last 10 years considering the main keywords encountered, relevant authors to the topic covered, countries most productive on the topic, and the research centers that stand out on the theme. The bibliometric analysis showed a growing trend in the electrification of the bus fleet. It indicates that there is a growing interest in investing in more sustainable public transport on a global scale.

Our results showed a high concentration on the topic regarding authors, countries, and research centers. Three authors were indicated as the most prominent in the research field and China and the United States retain the main origin of documents published. Moreover, research centers connected to electric buses revolve around areas of Civil and Transport Engineering where is highlighted the School of Transportation Science.

These results reflect that cleaner and more efficient transport solutions are multidisciplinary challenges, necessary to face the environmental and public health challenges caused by greenhouse gas emissions into the atmosphere.

The adoption of the bibliometric approach was essential to comprehend the actual stage of research regarding the electrification of bus fleets in cities. Moreover, the method is a way of direct future research for specific aspects found out regarding electric buses.

The practical implications of this study for policymakers, researchers, and industry stakeholders are the theme requires more studies because is necessary to understand more effectively how to improve the lifetime of batteries, and infrastructure and how to absorb in the public bus network new models such as moved by battery and old ones as trolleybus using a more flexible way to locomotion (connected aerial networks to in-motion in charge technology). Despite increasing the publications on these topics, we found only 406 studies and there are many different terms revolving around them.

The limitation of our study is that it is an exploratory approach and concentrates on metadata. Therefore, further research studies will investigate these papers of bibliometric review in detail using a literature review and provide clarification regarding directions recommended for the implementation of sustainable public transport in cities using electricity.

Acknowledgments

This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Finance Code 001.

References

Amicci, A.G.N., Fernandes, A., Malburg, C.H.R., Santos, D.V., Araldi, F., Souza, F. de O., Di Pierro, L.F., Nakazaki, M., Silva, N.A.A. da, Santana, O., Valente, V.B., Social (Brasil), B.N. de D.E. e, Bankengruppe, K., Urbana, B.S.N. de T. e da M., 2018. Guia TPC: orientações para seleção de tecnologias e implementação de projetos de transporte público coletivo. BNDES, Brasília

de Souza, J.S.; dos Reis, J.G.M.; da Cruz Correia, P.F.; Rodrigues, G.S. A Bibliometric Overview over Smart Farming. *Chemical Proceedings*. 2022, 10, 28.

Deliali, A., Chhan, D., Oliver, J., Sayess, R., Godri Pollitt, K.J., Christofa, E., 2021. Transitioning to zero-emission bus fleets: state of practice of implementations in the United States. *Transport Reviews* 41, 164–191.

E-Bus Radar, 2023. E-Bus Radar. <https://www.ebusradar.org/> last accessed June 2024.

ERBD, 2023. GrCF2 W2 E2 - VVT Trolleybuses Fleet Renewal. <https://www.ebrd.com/work-with-us/projects/psd/54153.html> last accessed June 2024.

Gunter, M., Erik, L., Mikolaj, B., Wolfgang, B., Sergei, K., 2019. In Motion Charging Innovative Trolleybus. UITP. <https://www.uitp.org/publications/in-motion-charging-innovative-trolleybus/> last accessed June 2024.

Huang, S., Ma, R., Zhang, P., Hu, C., Wu, D., Sun, L., Deng, M., 2023. Characteristics and health risk assessments of fine particulate matter at the overground and underground subway sites in Chengdu. *Building and Environment*. 242, 110577.

NTU, 2019. Centro de documentação e memória Eurico Divon Galhardi. Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos - NTU, Brasília.

Okubo, Y., 1997. Bibliometric Indicators and Analysis of Research Systems: Methods and Examples. OECD Science, Technology and Industry Working Papers, No. 1997/01, OECD Publishing, Paris.

Rodrigues, G.S., Reis, J.G.M. dos, Orynycz, O., Tucki, K., Matijošius, J., Machado, S.T., 2024. Environmental Impact Reduction of a Trolleybus System in the City of São Paulo, Brazil. *Energies*. 17, 1377.

Saldiva, P.H.N., 2007. Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve): Emissões de Poluentes Atmosféricos por Fontes Móveis e Estimativa dos Efeitos em Saúde na RMSP – cenário atual e projeções (PhD Thesis). USP/Faculdade de Medicina/Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental, São Paulo.

Silva, A.C., 1999. 50 anos de trólebus em São Paulo. *Revista dos Transportes Públicos*. 21, 49-60.

Summit Mobilidade Urbana, 2020. Em Shenzhen, na China, 100% dos ônibus e táxis são elétricos. <https://summitmobilidade.estadao.com.br/ir-e-vir-no-mundo/em-shenzhen-na-china-100-dos-onibus-e-taxis-sao-eletricos/> last accessed June 2024.

van Eck, N.J., Waltman, L., 2010. Software survey: VOSviewer, a computer program for bibliometric mapping. *Scientometrics*. 84, 523–538.

Wołek, M., Szmelter-Jarosz, A., Koniak, M., Golejewska, A., 2020. Transformation of Trolleybus Transport in Poland. Does In-Motion Charging (Technology) Matter? *Sustainability*. 12, 9744.

Zaparolli, D., 2019. Electric buses on the horizon. *Revista Fapesp*. 283.

Zupic, I., Čater, T., 2015. Bibliometric Methods in Management and Organization. *Organizational Research Methods*. 18, 429–472.

4.2 ENERGIES

Foi publicado na revista **Energies** da Editora MDPI, em junho de 2023, o trabalho intitulado “**A Study on the Viability of Adopting Battery Electric Vehicles in Bus Rapid Transit in Brazil Using the AHP Method**”. Nesse artigo verificou-se a viabilidade de substituição de Ônibus movidos a Diesel Por Ônibus Elétricos a Bateria (BEBs) utilizando o método de decisão multicritério AHP (*Analytic Hierarchy Process*).

Figura 15: ENERGIES



Fonte: Autor

Article

A Study on the Viability of Adopting Battery Electric Vehicles in Bus Rapid Transit in Brazil Using the AHP Method

Gabriel Santos Rodrigues ¹, João Gilberto Mendes dos Reis ^{1,2} , Olga Orynych ^{3,*} , Karol Tucki ⁴ , Sivanilza Teixeira Machado ⁵  and Helcio Raymundo ¹

¹ RESUP-Research Group, Postgraduate Program in Production Engineering, Universidade Paulista-UNIP, R. Dr. Bacelar, 1212-4fl, São Paulo 04026002, Brazil; gabriel.rodrigues119@aluno.unip.br (G.S.R.); joao.reis@docente.unip.br (J.G.M.d.R.); helcio.raymundo@docente.unip.br (H.R.)

² Social and Applied Sciences Center, Mackenzie Presbyterian University—MPU, São Paulo 01302907, Brazil

³ Department of Production Management, Faculty of Engineering Management, Bialystok University of Technology, Wiejska Street 45A, 15-351 Białystok, Poland

⁴ Department of Production Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Warsaw University of Life Sciences, Nowoursynowska Street 164, 02-787 Warsaw, Poland; karol_tucki@sggw.edu.pl

⁵ NAPOLE Research Group, Federal Institute of São Paulo, Av. Mogi das Cruzes 1501, Suzano 08673010, Brazil; sivanilzamachado@ifsp.edu.br

* Correspondence: o.orynych@pb.edu.pl; Tel.: +48-746-98-40

Abstract: Public transport is essential to provide urban mobility, and cities need to offer a fast, comfortable, secure, and low-pollutant public transport mode to attract passengers and reduce private car use. Despite metros, trains, and light rail systems being desirable, the cost of implementation and low flexibility make bus services the best option for many cities. One solution for improving bus service systems is the implementation of bus rapid transit systems that are composed of buses running in segregated lines with pre-payment fares and level boarding platforms in stations. However, the main challenge of bus systems is the use of engines fueled by diesel, which is extremely polluted. One possible solution is the use of battery buses; but are they really feasible regarding daily operation cost? In this paper, we investigate the adoption of battery buses in comparison to diesel engines in a BRT system using municipal data from São Paulo, Brazil, as a reference. We collected operational data from the São Paulo city government transport agency and data from the literature to produce an analytic hierarchy process (AHP) model, which allowed us to compare both systems. The AHP model considered a triple-bottom-line perspective using social, economic, and environmental impact criteria. The result showed that the initial costs of acquisition can be a barrier, but in the long run, cities adopting battery buses in their BRT system can benefit from the effects of reduction in gas emissions and longer lifetimes of electric bus components. Moreover, the results showed that the adoption of battery buses in BRT systems depends on local government subsidies being implemented.

Keywords: public transport; electromobility; electric buses; bus rapid systems



Citation: Rodrigues, G.S.; Reis, J.G.M.d.; Orynych, O.; Tucki, K.; Machado, S.T.; Raymundo, H. A Study on the Viability of Adopting Battery Electric Vehicles in Bus Rapid Transit in Brazil Using the AHP Method. *Energies* **2023**, *16*, 4858. <https://doi.org/10.3390/en16134858>

Academic Editor: George Halkos

Received: 4 June 2023

Revised: 17 June 2023

Accepted: 19 June 2023

Published: 21 June 2023



Copyright: © 2023 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

The majority of the world's population, around 56% (4.4 billion inhabitants), lives in cities, and by 2050, 7 of 10 will live there [1]. Life in cities provokes congestion and environmental issues due to the necessity of movement to work, study, leisure, medical appointments, and so on. Thus, urban planners address this by trying to mitigate the problem of public transport. However, Keblowski et al. [2] affirm that planners have been insufficiently engaged with diverse social, political, and economic dynamics that shape how transport is planned, regulated, and organized.

Addressing global climate change challenges from a transport perspective is necessary and involves life in cities [3]. Globally, transport represents 70% of greenhouse gases (GHG) and two-thirds of energy consumption [4]. Hence, choices made in cities around long-lived urban infrastructure will determine the impact of climate change [3].

Inevitably, the current solution prefers public transport rather than private modes and prefers the adoption of active mobility when possible. This is not an easy task, but the decision of a transit authority to become “greener” provides benefits beyond environmental benefits and may also benefit business because companies that show a commitment to the environment are more likely to attract customers who care deeply about their environmental impacts [5].

Currently, the main alternatives used by companies to be more sustainable include the following [6]: (i) the purchase of energy-efficient vehicles with low environmental impact; (ii) the testing of less-polluting fuels; and (iii) monitoring the performance of vehicles and drivers. While trains and metros run using electric energy, bus services remain connected to diesel engines. Metros are present in only 178 cities [7]. Suburban rail services are slightly more common and are usually present in the same cities that run metros, which makes buses the most common service for urban mobility worldwide.

Therefore, understanding how the bus sector is progressing in the transition toward being cleaner with the use of zero-emission fleets is fundamental to making cities healthier and more sustainable [8]. Indeed, developed countries are ahead in this sense, and some have plans for future fleets. For instance, UITP is conducting the European Bus Rapid Transit of 2030, a new EU project on electric mobility that seeks to support sustainable urban transport by proposing innovative solutions for electric bus rapid transit (BRT) [9].

BRT is the highest level of prioritization of bus systems and can be considered a medium/high-capacity system composed of structural lines. Such a system can transport up to 35,000 passengers/hour/direction [10]. The main characteristics of a BRT system are exclusive bus lanes aligned on the central axis, stations with fare pre-payment, level boarding platforms, and treatment of intersections prioritizing the flow of buses [11].

The first BRT system was established in the 1970s in Curitiba, Brazil [12,13]. It was then developed in many cities in Latin America, the United States, Canada, China, and Asia [14,15]. In Delhi, the capital of India, a decision was made in 2017 to abandon and dismantle the BRT system launched in 2008 [16,17].

In Europe, metrobuses are used mainly in the UK, in addition to individual lines in cities in France, the Netherlands, and Scandinavia [18]. A model line of high-speed buses consists of lanes dedicated specifically for them, usually in the middle of the roadway. The stops placed on these lanes more closely resemble commuter rail stations. Buses—often very long, and even with two articulated buses—pull up these stops almost one after another. Traffic control and passenger information systems are also in operation [19,20].

There is no BRT system in Poland. There have been several attempts to introduce this solution [21]. The closest to creating it was Wrocław, which, in 2014, issued a tender for the project [22]. Eventually, the idea was abandoned, and a new tram line was created. The basic analyses carried out for the purpose of the attempt to introduce BRT to the capital of Poland show that the basic BRT systems can reach a throughput of up to approx. 16,000 passengers per hour, just like tram lines (assuming standard vehicle sizes). With advanced management and meeting the above assumptions, it is possible to achieve an efficiency of up to 40,000 passengers (for comparison, the Warsaw metro exceeds 30,000; these are not the full capabilities of the system) [23]. BRT is also supported by the relatively low costs of constructing infrastructure and purchasing rolling stock, which are lower than for trams or metros. A bus fleet is less spacious than trams (a standard tram carries about 220–240 passengers, while an articulated bus carries 150). Moreover, it wears out faster, and replacements should take place no later than after 12 years of use. The price of extended rolling stock for BRT may be similar to that of a tram.

When analyzing BRT, it is necessary to take into account the continuous development of technologies and increasingly innovative products on the market [24].

BRT systems are primarily identified with Volvo and Van-Hoof, which specialize in the production of three-member low-floor buses with a length of 24 m [25,26]. Among current automotive companies, Mercedes-Benz also has extensive experience in building BRT systems. The German company took its first steps in Central and South America,

including Brazil, Bogota, Colombia, and Mexico. Over the past three years, Mercedes has built two systems from scratch in Europe: Metrobus in Istanbul and BusWay in Nantes.

In 2023, EMT Madrid presented the first electric buses for its new bus rapid transit system. It will be the first high-capacity bus line in Madrid. Interestingly, the purchased vehicles belong to the MAXI class and are 12 m long [27].

In October 2021, an order for Solaris double-articulated electric buses to serve passenger traffic in Aalborg, a Danish city located on the Jutland Peninsula, was launched [28]. Tide Bus Danmark placed an order for 14 double-articulated electric buses in the MetroStyle version. These are 24-metre vehicles with a special design and have been specifically designed to operate BRT public transport systems. These 24 m electric buses are powered by two traction motors with a total output of 240 kW, which drive two drive axles. The Solaris high-energy battery pack installed in these e-buses with a total capacity of over 700 kWh is charged via a plug-in connector. Each of the 14 ordered e-buses is equipped with automatic systems supporting mirror driver work. In addition, the Mobileye Shield+ system has been proposed, which allows the elimination of risks associated with the so-called vehicle dead zone.

The world's first hydrogen buses for BRT have been operating in France since 2019. The Fébus city bus system operates in the south of France [29]. The system was launched in the city of Pau and is served by eight 18-metre Van Hool ExquiCity FC hydrogen buses.

In Köln, Switzerland, and Finland, the Dutch VDL Citea SLFA-181 electric bus is part of BRT. It is an articulated 18 m bus with a maximum capacity of 143 passengers. It has three axles and four doors. This bus was designed primarily for BRT [30,31].

Despite the fact that these initiatives aim to change fuel emissions, BRT buses are composed basically of diesel vehicles that contribute to 25% CO₂ emissions and consequently to climate change [32]. With these ideas in mind, we established three research questions:

RQ1—Is it feasible for the adoption of BRT systems to move to electric energy use?

RQ2—Is it possible develop a multiple decision-making model to compare the operations between diesel and electric BRT systems?

RQ3—How can the idea of BRT raised in developing countries as an alternative of low cost for mass rail system transport become feasible to allow the adoption of this new technology in these countries?

To answer these questions, the objective of this study is to analyze the viability of the adoption of electric battery buses for a BRT system in Sao Paulo, Brazil. To do so, an analytic hierarchy process (AHP) model considering the criteria from the triple-bottom-line sustainable approach—economic, environmental, and social—was developed and tested using the literature and data from the transport municipal authority of Sao Paulo city in Brazil. The results indicated that in a more comprehensive view rather than simply considering the implementation costs, an electric BRT system can be advantageous for a city's society.

The main contribution of this paper is to provide and test a decision-making model that can be used for decision-makers to verify the feasibility of adoption of battery buses to operate in their BRT systems.

This article is divided as follows: after this introduction, a section on the background of electric buses is presented; after the materials and methods are indicated, the results and discussion sections show and discuss the main findings; and the conclusion points out the main ideas obtained from the research.

2. Background

2.1. Electric Buses

The first electric bus dates back to 1882 in Germany when Siemens and Holske created an electric vehicle called Elekromote which gave rise to the Trolleybus. Around 30 years later, the first trolleybus line was implemented in 1911 in England [33].

Currently, there are three models of electric buses in operation worldwide, as shown in Figure 1: trolleybuses that make their journeys connected to parallel overhead lines,

hybrid buses that have an electric motor working in conjunction with a combustion engine, and battery electric buses that are powered by a battery present in the vehicle itself.

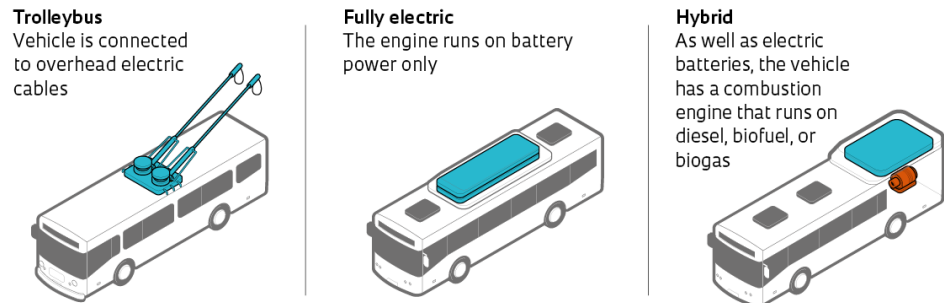


Figure 1. Type of electric energy buses. Source: adapted from [34].

Trolleybuses are one of the most suitable technologies in environmental terms and have consolidated and reliable technology [35]. In the beginning, trolleybuses had a low implementation cost because they took advantage of the electrical structure of existing trams and managed to overcome obstacles that could be on the road [36].

However, as they need to be connected to parallel overhead lines and power substations, they are less flexible than a conventional bus since any changes in their operations must take into account the parallel overhead lines.

To understand a trolleybus network, it is necessary to manage the cost of this infrastructure, which is estimated at around USD 280,000.00/km (value converted from BRL considering USD cost on 1 June 2023, 1 USD = 5 BRL) for parallel overhead lines and USD 220,000.00 for each necessary substation, and these values can also be an impediment to its expansion [37].

Battery electric vehicles were common until the second decade of the 21st century. However, electric buses in this period were manufactured on a small scale due to the low autonomy and weight of batteries at the time [38]. Since the beginning of the 21st century, battery electric buses have returned to use and have experienced new research.

The battery pack is one of the main parts of a vehicle; it is through battery packs that vehicles are powered, and they are recharged through Electric Vehicle Supply Equipment (EVSE) [36]. Currently, the autonomy of a battery electric bus is 250 km and can be recharged overnight or receive small loads during commercial operation. Hybrid buses are intermediate and are seen as a bridge between the use of internal combustion engines and the electrification of a fleet; the use of hybrid engines is up to 40% more efficient than the use of internal combustion engines only [39,40]. The electric motor is used when the combustion engine has low efficiency, so the combination of two energy sources makes a hybrid engine more efficient than a combustion one and an electric motor [36]. Currently, Shenzhen in China is a reference in terms of electric buses since it has fully electrified its fleet of 16,000 buses [40]. In comparison, there are only 4150 electric buses currently in operation in Latin America [41].

2.2. Bus Rapid Transit—BRT

A bus rapid transit or BRT is a medium-capacity system with exclusive lanes for bus circulation that provides a better user experience. Reasonable cost, high-capacity vehicles, and services are some economic and social advantages of BRT systems [42].

The five main characteristics of a BRT are segregated infrastructure with exclusive circulation; alignment of bus lanes, especially in the median; off-bus fare collection; level boarding; and treatment of intersections with passing priority [11].

To implement a BRT system, it is necessary to plan and adjust the demand, concentrating on the system from feeder lines using an Operational Control System (OCC), with information obtained in real time through Intelligent Transport Systems (ITSs) [10].

The main ITS present in a BRT system provides information on electronic ticketing, vehicle location in real time with GPS, user information in real time, communication between the OCC and the buses, and traffic light preference prioritizing the buses [10].

The literature highlights the BRT system in Curitiba, Brazil, as the first BRT in the world; before the idea was conceived for the city transport system, there were already efforts to improve the quality of transport for the population that influenced the BRT system. Current BRT systems implemented ideas already used by rail systems for the operation of buses [42].

The first BRT concept was implemented in the City of Chicago in 1937, with the conversion of three railroads, Douglas Park, Lake Street, and Logan Square, into express bus lanes. At that time, the growth of private vehicles had brought inconvenience to traffic. While, in 1915, Chicago had 35,000 registered vehicles, the fleet now has 335,000 registered vehicles [43].

In 1963, counterflow bus lanes were introduced in New York City, and in 1964, exclusive lanes, this time in the street flow, arrived in the City of Paris, France. In 1966, the first bus lanes built on the median were built in the City of St. Louis in the USA and Liège in Belgium after the conversion of the tram systems in these cities [42].

In 1969, the first 6.5 km high-speed busway opened on the Shirley Highway in Northern Virginia in the USA, and prioritizing buses resulted in a substantial improvement in the ability of people to move along the corridor during peak times [42,44].

In 1971, the town of Runcorn in the UK opened a bus corridor that catalyzed the town's development, increasing the use of public transport and increasing the mobility of the town's residents [42,45].

Busways arrived in developing countries in 1972 with the Via Expressa in Lima, Peru, which offered a basic service and could not be considered a BRT. In the same year in London, United Kingdom, with the conversion of Rua Oxford, the first exclusive streets for buses and taxis appeared, and in the following year in 1973, the exclusive route "El Monte" with 11 km was developed in Los Angeles. However, it was difficult to walk or use a bicycle to access the buses [42,46,47].

In Brazil, during the 1960s and 1970s, there was an increase in the discussion about the problems of public transport. The main issues were increasing traffic congestion and the precariousness of the transport service, and for these issues, it was proposed to improve public transport using corridor design and bus networks [48].

The Curitiba system was conceived before the use of the term BRT [10]. Due to the lack of financial resources to fund a metro rail system, Curitiba combined bus lanes with a more pedestrian-friendly city, green spaces, and social programs to meet the rapid population growth that occurred during the 1970s, which, together with the oil crisis, further increased the demand for public transport [48].

Curitiba's success turned the city into a world case study and inspired many similar projects that turned Brazil into the country of bus lanes and BRTs became widely known. However, from the 1990s onward, there was a decline in passenger numbers in Brazil and Latin American transport systems due to the increased use of individual motorized transport [42,48].

In 1996, a BRT was inaugurated in Quito, using trolleybus technology. Quito's trolleybus system was well accepted by the population, had improved quality of life, and reduced gas emissions and noise pollution [49]. Simultaneously, in 1999, in the City of Kunming in China, the first busway was developed at a central job site, and in 2001, another system was inaugurated in the City of Taipei. Similar systems were implemented in the cities of Vancouver in Canada (1996), Miami in the USA (1997), and Brisbane in Australia (2000) [42].

However, the most prominent BRT project implemented in the year 2000 was the TransMilenio in Bogotá, Colombia. The Colombian capital is a large city with a population of around seven million people and a high density. Based on the experiences seen in Curitiba, Goiânia (Brazil), and Quito (Ecuador), the managers decided to apply the system in the city [42].

Currently, TransMilenio has 12 corridors, with 141 stations and nine terminals, which together have 114.4 km of network extension. The data obtained in February 2023 accounted

for 10 million kilometers traveled and 496,000 trips made on the trunk corridors, which served approximately 42 million passengers [50].

Nowadays, there are BRTs on all five continents. Table 1 presents an overview of existing BRTs in the world.

Table 1. BRT lines per continent.

Continent	Number of Cities	km	Passengers/Day
Africa	6	152	491,578
North America	22	794	1,005,796
Latin America	63	2003	20,785,206
Europe	46	919	2,914,113
Asia	45	1691	9,238,060
Oceania	5	109	436,200

Source: adapted from BRTDATA [51].

There are currently 5607 km of BRTs in 186 cities around the world, and these systems transport more than 31 million passengers per day [51].

Latin America is the continent that has the largest number of BRTs in operation, and approximately 36% of the corridors transport 60% of the volume of passengers. In Asia, approximately 24% of the corridors carry 30% of passengers. In Europe, 25% of the corridors are present, but they carry only 8.36% of passengers. Africa and Oceania have approximately 6% of the world's BRTs and carry approximately less than 3% of passengers [51]. In Brazil, the available 95 BRT corridors add up to 872 km and transport more than 7.4 million passengers daily, positively impacting their areas of influence [51].

3. Materials and Methods

To conduct this study, the first step was to establish an electric vehicle to be adopted running on zero emissions. We adopted the battery bus—governments are not interested in trolleybus systems anymore due to the necessity of spending on the infrastructure of parallel overhead lines and substations. A trolleybus system is expensive to be implemented, and the municipality would be responsible for maintaining the system. In Brazil, only Sao Paulo operates a trolleybus system since the 1950s and sustains it until now. There is no new network infrastructure since the privatization of the municipal transport services of the city more than 30 years ago.

To make a comparison between the two BRT models (battery electric bus and diesel bus), we adopted the analytic hierarchy process methodology (AHP). The AHP methodology aims to assist in the decision-making of complex problems based on the hierarchical importance of one criterion over the others [52].

The first step of the AHP is the construction of a decision tree which is composed of the following attributes: decision is the most complex problem and is at the highest level; at the intermediate level are the criteria used to reach the final decision; and at the lowest level are available alternatives [53] (Figure 2).

The problem is divided into hierarchical levels to facilitate understanding, and from there, an evaluation can be made on the qualitative and quantitative criteria where the most important is defined through a parity comparison. This means, two by two, using a scale that correlates the verbal judgments with the number of judgments that must be filled in the judgment matrix (Table 2).

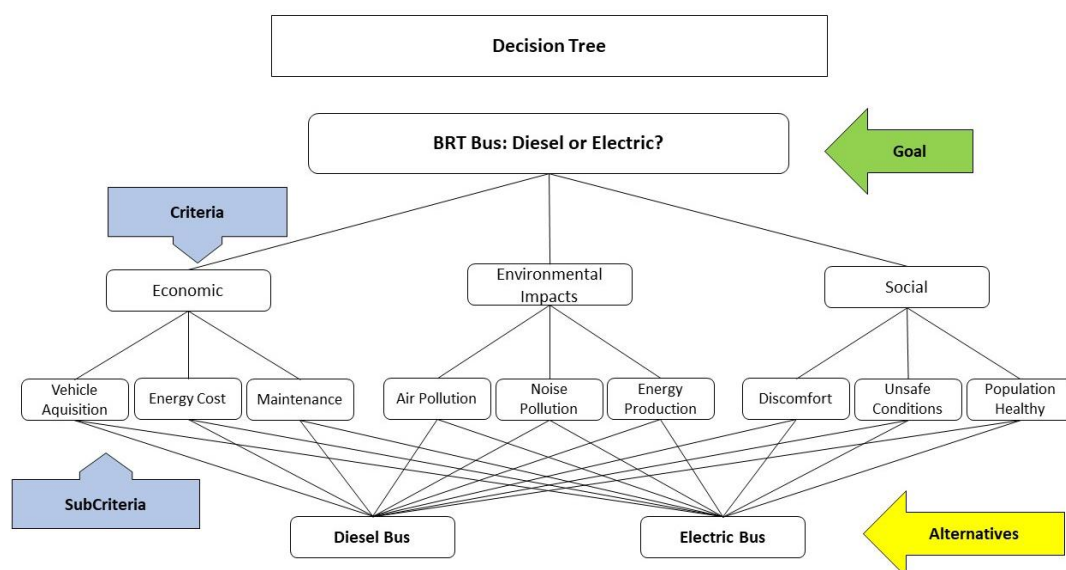


Figure 2. Decision tree.

Table 2. Importance scale of the AHP.

Scale	Meaning
1	Equally Important
3	Moderate Importance
5	Strong Importance
7	Very Strong Importance
9	Extremely Important
2–4–6–8	Intermediate Values

Peinaldo [54] and Lucena and Mori [55] explain that there must be the principle of reciprocity to perform a comparison using this scale. When criterion A is much more important than B on a scale of 5, criterion B must be 5 times less important than criterion A and must be $1/5$. The mathematical representation of the pairwise comparison is represented by Equation (1).

$$A = a_{ij} = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ a_{n1} & a_{n2} & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

Our research considered two alternatives (electric bus and diesel bus) and three criteria (economic, environmental, and social impacts). The scale was compared using data obtained in the literature and from the Sao Paulo transport authority. For each criterion, we established sub-criteria:

- **Economic impact:** To build the economic impact factor, we used the sub-criteria of vehicle acquisition (cost/estimated years of use), energy cost (energy per kilometer traveled—tank-to-wheel (TTW)) and maintenance (cost of maintenance per kilometer traveled).
- **Environmental impact:** To build the environmental impact factor, the following criteria were considered: air pollution (USD per passenger per km), noise pollution (qualitative value based on the literature), and energy production (cleanliness of production energy matrix of country—well-to-tank (WTT)).

- Social impact: To build the social impact factor, we considered discomfort (on the trip—qualitative value based on the literature), unsafe conditions (qualitative value based on the literature), and population health (qualitative value based on the literature).

We considered a BRT system operating 100,000 km per year per vehicle considering daily use of 250 km—the average daily operation of a bus in São Paulo, the biggest city in Brazil, is 196 km.

The parameters for the AHP sub-criteria were as follows:

- Vehicle acquisition: The vehicle acquisition cost is currently higher for an electric bus (USD 682,000.00 using the BYD D11B as a basis [56]) than for a diesel bus (USD 359,000.00 using the Mercedes-Benz O-500 UDA—BlueTec 5 as a basis) [57]. However, an electric model has a longer duration of use, estimated to be 15 years, compared to a diesel vehicle which has 10 years [58]. For this reason, to equalize the cost, it was decided to compare the purchase price divided by the useful life of the vehicle, which resulted in USD 46,000.00 for an electric bus and USD 36,000.00 for a diesel bus.
- Energy cost: The energy cost for vehicle operation was calculated for an electric bus considering the value of kWh is USD 0.13 [59] and an electric bus has a consumption of 1.26 kWh/km [38], resulting in USD 0.16/km plus 13% for air conditioning operation for a total of USD 0.19/km, with an overnight battery recharge. For a diesel bus, the average cost of diesel was calculated to be USD 1.14 [60] and consumption was calculated to be 0.15 l/km, resulting in the value of USD 0.85/km; by adding 13% for the consumption for air conditioning, a total cost of USD 0.96/km was calculated for implementing the Arla 32 system to reduce emissions [61].
- Maintenance: Operation and maintenance costs were obtained from Rebouças and Daniel [58], being USD 1.06/km for diesel buses and USD 1.04/km for electric buses (Table 3).

Table 3. Comparison of BRT values.

Item	Battery Electric Bus (USD)	Diesel Bus (USD)
Vehicle acquisition per year	46,000.00	36,000.00
Energy cost per year	19,000.00	98,500.00
Maintenance per year	104,500.00	105,600.00
Total	169,500.00	240,100.00

- Air pollution: In terms of emissions into the air, electric vehicles have an advantage over diesel vehicles as they do not emit gases. The emissions from an articulated bus was calculated considering the value of the impact of smoke in a metropolitan area—EUR 0.0116 converting to USD 0.01200/passenger/km. Considering an articulated bus with a capacity of 170 passengers (22 m for electric buses and 23 for diesel ones) running at its maximum capacity, we reached the value of USD 216,000.00, which is very close to the operating cost of the vehicle [62].
- Noise pollution: For monitoring noise pollution, the evaluation was qualitative, according to Raymundo and Reis [62]. The noise generated by vehicle operation creates effects on sound waves and is well known in the literature, but it is not easy to measure outside a laboratory. In this way, it was considered that an electric bus has an impact between moderate and strong, and we assigned an index of 4 according to Table 2. Noise causes well-being and social disturbances that can be psychological and emotional, such as displeasure, sleep disturbances, and loss of productivity, and physiological disturbances, such as hearing damage and fatigue [62].
- Energy production: Regarding the energy production requirement, the impact of energy generation due to vehicle movement was evaluated. An electric bus is considered in the Brazilian electrical matrix to be predominantly clean, with 82.9% of energy extracted from renewable sources, most of them through hydroelectric plants (56.8%) [63].

- Discomfort: The disutilities of transport were not socially evaluated; in a qualitative way, they reflect the preservation of the use of a transport system, and in the case of this study, the bus model [62]. The first disutility is discomfort, which is the disutility related to what bothers passengers during transport, such as an earlier injury or abortion, allowing the consideration of how physical or psychological discomfort can be limited.
- Unsafe conditions: the second disutility is unsafe conditions, which is the disutility of transporting passengers that are related to the safety of using the mode of transport under study, and the causes can be human, vehicle, and infrastructure deficiencies in addition to the risk of traffic accidents [62].
- Population health: the health of the population is an externality related to the negative impacts on society associated with transport infrastructure to the detriment of other land uses [63].

To deal with data processing and to obtain AHP results, we used Expert Choice® v.11. Expert Choice is a user-friendly supporting software that has contributed to the success of the AHP method because it incorporates intuitive graphical user interfaces and automatic calculation of priorities and inconsistencies, and it still runs the AHP precisely as described in its original publication [64,65].

One important aspect of the AHP approach refers to the inconsistencies that validate the model. Therefore, consistency ratio (CR) needs to be calculated, as shown in Equation (2). A decision can be considered acceptable if its $CR \leq 0.1$ [66]. To establish the CR, it is necessary to obtain the consistency index (CI), as shown in Equation 3, and the random index (RI) from Table 4 [67].

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

$$CI = \frac{(\lambda_{\max} - 1)}{(n - 1)} \quad (3)$$

$\lambda_{\max}$ is the biggest eigenvalue of the pairwise comparison for each matrix of order $n = 9$. Then, the consistency ratio is calculated using Equation (3) and the random index (RI), presented in Table 4, is generated for a matrix with $n = 9$ [52].

Table 4. Random index.

n	1	2	3	4	5	6	7	8	9
RI	0.0	0.0	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.41	1.45

4. Results

The general results, as shown in Figure 3, allowed us to identify the viability of the adoption of battery electric buses for a BRT system in Sao Paulo, Brazil. The social and environmental scores were essential to this result.

It was possible to verify an advantage of electric buses (60.9%) over diesel ones (39.1%). The results show that the economic impact (13.5%) on the best energy matrix is smaller than the environmental impact (28.1%) and the social impact (58.4%). Thus, it is possible to infer that the higher cost of electric buses can be amortized due to the other benefits, mainly the social ones [68].

An example is the calculation of the impact of gas emissions, which is not included in the direct calculation of the comparison among vehicles but generates an impact that represents 90% of the value of a diesel bus. This value is not a direct cost, so it is added separately and ends up being funded by the state, even if indirectly, as a result of public transport emissions [62].

We now discuss the results according to the main criteria. The economic impact can be seen in Figure 4.

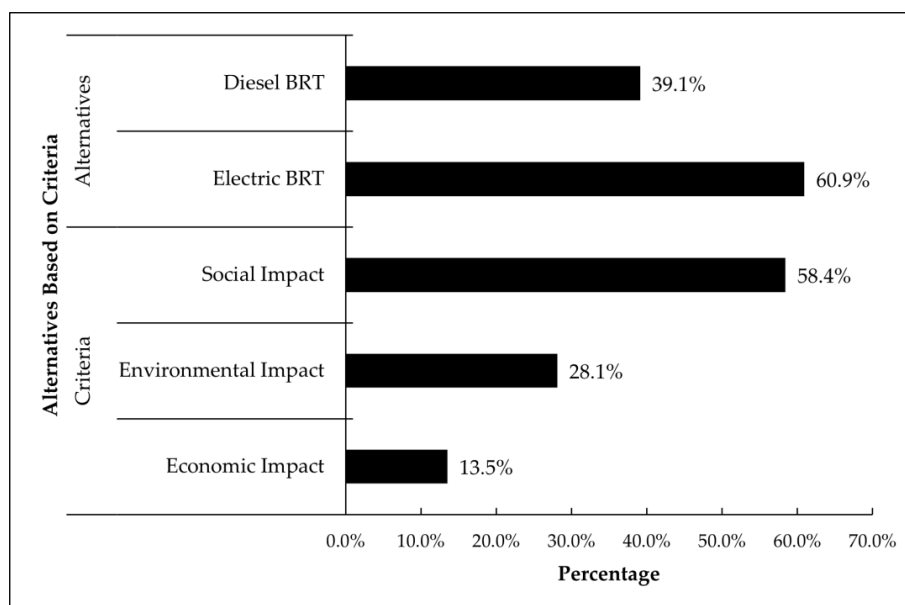


Figure 3. AHP general results (CR: 0.10).

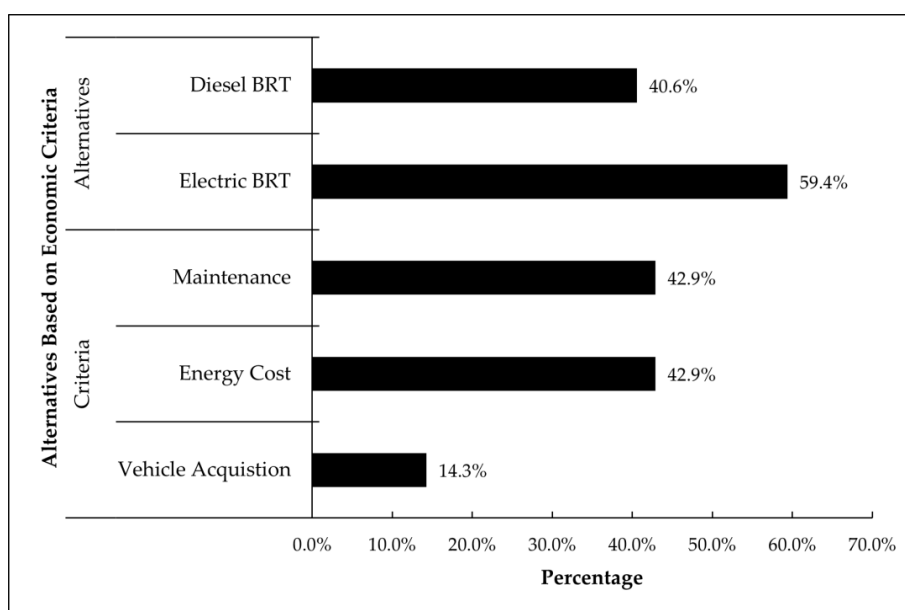


Figure 4. Economic impact results (CR: 0.01).

It is possible to verify an advantage of electric buses (59.4%) over diesel ones (40.6%). Vehicle acquisition has a small impact on the decision of the best option for the BRT system because the prices considering the years of use of vehicles are close. Electric buses operate for 15 years, and they are more expensive; a diesel BRT is cheaper, but the duration of use is 10 years only.

The values of maintenance (42.9%) and energy cost (42.9%) are equivalent in the decision model. All these calculations considered the advantage in the adoption of an electric BRT. However, there is no electric BRT in Sao Paulo. In Brazil, only two corridors operate with battery electric buses: (1) Linha Verde (São José dos Campos) with 12 articulated vehi-

cles, and (2) BRT Salvador with standard vehicles [69]. In the ABD corridor (Metropolitan Area of São Paulo), the operation is carried out with trolleybuses [70].

The results of the environmental criteria are presented in Figure 5.

According to these criteria, an electric BRT is by far the best option (83.9%) compared to a diesel one (16.1%). Regarding air pollution, as it has zero emission, an electric system is more advantageous than a diesel bus with a Euro V engine [71].

An electric bus does not emit polluting gases, and the impact of operation is less than that of diesel buses. Therefore, it is not necessary to add the impact of emission of gases that represents almost the value of another bus [72].

For noise pollution, an electric BRT produces a low level of sound compared with diesel vehicles. As for the criterion of energy production, as it is cleaner and more renewable, the impact of this criterion favors electric buses.

The results of the social criteria are presented in Figure 6.

Considering the social aspect, electric buses are the better option to choose (53.8%) compared to diesel buses (46.2%). The discomfort level is similar in both vehicle types and, for this reason, the impact on the decision is low. Unsafe conditions are highlighted due to the greater contact between the diesel engine and the passenger compartment. Diesel vehicles also have a greater impact on the health conditions of the population than electric ones [72]. Motorized transport is responsible for several pollutants that are harmful to health and degrade the urban environment, and diesel vehicles, even when they are responsible for a small part of displacements, are responsible for a large part of carbon, nitrogen, and sulfur emissions [11].

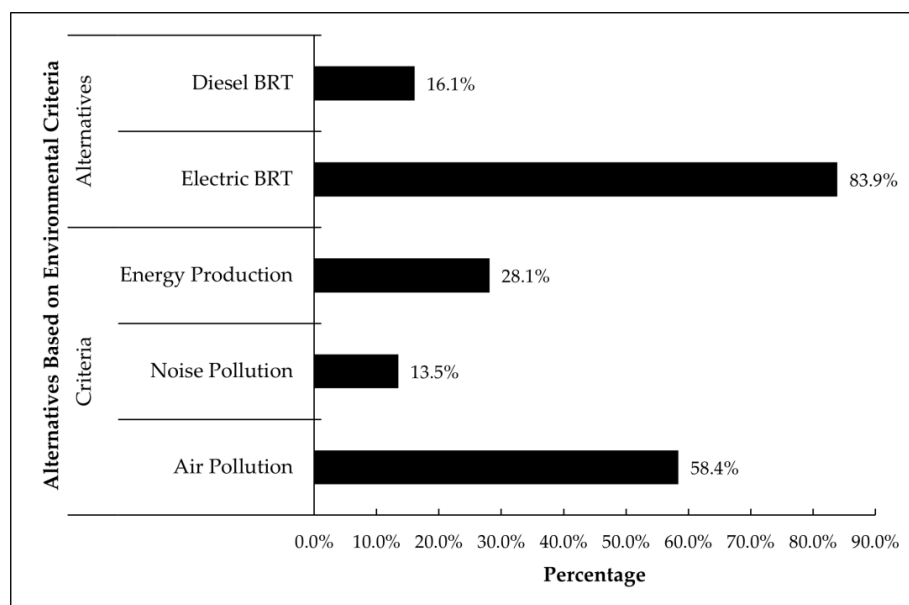


Figure 5. Environmental impact results (CR: 0.10). Source: the authors.

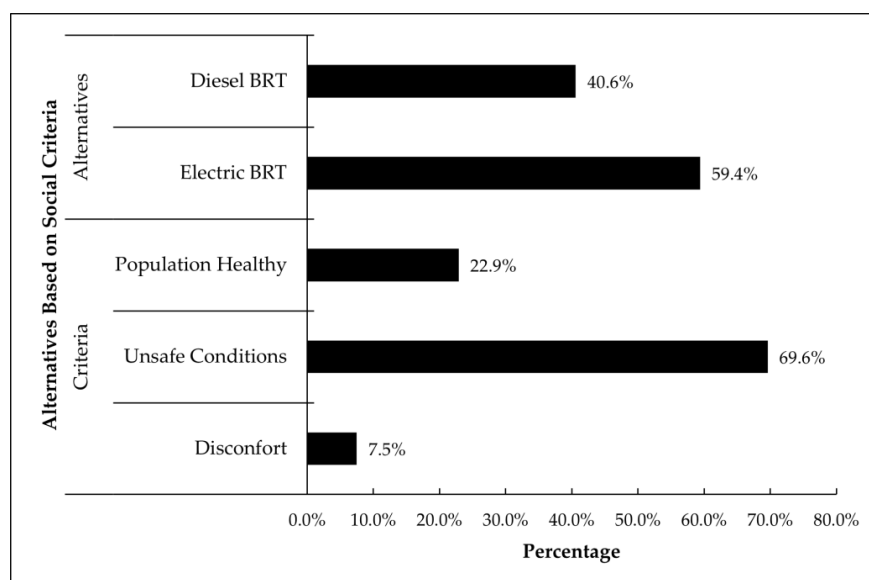


Figure 6. Social impact results (CR: 0.07). Source: the authors.

5. Discussion

Urban mobility is a challenge worldwide. More people now live in cities, and they need one system of transport to attend to their activities on a daily basis. Hanson [73] points out that distances between activity sites have become longer and accessibility has come to depend increasingly on mobility, particularly privately owned vehicles.

Active mobility is by far the most sustainable method, but many activities are located at distances where walkability and cycling can be impractical. Therefore, passenger collective transport needs to be encouraged because it moves more people than private cars and can contribute to optimizing the urban space. Yang et al. [74] infer that public transport reduces traffic congestion and greenhouse gas emissions.

Even though public and collective transport seems to be one of the best options to move around in cities, such system faces the costs of infrastructure and provokes externalities and disutilities [73,75]. One of the main concerns regarding these externalities and disutilities is the environmental impact caused by operation. There is no doubt that metros and trains can run with low emission impacts, but their costs of construction and operations are impracticable for many cities and reduce the possibility to extend them to all areas of a metropolitan city. Even London, one of the most important and richest capitals of the world, waited 40 years to approve the project of another metro line, the Elizabeth Line in 2008 [76].

For this reason, bus transport remains the most used public transport system worldwide. However, buses are responsible for traces of pollution in cities due to diesel engine emissions. Sao Paulo, for instance, has 14,000 buses running daily in 1340 lines and transporting 8 million people, but these buses emit 21% of NO_x, generating negative effects on human health, such as heart disease, stroke, lung cancer, asthma, and chronic obstructive pulmonary disease [76]. Buses are a major source of climate pollutant emissions, including carbon dioxide (CO₂) and black carbon, a potent short-lived pollutant [76].

As mentioned previously, one solution adopted to transform bus transport to be more attractive in comparison to metros, trains, and trams systems is the adoption of bus rapid transit, which started in the 1970s in Curitiba, Brazil, and has disseminated worldwide. The International Association of Public Transport (UITP) acknowledges that BRT is one of the biggest innovations in the bus domain due to the transformative effect it can have on cities in terms of congestion and air pollution [77]. However, there remains the question of how to turn these systems less polluted.

Our results comparing the adoption of battery electric buses rather than diesel ones allow us to verify that, in the long run, electric systems are more economical and can be the next generation of BRT systems. For example, São Jose dos Campos in Brazil developed their project of BRT using electric buses provided by the Chinese company BYD, which is a strong investment in this sector [78], as shown in Figure 7. However, it was possible only because the city government resolved to assume the operation itself without a private company.



Figure 7. Battery BRT in São José dos Campos, Brazil. Source: [79].

Electric buses are not the ultimate solution for environmental problems because there are issues regarding the generation of energy and the discard of batteries. However, they can be the first step in the direction of building a more sustainable city. Unfortunately, a sustainable city does not depend on industrial steps but on a change in the mindset of people who use private cars as a means of transportation. The only way to change this scenario is to offer a fast, comfortable, connected, and economic public collective system.

The AHP methodology allowed us to adopt a quantitative methodology to analyze the advantages of the adoption of battery buses in BRT systems, showing decision-makers the feasibility of such adoption while considering the impacts on three societal pillars: economic, environmental, and social. And this is the novelty of the study. We could find studies using MCDM techniques to analyze the operation process of BRT [80], but none of them compared battery and diesel bus adoption.

In this study, we measured the values in the Brazilian scenario, more specifically São Paulo's situation, but the methodology can be used to compare different countries, which may present even better results. Brazil does not retain its battery bus technology and suffers the influence of the devaluation of its currency before the US dollars (currency used in international trade) during foreign acquisition of equipment, reducing the competitiveness of adoption of electric systems in BRT.

6. Conclusions

This study compared battery electric and diesel BRT operations using an AHP decision-making model. The criteria adopted were economic, social, and environmental impacts. Even though electric BRT has a higher acquisition cost than diesel ones, the lower cost of electricity in comparison to diesel makes it advantageous in the long run. Besides that, such a system has no gas emissions.

Our results indicated that the social benefits of public transport are more important than the economic criteria. However, this does not receive much attention in Brazil where economic criteria often end up overlapping, reducing the quality of public transport and increasing the use of motorized individual transport.

The environmental benefit of electric buses that do not emit gases contributes to the reduction in environmental pollution and, as they are silent, these buses also reduce noise pollution and increase comfort during travel, which must be considered in the decision to obtain a sustainable transport system in urban areas.

This study is not free of limitations. The AHP model developed to make comparison in this study required a large quantity of data, which prevents the development of a more comprehensive model involving comparing the same scenario in many cities at the same time. Each city has particularities regarding fares, government subsidies, population, infrastructure of transport, and income, which may affect the results of the model. Moreover, the quantitative data obtained and the literature background may affect the AHP model and its results according to the sources adopted. Despite these limitations, the AHP model permits a more comprehensive analysis than a straight cost decision, which is always affected by the adoption of new technologies. It is clear that new technologies in early developments will be more expensive than mature ones, and it is necessary to look ahead based on indirect advantages. We believe that an analysis considering social, economic, and environmental impacts could aid decision-makers in making decisions based on a consideration of the future of their cities and population welfare.

A suggestion for future studies is to compare BRT with trams in the same context presented in this paper. Moreover, future studies could include in the analysis the discarded components and emissions due to energy production.

Author Contributions: Conceptualization, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; methodology, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; software, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; validation, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; formal analysis, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; investigation, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; resources, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; data curation, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; writing—original draft preparation, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; writing—review and editing, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; visualization, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; supervision, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; project administration, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R.; funding acquisition, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and H.R. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The research was carried out under financial support obtained from the research subsidy of the Faculty of Engineering Management (WIZ) of Bialystok University of Technology, grant No. WZ/WIZ-INZ/4/2022 (Olga Orynych). This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brasil (CAPES)—Finance Code 001 (Scholarship for Gabriel Santos Rodrigues).

Data Availability Statement: Data will be made available from the corresponding author upon request.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Carvalho, C.H. Urban Development. Available online: <https://www.worldbank.org/en/topic/urbandevelopment/overview> (accessed on 5 May 2023).
2. Kębłowski, W.; Dobruszkes, F.; Boussauw, K. Moving past sustainable transport studies: Towards a critical perspective on urban transport. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2022**, *159*, 74–83. [CrossRef]
3. Tucki, K.; Orynych, O.; Wasiak, A.; Świć, A.; Mruk, R.; Botwińska, K. Estimation of Carbon Dioxide Emissions from a Diesel Engine Powered by Lignocellulose Derived Fuel for Better Management of Fuel Production. *Energies* **2020**, *13*, 561. [CrossRef]
4. OECD. *Financing Climate Objectives in Cities and Regions to Deliver Sustainable and Inclusive Growth*; OECD Environment Policy Papers; Paris, France, 2019; p. 17. [CrossRef]
5. Vicente, P.; Sampaio, A.; Reis, E. Factors influencing passenger loyalty towards public transport services: Does public transport providers' commitment to environmental sustainability matter? *Case Stud. Transp. Policy* **2020**, *8*, 627–638. [CrossRef]

6. Cruz, I.S.; Katz-Gerro, T. Urban public transport companies and strategies to promote sustainable consumption practices. *J. Clean. Prod.* **2016**, *123*, 28–33. [CrossRef]
7. UITP. Metro. Available online: <https://www.uitp.org/topics/metro/> (accessed on 8 May 2023).
8. Kerkhof, A. Bus. Available online: <https://www.uitp.org/topics/bus/> (accessed on 5 May 2023).
9. UITP. Electric and Innovative BRT for Green Cities: UITP Coordinates eBRT2030 as New Flagship Project on Electric Mobility. Available online: <https://www.uitp.org/news/electric-and-innovative-brt-for-green-cities-uitp-coordinates-ebrt2030-as-new-flagship-project-on-electric-mobility/> (accessed on 8 May 2023).
10. Amicci, A.G.N.; Fernandes, A.; Malburg, C.H.R.; Santos, D.V.; Araldi, F.; Souza, F.d.O.; Di Pierro, L.F.; Nakazaki, M.; Silva, N.A.A.d.; Santana, O.; et al. Guia TPC: Orientações Para Seleção de Tecnologias e Implementação de Projetos de Transporte Público Coletivo. Technical Report, BNDES. 2018. Available online: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/14921> (accessed on 8 May 2023).
11. Institute for Transportation and Development Policy—ITDP. *The BRT Standard*; ITDP: Rio de Janeiro, Brazil, 2016.
12. Lindau, L.A.; Senna, L.A.D.S.; Strambi, O.; Martins, W.C. Alternative financing for Bus Rapid Transit (BRT): The case of Porto Alegre, Brazil. *Res. Transp. Econ.* **2008**, *22*, 54–60. [CrossRef]
13. Hidalgo, D.; Gutiérrez, L. BRT and BHLS around the world: Explosive growth, large positive impacts and many issues outstanding. *Res. Transp. Econ.* **2013**, *39*, 8–13. [CrossRef]
14. Nikitas, A.; Karlsson, M. A Worldwide State-of-the-Art Analysis for Bus Rapid Transit: Looking for the Success Formula. *J. Public Transp.* **2015**, *18*, 1–33. [CrossRef]
15. Shyr, O.F.; Andersson, D.E.; Cheng, Y.-H.; Hsiao, Y.-H. What explains rapid transit use? Evidence from 97 urbanized areas. *Transp. Res. Part A Policy Pract.* **2017**, *100*, 162–169. [CrossRef]
16. Krelling, C.; Badami, M.G. Operational and financial performance of Delhi’s natural gas-fueled public bus transit fleet: A critical evaluation. *Transp. Policy* **2016**, *47*, 178–188. [CrossRef]
17. Mahdavi, S.M.H.; Bhouri, N.; Scemama, G. Dynamic Resilience of Public Transport Network: A Case Study for Fleet-Failure in Bus Transport Operation of New Delhi. *Transp. Res. Procedia* **2020**, *47*, 672–679. [CrossRef]
18. Goedecking, N. What political institutions support Bus Rapid Transit? Evidence from a survival analysis of 92 cities in low- and middle-income countries. *Energy Res. Soc. Sci.* **2023**, *100*, 103084. [CrossRef]
19. Attard, M. Planning for Bus Rapid Transit in an island context. The challenges of implementing BRT in Malta. *Res. Transp. Econ.* **2023**, *100*, 101309. [CrossRef]
20. Samerei, A.; Aghabayk, K.; Soltani, A. Occupational Health and Job Satisfaction Assessment of Bus Rapid Transit (BRT) Drivers. *J. Public Transp.* **2022**, *24*, 100002. [CrossRef]
21. Dzikuć, M.; Miško, R.; Szufa, S. Modernization of the Public Transport Bus Fleet in the Context of Low-Carbon Development in Poland. *Energies* **2021**, *14*, 3295. [CrossRef]
22. BRT Appreciated Worldwide. What Does This Mean for Wrocław? Available online: <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/brt-doceniane-na-swiecie-co-to-oznacza-dla-wroclawia-47255.html> (accessed on 1 June 2023).
23. Metrobus—A Great Opportunity or a Way to Get Rid of Trams? Available online: [https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/metrobus-\[-\]-wielka-szansa-czy-sposob-na-pozbycie-sie-tramwajow-2528.html](https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/metrobus-[-]-wielka-szansa-czy-sposob-na-pozbycie-sie-tramwajow-2528.html) (accessed on 1 June 2023).
24. A City Where BRT Ends in Failure. Available online: <https://www.transport-publiczny.pl/wiadomosci/miasto-w-ktorym-brt-konczy-sie-fiaskiem-53948.html> (accessed on 1 June 2023).
25. Volvo Bus Rapid Transit. Available online: <https://www.volvobuses.com/pl/city-and-intercity/innovation/bus-rapid-transit.html> (accessed on 1 June 2023).
26. Levinson, T.C.H.S.; Zimmerman, D.S.; Clinger, D.J.; Rutherford, H.S.C. Bus Rapid Transit: An Overview. *J. Public Transp.* **2002**, *5*, 1–30. [CrossRef]
27. EMT Madrid Launches a BRT. 10 Irizar ie Tram on a Line with Traffic Light Priority. Available online: <https://www.sustainable-bus.com/news/emt-madrid-brt-line-irizar/> (accessed on 1 June 2023).
28. Solaris to Supply 14 Double Articulated Electric Buses to Tide Bus Danmark. Available online: <https://www.solarisbus.com/pl/biuro-prasowe-solaris-bus-coach-sp-z-o-o/solaris-dostarczy-14-dwuprzegubowych-autobusow-elektrycznych-do-tide-bus-danmark-1649> (accessed on 1 June 2023).
29. Hydrogen Buses Base BRT in Pau. Available online: https://transinfo.pl/infobus/wodorowe-autobusy-podstawa-brt-w-pau-more_120123/ (accessed on 1 June 2023).
30. Citea Slfa Electric Brt. Available online: <https://www.vdlbuscoach.com/pl/produkty/citea/citea-slf-slfa-electric> (accessed on 1 June 2023).
31. VDL Delivers a Citea Electric to Postbus Switzerland. Go with the Electric Pilot! Available online: <https://www.sustainable-bus.com/news/vdl-bus-coach-electric-pilot-electric-bus-to-postbus-switzerland/> (accessed on 1 June 2023).
32. OECD. *Cities and Climate Change: National Governments Enabling Local Action*; OECD: Paris, France, 2014. Available online: <https://www.oecd.org/env/cc/Cities-and-climate-change-2014-Policy-Perspectives-Final-web.pdf> (accessed on 5 May 2023).
33. Ferreira, E.R. Trólebus, Espaço e Sociedade. Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil, 1995. [CrossRef]
34. Zapparoli, D. Electric Buses on the Horizon. Available online: https://www.ipea.gov.br/portal/index.php?option=com_content&view=article&id=9567 (accessed on 4 April 2023).

35. São Paulo Transporte S/A—SPTrans. *Relatorio de Administracao 2018*; São Paulo Transporte S/A—SPTrans: São Paulo, Brazil, 2018; p. 477.
36. De França, R.; Fleury, A.d.T. Implementation of buses with greater energy efficiency as an evolution for public transport in the city of São Paulo. *Rev. IPT Tecnol. Inovação* **2023**, *7*, 7–26.
37. Macedo, J.E.J. Estudo de Linha de Trólebus em Natal. Ph.D. Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, 2017.
38. NTU. *Centro de Documentação e Memória Eurico Divon Galhardi*, 1st ed.; Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos—NTU: Brasília, Brazil, 2019.
39. Vaz, L.F.H.; Barros, D.C.; Castro, B.H.R.d. Veículos híbridos e elétricos: Sugestões de políticas públicas para o segmento. *BNDES Set.* **2015**, *41*, 295–344.
40. Summit Mobilidade. Em Shenzhen, na China, 100% dos Ônibus e Táxis São Elétricos. Available online: <https://summitmobilidade.estadao.com.br/ir-e-vir-no-mundo/em-shenzhen-na-china-100-dos-onibus-e-taxis-sao-eletricos/> (accessed on 6 November 2022).
41. Radar, E. Relatório Ebus Radar. Available online: <http://lookerstudio.google.com/reporting/2884db9f-149e-41de-b13f-1e55ad434335/page/gr8lB?feature=opengraph> (accessed on 1 November 2022).
42. Ministério das Cidades. *Manual de BRT (Bus Rapid Transit) Guia de Planejamento*; Ministério das Cidades: Brasília, Brazil, 2008.
43. Harrington; Kelker; Leuw, D. Transit Plans—1937 Plan. Available online: <https://www.chicago-l.org/plans/1937plan.html> (accessed on 1 July 2022).
44. McQueen, J.T.; Waksman, R. Increasing the People-Moving Capability of Shirley Highway. Available online: <https://onlinepubs.trb.org/Onlinepubs/trr/1977/626/626-006.pdf> (accessed on 31 May 2023).
45. Lesley, L. Runcorn A Rapid Transit New Town? *Built Environ.* **1983**, *9*, 232–244.
46. Mejía-Dugand, S.; Hjelm, O.; Baas, L.; Ríos, R.A. Lessons from the spread of Bus Rapid Transit in Latin America. *J. Clean. Prod.* **2013**, *50*, 82–90. [CrossRef]
47. Cottrell, W.D. Transforming a Bus Station into a Transit-Oriented Development: Improving Pedestrian, Bicycling, and Transit Connections. *Transp. Res. Rec. J. Transp. Res. Board* **2007**, *2006*, 114–121. [CrossRef]
48. Vasconcellos, E.A.; Mendonça, A. Política nacional de transporte público no Brasil: Organização e implantação de corredores de ônibus. *Rev. Transp. Públicos ANTP* **2010**, *33*, 73–95.
49. Lopez, R. El Corredor de Trolebuses de Quito. *Carret. Rev. Técnica Asoc. Española Carret.* **2003**, *133*, 99–115.
50. TransMilenio. Estadísticas de Oferta y Demanda del Sistema Integrado de Transporte Público SITP. Available online: <https://www.transmilenio.gov.co/publicaciones/149180/estadisticas-de-oferta-y-demanda-del-sistema-integrado-de-transporte-publico-sitp/> (accessed on 1 July 2022).
51. Global BRT Data. Available online: <https://brtdata.org/> (accessed on 12 April 2023).
52. Saaty, T.L. Decision making with the analytic hierarchy process. *Int. J. Serv. Sci.* **2008**, *1*, 83–98. [CrossRef]
53. Wolff, C.S. O Método AHP: Revisão Conceitual e Proposta de Simplificação. Master's Thesis, PUC Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brazil, 2008.
54. Peinado, H. *Método AHP Para Tomada de Decisão Multicritério*; Number 103 in Coleção Fundamentum; EDUEM: Maringá, Brazil, 2016.
55. Lucena, A.F.E.; Mori, L.M.D. Uso do Analytic Hierarchy Process (AHP) para Hierarquização de Métodos de Mensuração do Grau de Aplicação da Construção Enxuta. *Rev. Gestão Ind.* **2018**, *14*, 48–69. [CrossRef]
56. Campo Grande, P. BYD D11B: Dirigimos o Ônibus Elétrico de 22 m Fabricado no Brasil. Available online: <https://quatorrodas.abril.com.br/carros-eletricos/byd-d11b-dirigimos-o-onibus-eletrico-de-22-m-fabricado-no-brasil/> (accessed on 12 April 2023).
57. Ferreira, M. Teste: Dirigimos um Ônibus Superarticulado da Mercedes-Benz e não Pagamos a Passagem | Ônibus e Caminhões | Autoesporte. Available online: <https://autoesporte.globo.com/testes/review/2021/03/teste-dirigimos-um-onibus-superarticulado-da-mercedes-benz-e-nao-pagamos-a-passagem.ghtml> (accessed on 12 April 2023).
58. Rebouças, A.B.; Daniel, J. Análise Operacional de Ônibus Elétricos a Bateria em São Paulo. Available online: <https://theicct.org/wp-content/uploads/2022/11/brazil-hvs-ZEBRA-analise-operacion-onibus-eletricos-Sao-Paulo-nov22-1.pdf> (accessed on 12 May 2023).
59. Enel. Enel Brasil. Available online: <https://enel.com.br/content/enel-br/pt-saopaulo.html> (accessed on 12 April 2023).
60. Agência Nacional de Petróleo—ANP. Preços de Revenda e de Distribuição de Combustíveis. Available online: <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/levantamento-de-precos-de-combustiveis> (accessed on 12 April 2023).
61. Edital Completo da Prestação e Exploração do Serviço de Transporte Coletivo Público de Passageiros na Capital. Available online: <http://www.antp.org.br/noticias/clippings/edital-completo-da-prestacao-e-exploracao-do-servico-de-transporte-coletivo-publico-de-passageiros-na-capital.html> (accessed on 21 June 2023).
62. Raymundo, H.; Reis, J.G.M. How to Measure Performance Evaluation in Urban Passenger Transportation by Disutilities: Model and Application in the Ten Largest US Cities. *J. Urban Plan. Dev.* **2023**, *149*, 04023007. [CrossRef]
63. Empresa de Pesquisa Energética—EPE. Matriz Energética. Available online: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica> (accessed on 12 April 2023).
64. Ishizaka, A.; Labib, A. Analytical hierarchy process and expert choice: Benefits and limitations. *Oper. Res. Insight* **2009**, *22*, 201–220. [CrossRef]

65. Bagheri, M.; Lonik, K.A.T.; Jaafar, M.; Adam, R.; Talaat, W.I.A.W.; Wolf, I.D. Integrating Social, Economic, and Environmental Factors to Evaluate How Competitive Urban Landscapes Are for the Development of Sustainable Cities: Penang Island in Malaysia as a Case Study. *Land* **2023**, *12*, 104. [CrossRef]
66. Xu, L.; Kumar, D.T.; Shankar, K.M.; Kannan, D.; Chen, G. Analyzing criteria and sub-criteria for the corporate social responsibility-based supplier selection process using AHP. *Int. J. Adv. Manuf. Technol.* **2013**, *68*, 907–916. [CrossRef]
67. de Araújo, F.A.; dos Reis, J.G.M.; da Silva, M.T.; Aktas, E. A Fuzzy Analytic Hierarchy Process Model to Evaluate Logistics Service Expectations and Delivery Methods in Last-Mile Delivery in Brazil. *Sustainability* **2022**, *14*, 5753. [CrossRef]
68. Carvalho, C.H.R.d. *Mobilidade Urbana Sustentável: Conceitos, Tendências e Reflexões*; Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada: Rio de Janeiro, Brazil, 2016.
69. Machado, N. Enel X Estuda Eletrificação de Frotas de Ônibus em Cidades Brasileiras. Available online: <https://epbr.com.br/enel-x-estuda-eletrificacao-de-frotas-de-onibus-em-cidades-brasileiras/> (accessed on 12 April 2023).
70. Rodrigues, G.S.; dos Reis, J.G.M.; Machado, S.T. Panorama da mobilidade elétrica no transporte público da Região Metropolitana de São Paulo—Brasil. In *Proceedings of the VII Congresso Internacional de Logística e Operações do IFSP—Suzano*; IFSP: Suzano, Brazil, 2021; Volume 1.
71. Barassa, E.; Cruz, R.F.d.; Moraes, H.B. 1º *Anuário Brasileiro da Mobilidade Elétrica*; Plataforma Nacional da Mobilidade Elétrica: Rio de Janeiro, Brazil, 2020.
72. Hanson, S. Introducing Urban Transportation. In *The Geography of Urban Transportation*, 4th ed.; Giuliano, G., Hanson, S., Eds.; Guilford Press: New York, NY, USA, 2017; pp. 15–57.
73. Yang, Y.; Han, X.; Jiang, R.; Jia, B.; Gao, Z.-Y. Competition and coordination in public transport: A mode choice experiment. *Transp. Res. Part C Emerg. Technol.* **2022**, *143*, 103858. [CrossRef]
74. Raymundo, H.; Reis, J.G.M.d. Measures for Passenger-Transport Performance Evaluation in Urban Areas. *J. Urban Plan. Dev.* **2018**, *144*, 04018023. [CrossRef]
75. Williams, R.V.; Excell, P. Crossrail—London’s new underground railway. In *Proceedings of the 2018 25th International Workshop on Electric Drives: Optimization in Control of Electric Drives (IWED)*, Moscow, Russia, 31 January–2 February 2018; pp. 1–9. [CrossRef]
76. Dallmann, T. *Benefícios de Tecnologias de Ônibus em Termos de Emissões de Poluentes do ar e do Clima em São Paulo*; Technical Report; International Council of Clean Transportation: Washington, DC, USA, 2019; p. 572.
77. UITP. *Transforming Cities with Bus Rapid Transit (BRT) Systems: How to Integrate BRT?* Technical Report; UITP: Brussels, Belgium, 2019.
78. Sousa, M.S. José dos Campos (SP) Assume o Transporte e Anuncia Frota Elétrica. Available online: <http://www.mobilize.org.br/noticias/13061/s-jose-dos-campos-sp-assume-o-transporte-e-%20576%20anuncia-frota-eletrica.html> (accessed on 31 May 2023).
79. Albuquerque, C.; Tavares, V.; Siqueira, E.; Corrêa, F. Ônibus Elétricos: Um Guia de Eletromobilidade Para Cidades Brasileiras. Available online: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/como-implementar-onibus-eletricos-um-guia-de-eletromobilidade-para-cidades-brasileiras> (accessed on 31 May 2023).
80. Mavi, R.K.; Zarbakhshnia, N.; Khazraei, A. Bus rapid transit (BRT): A simulation and multi criteria decision making (MCDM) approach. *Transp. Policy* **2018**, *72*, 187–197. [CrossRef]

Disclaimer/Publisher’s Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

4.3 SUPTM 2024 : 2nd Conference on Future Challenges in Sustainable Urban Planning & Territorial Management

Foi publicado na **2nd Conference on Future Challenges in Sustainable Urban Planning & Territorial Management** e apresentado de forma “online” na Universidad Politécnica de Cartagena em Cartagena na Espanha em janeiro de 2024, o trabalho intitulado "**Analysis of the Substitution of Diesel Buses by Electric Ones in Rapid Systems: an Application of the Methodology in Expresso Tiradentes (São Paulo, Brazil)**". Nesse artigo propõe-se analisar os aspectos financeiros da substituição de ônibus movidos a Diesel por ônibus elétricos movidos a bateria (BEBs).

Figura 16: SUPTM 2024.



SUPTM 2024: 2nd Conference on Future Challenges in Sustainable Urban Planning & Territorial Management



Fonte: Autor



Proceedings

Analysis of the substitution of Diesel Buses by Electric ones in Rapid Systems: an application of the methodology in *Expresso Tiradentes* (São Paulo, Brazil)

Gabriel Santos Rodrigues ^{1*}, João Gilberto Mendes dos Reis ¹, Sivanilza Teixeira Machado ² and Acácio Pereira de Macedo Neto ¹

¹ RESUP – Research Group in Supply Chain and Logistics, Postgraduate Program in Production Engineering UNIP – Universidade Paulista; biel.rodriques@outlook.com (G.R.); joao.reis@docente.unip.br (J.R.); con-tato@ceconport.com.br (A.N.)

² NAPOLE Research Group, Federal Institute of Sao Paulo; sivanilzamachado@ifsp.edu.br (S.M.)

* Correspondence: biel.rodriques@outlook.com

Abstract: Urban planners are seeking alternatives to improve bus systems in cities to meet diverse ranges of passenger demands and reduce transport environmental impacts. In this sense, electromobility has been consolidated as the main alternative for reducing local and greenhouse gas emissions. In Brazil, the bus fleet in general is powered by Diesel engines. Therefore, the use of electric vehicles can reduce air pollution and serve citizens more sustainably. The purpose of this article is to analyze the replacement of diesel buses with electric buses using as a case study the *Expresso Tiradentes* – a BRT (Bus Rapid Transit) in São Paulo, Brazil. The methodology consists in an economical approach using current market values. The results suggest that electric buses have a high cost of acquisition; however, they have a lower operating cost that combined with social benefits brings positive results to the city in case of implementation.

Keywords: Electromobility; Public Transport; Bus Service; BRT; Environmental Pollution

Citation: Santos Rodrigues, G. et al.

Analysis of the substitution of Diesel Buses by Electric ones in Rapid Systems: an application of the methodology in *Expresso Tiradentes* (São Paulo, Brazil). *SUPTM 2024 conference proceedings* sciforum-082179. <https://doi.org/10.31428/10317/13532>

Publisher's Note: UPCT and SciForum stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

In Brazil, public passenger transport systems are considered inefficient by part of the population who use individual motorized transport to travel. This attitude increases congestion, the emission of polluting gases, the number of car accidents, and makes transport less attractive for the population [1].

To make transport systems more attractive investment must be made in prioritizing public transport systems over individual ones. An alternative is the use of Bus Rapid Transit systems (BRT). The BRT is considered the highest level of prioritization in a bus system being able to carry up to 35,000 passengers/hour/direction. BRT is classified as a medium transport capacity system [1].

Even with this prioritization, they are still responsible for local gas and greenhouse gas (GHG) emissions that are harmful to the health of the population [2] - because buses run on diesel engines. Therefore, society has been looking for cleaner ways to travel and the use of electric vehicles has been widely discussed as a solution to mitigate the effects of these gases.

The city of São Paulo, for instance, intends to reduce GHG by the year 2050 electrifying its bus fleet. In December/2023, only 269 buses of the city's fleet were electric - 201 trolleybuses and 68 battery buses [3].

São Paulo has only one service of BRT, *Expresso Tiradentes*, and does not yet have electric vehicles in operation. In this paper, we investigate the impacts of the adoption of electric vehicles in the *Expresso Tiradentes* line. Rodrigues et. al. (2023) [4] in a previous

study found that electric vehicles are more advantageous than diesel ones in operation on this type of corridor. However, does the same occur in the *Expresso Tiradentes* line?

The paper seeks to answer the following questions: (1) how much CO₂ will be avoided emitted during the operation of an electric BRT *Expresso Tiradentes* line; (2) Are the operating costs of electric buses and diesel ones equal, and (3) what is the financial impact of these emissions on the community?

2. Methodology

The *Expresso Tiradentes* opened in 2007, and it is considered the only Standard BRT of São Paulo. The line connects Terminal Mercado, in the City Center to Terminals Sacomã, in the South Zone, and Vila Prudente in the East Zone. It has a route of approximately 12 km, predominantly elevated and segregated. With a demand of 40,000 passengers per business day, the line is operated with super-articulated buses with an average interval of 3 minutes during rush hours [1].

In December/2023, three bus lines serve *Expresso Tiradentes*: 5105-10 – Terminal Sacomã – Terminal Mercado, 5109-10 – Terminal Vila Prudente – Terminal Mercado, and 5110-10 – Terminal São Mateus – Terminal Mercado.

In addition, there are two more services to meet specific demands: 5110-21 – São Mateus – Terminal Mercado and 5110-23 – Jardim Planalto – Terminal Mercado. However, for this study, we will exclude lines 5110-10 and services 5110-21 and 5110-23 as most of its route is outside the *Expresso Tiradentes* corridor and its configuration is different due to the collector position. Table 1 presents a summary of the operations of lines 5105-10 and 5109-10 in operation a month (22 Working Days, 4 Saturdays, and 4 Sundays).

Table 1. General Summary of BRT *Expresso Tiradentes*.

Line	Destination	Distance (km)	Trips				Total (km/Month)
			Working Days	Satur- days	Sundays	Total (Ttrips)	
5105-10	Terminal Mercado	8.03	213	165	150	528	4,240
	Terminal Sacomã	7.90	216	165	150	531	4,195
5109-10	Terminal Mercado	7.92	105	57	0	162	1,283
	Terminal Vila Prudente	8.91	105	57	0	162	1,443
Total (All lines) (km/month)							11,611

Afterward, the fleet's operational data was analyzed. Lines 5105-10 and 5109-10 have a fleet of 18 and 7 articulated buses respectively, totaling 25 vehicles. From these data, the CO₂ emissions that are no longer emitted were calculated, as the Electric buses are powered by electricity, using the methodology of Carvalho [5], which uses the value of the mileage multiplied by the factor 1.28, stop finishing the kg of CO₂ emitted per kilometer in a heavy vehicle such as a diesel bus.

The vehicle acquisition cost is currently higher for the electric bus € 649,800.00 than for the diesel ones € 342,000.00 (value converted from BRL considering Euro cost on 12 December 2023, € 1,00 = 5,32 BRL) [4]. However, the electric model has a longer use timespan, estimated at 15 years, compared to the diesel vehicle which has 10 years [6]. For this reason, to equalize the cost, it was decided to compare the purchase price divided by the use timespan of the vehicle, which resulted in € 3,610.00 for the electric bus and € 2,850.00 for the diesel bus.

The energy cost for vehicle operation was calculated as follows: For the electric bus, the value of kw/h is € 0,12 [7] and the electric bus has a consumption of 1.26 kw/h/km [6], totaling € 0,16/km plus 13% referring to air conditioning operation totaled € 0,18/km, with an overnight battery recharge. For the diesel bus, the average cost of diesel was calculated

at € 1,19 [8] and with consumption being 0.75 l/km, the value of € 0,86/km was obtained by adding the 13% referring to consumption for air-conditioning came to € 0,99/km and adding the cost of Arla 32 using the SPTrans Methodology [9].

Operation and maintenance costs were obtained from Rebouças and Daniel [6], being € 1,00 /km for diesel buses and € 1,01 /km for electric buses (Table 2).

At the same time, the disutility of negative impacts on the community was calculated, that is, the financial impact of the emission of Local Gases and GHGs that are no longer emitted into the atmosphere, as the vehicles are powered by electrical energy. For this, the methodology recommended by Raymundo and Reis [10] was applied, with the definitions for "Ordinary Bus" vehicles, which are urban buses with EURO V technology in an urban area.

4. Results and Discussion

In this way, it was found that 14,286 kg of CO₂ would not be released into the atmosphere every month if there were electric buses on *Expresso Tiradentes*. This value could generate carbon credits per month in the city of São Paulo.

The replacement with electric buses means that other types of gases harmful to human health are no longer emitted, an example is NO_x (nitrogen oxide), a gas generated by the burning of diesel, which causes heart disease, stroke, and cancer. lung, asthma, and chronic obstructive pulmonary disease [11].

Considering a monthly mileage of 11,611 km, it is possible to verify that the operation of electric buses would be more expensive than that of diesel buses on *Expresso Tiradentes*, the detailed results of the analysis are available in Table 2

Table 2. Comparison between Electric Buses and Diesel Buses.

Item (Month)	Electric Buses	Diesel Buses
Vehicle Acquisition	€ 90,250.00	€ 71,250.00
Energy Cost	€ 1,962.54	€ 11,029.77
Maintenance	€ 11,111.89	€ 11,239.13
Total (Month)	€ 103,324.43	€ 93,518.49
Total (Year)	€ 1,239.823.21	€ 1,122,226.71

With the replacement of diesel buses with electric buses, the operation will be € 9,805.54/month more expensive, this value represents an increase of 10.5%. However, there is a reduction in energy costs of 82.2% and maintenance costs of 1.13%. The most important are the social benefits that generate a positive impact on society. This value is amortized by the costs of the negative impacts of diesel vehicle smoke and noise on communities. The results considering articulated buses with a capacity of 170 passengers are in Table 3.

Table 3. Social Benefits of Electric Buses.

	Value Passenger/km	Total
Local Gases	€ 0.012	€ 22,009.89
Climate Change Costs	€ 0.006	€ 11,384.42
Noise Costs	€ 0.005	€ 9,486.85
Total (Month)		€ 42,881.16
Total (Year)		€ 514,573.92

Considering the financial impact of social benefits in reducing negative impacts on communities (€ 42,881.16). There was a value greater than the difference in operating costs between electric buses and diesel buses (€ 9,805,54) The balance of electric bus operations

becomes positive at € 33,075.62/month or € 396,907.43/year. Battery electric buses are not a definitive solution to environmental problems due to the use of batteries that must be discarded at the end of their timespan [4]. On the other hand, electric buses can overcome these disadvantages and be a boost for cleaner transport modes [12].

5. Conclusion

This study compared the replacement of diesel articulated buses with electric buses on the *Expresso Tiradentes* in São Paulo. Even though purchasing electric buses is more expensive than diesel ones, operating costs are lower, and the longer timespan of the vehicles can reduce the impact of this higher acquisition cost. Furthermore, the social benefits generated by the reduction of smoke and noise emissions from buses make the operation of these vehicles more environmentally advantageous compared to diesel buses.

The limitations of this study are that in addition to operational costs, it is interesting to analyze the revenue obtained by the system, which can present relevant data for a financial analysis.

For future studies, the operation of other models of electric vehicles such as trolley-buses, and the use of vehicles with, Motion Charging (IMC) technology on these lines should be analyzed.

Funding: This research was funded by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES). Finance Code 001.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflict of interest.

References

1. Amicci AGN, Fernandes A, Malburg CHR, et al (2018) Guia TPC: orientações para seleção de tecnologias e implementação de projetos de transporte público coletivo
2. Saldiva PHN (2007) Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve): Emissões de Poluentes Atmosféricos por Fontes Móveis e Estimativa dos Efeitos em Saúde na RMSP – cenário atual e projeções. PhD Thesis, USP/Faculdade de Medicina/Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental
3. E-Bus Radar (2023) E-Bus Radar. E-BUS RADAR
4. Rodrigues GS, Reis JGM dos, Orynycz O, et al (2023) A Study on the Viability of Adopting Battery Electric Vehicles in Bus Rapid Transit in Brazil Using the AHP Method. *Energies* 16:4858. <https://doi.org/10.3390/en16134858>
5. Carvalho CH (2011) Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros
6. Rebouças AB, Daniel J (2022) Análise operacional de ônibus elétricos a bateria em São Paulo
7. Enel (2023) Enel Brasil. <https://enel.com.br/content/enel-br/pt-saopaulo.html>. Accessed 12 Dec 2023
8. ANP (2023) Preços de Revenda e de Distribuição de Combustíveis. In: Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. <https://www.gov.br/anp/pt-br/assuntos/precos-e-defesa-da-concorrenca/precos/precos-revenda-e-de-distribuicao-combustiveis/levantamento-de-precos-de-combustiveis>. Accessed 12 Dec 2023
9. SPTrans (2018) Metodologia de remuneração
10. Raymundo H, Reis JGM (2023) How to Measure Performance Evaluation in Urban Passenger Transportation by Disutilities: Model and Application in the Ten Largest US Cities. *J Urban Plann Dev* 149:04023007. <https://doi.org/10.1061/JUPDDM.UPENG-4083>
11. Dallmann T (2019) Benefícios de tecnologias de ônibus em termos de emissões de poluentes do ar e do clima em São Paulo.
12. Nikitas A, Kougiyas I, Alyavina E, Njoya Tchouamou E (2017) How Can Autonomous and Connected Vehicles, Electromobility, BRT, Hyperloop, Shared Use Mobility and Mobility-As-A-Service Shape Transport Futures for the Context of Smart Cities? *Urban Science* 1:36. <https://doi.org/10.3390/urbansci1040036>

4.4 ENERGIES

Foi publicado na revista **Energies** da Editora MDPI, em março de 2024, o trabalho intitulado “**Environmental Impact Reduction of a Trolleybus System in the City of São Paulo, Brazil**”. Nesse artigo analisou o impacto ambiental do sistema de tróibus da cidade de São Paulo focando em corredores de média e alta demanda de transporte.

Figura 17: ENERGIES



Fonte: Autor

Article

Environmental Impact Reduction of a Trolleybus System in the City of São Paulo, Brazil

Gabriel Santos Rodrigues ¹, João Gilberto Mendes dos Reis ¹, Olga Orynych ^{2,*}, Karol Tucki ^{3,*}, Jonas Matijošius ⁴ and Sivanilza Teixeira Machado ⁵

¹ RESUP-Research Group, Postgraduate Program in Production Engineering, Universidade Paulista-UNIP, R. Dr. Bacelar, 1212-4fl, São Paulo 04026-002, Brazil; gabriel.rodrigues119@aluno.unip.br (G.S.R.); joao.reis@docente.unip.br (J.G.M.d.R.)

² Department of Production Management, Faculty of Engineering Management, Bialystok University of Technology, Wiejska Street 45A, 15-351 Bialystok, Poland

³ Department of Production Engineering, Institute of Mechanical Engineering, Warsaw University of Life Sciences, Nowoursynowska Street 164, 02-787 Warsaw, Poland

⁴ Mechanic Science Institute, Vilnius Gediminas Technical University, Plytinės Str. 25, LT-10105 Vilnius, Lithuania; jonas.matijosius@vilniustech.lt

⁵ NAPOLE Research Group, Federal Institute of São Paulo, Av. Mogi das Cruzes 1501, Suzano 08673-010, Brazil; sivanilzamachado@ifsp.edu.br

* Correspondence: o.orynych@pb.edu.pl (O.O.); karol_tucki@sggw.edu.pl (K.T.); Tel.: +48-746-98-40 (O.O.); +48-593-45-78 (K.T.)

Abstract: Several cities worldwide are studying the replacement of their trolleybus systems with diesel buses or battery electric buses, due to their flexibility and lower operational costs. Diesel buses are considered a major cause of gas emissions in cities, while battery electric buses employ cutting-edge technology, but there is still discussion around the topic due to their technology costs, autonomy, and the sustainability of battery packs. In this study, we evaluated the trolleybus system's potential for reducing emissions, noise pollution, and greenhouse gases (GHGs) when compared to diesel buses. Furthermore, we compared the trolleybus system with battery electric buses in terms of cost and environmental benefits. To do so, a case study was conducted in São Paulo, Brazil, the largest city in Latin America, which operates the second-highest trolleybus system on the American continent. Our results show that the trolleybus system is a feasible alternative to diesel buses when considering environmental aspects. It can be seen as a complementary service for urban transport systems in the city's transition to clean energy. Finally, the study implications indicate the need for further investigation of the benefits of in-motion-charge technology to generate flexibility in trolleybus systems, and the involvement of stakeholders in the transition matrix energy process in urban bus systems beyond the direct costs.

Keywords: trolleybus; electric energy; urban transport system; transport analysis; sustainable cities



Citation: Rodrigues, G.S.; Reis, J.G.M.d.; Orynych, O.; Tucki, K.; Matijošius, J.; Machado, S.T. Environmental Impact Reduction of a Trolleybus System in the City of São Paulo, Brazil. *Energies* **2024**, *17*, 1377. <https://doi.org/10.3390/en17061377>

Academic Editors: K. T. Chau and Dimitrios A. Georgakellos

Received: 17 February 2024

Revised: 3 March 2024

Accepted: 9 March 2024

Published: 13 March 2024



Copyright: © 2024 by the authors. Licensee MDPI, Basel, Switzerland. This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).

1. Introduction

Passenger urban transport is essential in enabling people to carry out their daily activities, such as work, education, and leisure [1]. Every day, cities face the challenge of moving their citizens through a complex system of individual and collective modes of transportation while minimizing costs and reducing travel time [2]. At the same time, they strive to maintain and improve transport infrastructure and mitigate noise and air pollution, which can have severe health consequences and make urban life unpleasant for residents [2]. The health damages associated with exposure to air pollution have been estimated to cost the global economy USD 8.1 trillion, equivalent to 6.1 percent of global GDP [3].

Cities worldwide have experienced a shift in their economic landscape, where factories have moved away from rural regions and urban areas have become dominated by service-based industries. This change has resulted in a significant number of people being displaced due to the growth of large-scale businesses in specific locations, which have attracted both workers and consumers. Unfortunately, this approach has often failed to support the development of local businesses, thereby limiting the potential for these areas to thrive.

Around 3000 people die every year as a result of air pollution, and the primary cause of this pollution is transportation [4]. Diesel-fueled vehicles, in particular, are responsible for emitting particles that are more harmful to human health than particles from most other sources of air pollution [3]. As a result, society has been seeking alternative solutions to reduce these emissions by implementing more sustainable energy sources.

In Poland, local governments employ reduced tax rates on means of transportation to encourage hybrid and electric vehicles [5]. The European Union has set an ambitious target to reduce total emissions to 55% for cars and 50% for vans by 2030 because road transport contributes 25% of total annual emissions within the EU [6]. The São Paulo City Hall, Brazil, intends to neutralize greenhouse gas (GHG) emissions by 2050, electrifying the whole bus fleet of the city using battery buses [7]. The country has 107,000 diesel-fueled buses responsible for 85.7% of public transport journeys in cities [8], whereas São Paulo, the most populous one with more than 11 million people, has a bus fleet of 13,309 vehicles [7].

The emission of carbon dioxide (CO₂) in the transportation sector is a significant contributor to greenhouse gas (GHG) emissions caused by human/made activities [9]. One solution to control and mitigate these emissions that has been around for a century to move people sustainably within cities is the trolleybus system. However, these systems are disappearing, and battery electric buses (BEBs) are being considered as a solution for reducing emissions from buses.

With those ideas in mind, this paper is seeking to provide answers to the following research questions.

RQ1—Is the trolleybus efficient enough to be considered as an alternative for the transition energy matrix in public transportation?

RQ2—In comparison to a diesel and battery electric bus, is the trolleybus system feasible?

This paper proposes a case study in the biggest city in Latin America, São Paulo, Brazil. The objective is to compare the trolleybus with diesel buses regarding CO₂, noise, and GHG emissions. Moreover, we compare trolleybus with battery electric buses, considering operational costs and environmental benefits. The city was chosen because it is a metropolis with the second most extensive trolleybus system on the American continent. Moreover, a case study allows us to have available data to compare the feasibility of public transport electrification in detail, based on figures, and to bring accurate data to academic discussion. The results of this research may motivate new studies worldwide with the objective of investigating trolleybus efficiency as an alternative to public transport in cities with these transport systems and discussing whether to maintain those systems in the energy transition matrix.

2. Literature Review

2.1. Trolleybuses

Trolleybuses are electrically powered vehicles connected to an overhead network. The term “trolleybuses” comes from the combination of the English words “trolley” (referring to the wire) and “bus”. These systems can trace their roots back to the *Elekromote*, created by Siemens and Holske in Germany in 1882 [10]. The UK saw its first two trolleybus lines in operation in 1911 [11].

In 1920, trolleybus services expanded to America, to the United States, and considerable acceptance of this type of vehicle occurred within urban transport companies [12]. At the same time, in Eastern Europe, trolleybuses were implemented in several cities [12].

Trolleybus systems had a fast rate of adoption in Europe, and one of the reasons was the conversion of part of the structure used by trams to the new trolleybus system. They are equipped with tires, and provide more flexibility than trams and can be easily maneuvered [13].

The use of trolleybuses increased rapidly between the 1930s and the 1950s. The UK had the largest fleet in Western Europe, with London alone having 1764 vehicles [12]. There were 7280 trolleybuses in the US in 1952, an increase of 329% compared to 1939 [12]. Other countries such as Mexico, Spain, France, Italy, Yugoslavia, Greece, and Sweden also implemented new trolleybus systems during this time [12].

In the latter half of the 20th century, trolleybus systems experienced a decline. Currently, there are trolleybus lines in only approximately 300 cities worldwide (Figure 1), whereas in the past there were over 800 systems (as shown in Figure 1) [14,15]. However, many of these trolleybus lines serve as a complementary mode of transport alongside other forms of transportation.

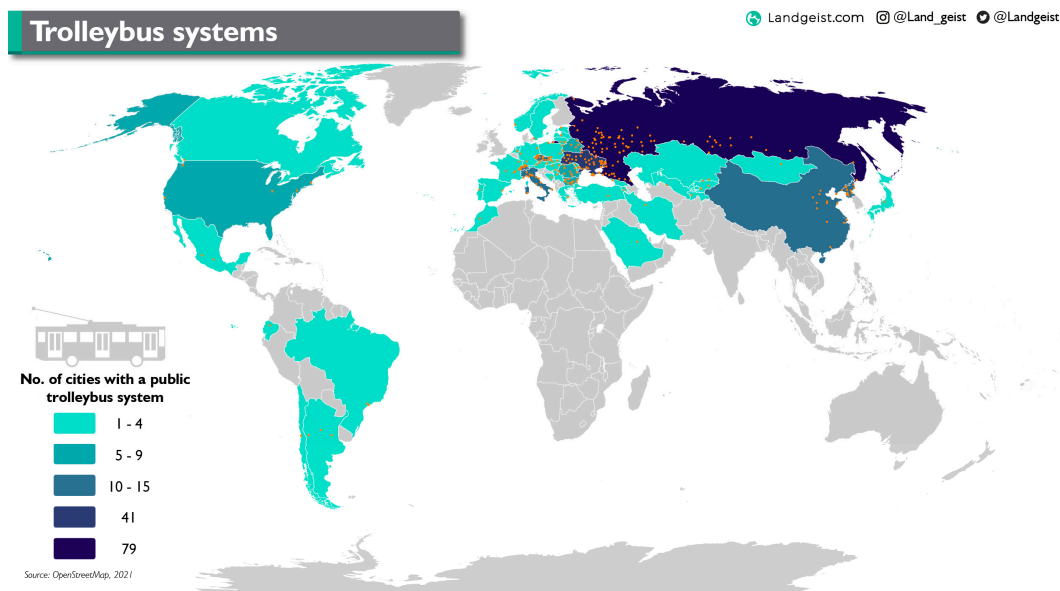


Figure 1. Trolleybus systems worldwide. Source: Ref. [14].

Currently, the majority of trolleybus systems are located in Europe and Asia, with the highest concentration being in the former Soviet states. This is believed to be due to the sanctions imposed by the US and Western Europe during the Cold War [16]. In Latin America, there are currently 1064 trolleybuses in operation, accounting for 21% of the total of 5084 electric buses in circulation in the region as of February 2024 [17].

The trolleybus system in Mexico City is the largest in Latin America, boasting 500 vehicles. São Paulo city follows, with 201 vehicles [17]. Other cities in the region that offer trolleybus services include Córdoba, Rosario, and Valparaíso in Argentina, Quito in Ecuador, Guadalajara in Mexico, and Mérida in Venezuela [17].

Trolleybuses now operate in 150 European cities [18,19]. Pardubice, Lausanne, Landskrona and Salzburg are examples of public transport that are exclusively made up of these vehicles [20]. Trolleybuses benefit from their quiet operation, zero emissions, and strong EU subsidies for green transport. Despite the many advantages of trolleybuses, their previous disadvantages are the mains harnesses and the total dependence of the vehicle on the power source.

Modern electric transport technology makes it possible not to set up another traction network, and traditional trolleybuses can replace duobuses, using the current network and moving outside it as electric buses. Electric buses are very expensive at the moment, and

not every city can afford to change its rolling stock, especially cities which suffered mass liquidations in the 60s and 70s. In the 20th century, it was possible to maintain these lines; cities will continue to develop the existing infrastructure and modernize the rolling stock. It cannot be ruled out that as the manufacturer's technology progresses, the price of the electric bus will become acceptable to individual cities and the trolleybus will "take off" its harnesses, because the idea of electric transport will develop.

Poland is one of the largest bus markets in Europe. According to the PZPM (Polish Automotive Industry Association) report, it is the third largest bus manufacturer in the union. The vast majority (more than 80 percent) of buses produced in Poland are sold on foreign markets (mainly Germany, France, and Scandinavia). EU standards clearly support the development of urban transport with reduced noise and emissions, such as electric buses and trolleybuses [21].

In Poland the two largest producers are Ursus and Solaris. Solaris vehicles drive on the streets of dozens of cities in several countries: Austria, Bulgaria, Czech Republic, Estonia, Germany, Italy, Poland, Portugal, Romania, Spain, Sweden, and Switzerland, as well as Lithuania, Latvia and Hungary. Ursus Ekovolt trolleybuses, like Trollino Solarisa, are not tied by harnesses to electric traction. Modern vehicles also have battery systems, which allow them to move even outside the grid using electric drive. The minimum price of Ursus Ekovolt reaches PLN 1.6 million, almost two times more expensive than a traditional bus.

2.2. In-Motion-Charging Technology

Trolleybus systems are often questioned due to their higher cost compared to diesel buses and the risk of levers escaping from the overhead network, causing traffic disruptions. However, newer models of trolleybuses come equipped with batteries that enable them to travel independently from the network when necessary. These batteries are relatively small and can be easily replaced at the end of their lifespan, unlike the stationary batteries used in battery electric buses (BEBs).

Bartłomiejczyk and Połom [22] point out that trolleybuses are an important solution for reducing the use of fossil fuels in urban public transportation. Trolleybuses use small batteries in comparison to battery electric buses and these batteries enable trolleybuses to operate without an overhead network, making the system more feasible with the help of in-motion-charging (IMC) technology.

IMC technology (Figure 2) is an efficient and interesting solution for electrifying bus systems. It works well with both battery buses and trolleybuses. In trolleybuses, the system charges the batteries while they are connected to the overhead grid. Then, the stored energy is used while traveling where there is no catenary. For every kilometer a trolleybus travels while connected, it can travel another two or three kilometers disconnected from the overhead grid, which reduces the infrastructure costs of trolleybuses. This technology also allows network sharing for rapid recharging of battery buses [23].

According to Grygar et al. [24], trolleybuses that can be charged while in motion are highly recommended for cities already operating this system. Electric buses have more economic, environmental, and social benefits compared to diesel buses. Moreover, they can use renewable energy sources to power up [25].

Also, according to Grygar et al. [24], battery-assisted trolleybuses are expected to be implemented soon. These will combine traditional trolleybuses' advantages with conventional buses' flexibility and mobility. However, this technology has certain limitations, such as battery capacity and ambient temperature.

For instance, the trolleybus network in Tychy, Poland, has been modernized with battery-powered trolleybuses. This upgrade has had several positive effects, including protecting the environment, saving energy, and reducing gas emissions [16]. Furthermore, it has made the trolleybus system more flexible and accessible to other areas of the city [16].

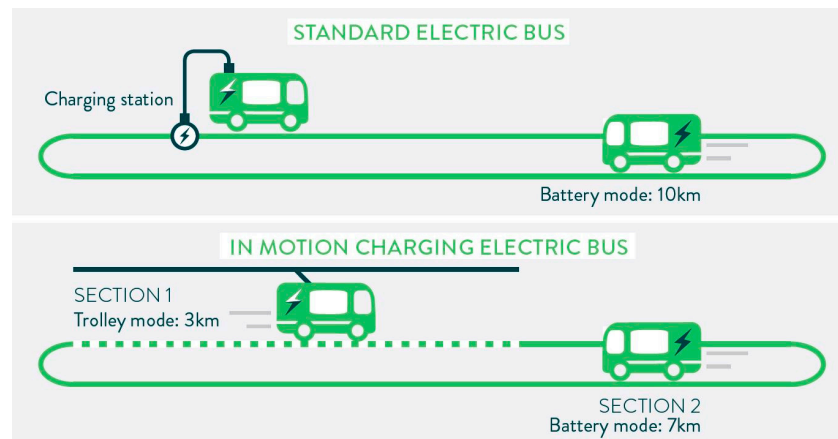


Figure 2. In-motion-charging (IMC) technology. Source: Ref. [23].

2.3. Electric Bus Service in Passenger Transport

Electromobility has been seen as a solution to mitigate gas emissions and environmental pollution. Countries worldwide set targets to change gasoline vehicles in favor of electric ones. However, the increased demand for electricity to power electric vehicles and other electronic devices is a bottleneck in this direction.

The transportation sector, particularly buses, is changing due to the increasing pressure from governments worldwide to adopt more eco-friendly energy sources. However, the bus sector's biggest challenge is the lack of proper infrastructure to support the recharging of these energy sources.

Numerous studies have explored the potential of implementing a matrix transformation system in the bus industry. Kaptasila et al. [26] analyzed the operational performance of battery-electric, hybrid, and diesel buses in Portland, OR, USA. They found that electric buses are faster than diesel buses, but they recommend deploying them on routes where ramp use is historically infrequent.

Shifting towards alternative energy sources in urban bus systems is crucial to reducing carbon footprints [27,28]. Moreover, Tong and Ng (24) suggest that battery electric buses are replacing traditional diesel buses in urban public transport services. They also note that over 30% of daily passenger trips in Hong Kong are made using battery electric buses.

Ribeiro et al. [29] affirm that BEBs are an essential tool for cities to reduce carbon emissions in the transport sector. They are also more cost-effective than diesel buses. However, it is important to note that the energy used to charge BEBs' batteries must come from renewable sources to ensure their environmental benefits. Using fossil fuel energy would offset the positive impact of BEBs.

In this sense, trolleybus services can help lessen the impact of transitioning to battery electric buses (BEBs), due to their usage of an overhead network. Because they require fewer batteries, they can be a viable option for mitigating the effects of changing the energy matrix in public transport by bus.

3. Materials and Methods

São Paulo is the main city of Brazil located in São Paulo state (a province in the southeast region of the country), and it was established in 1554 by the Jesuits [30]. During the XX century it became the most important financial and economic center of Brazil, where nowadays more than 11 million people live [30,31]. Located between latitude and longitude $47^{\circ}0' \text{ W}$ to $46^{\circ}20' \text{ W}$ and $23^{\circ}15' \text{ S}$ to $23^{\circ}60' \text{ S}$, respectively, and covering an area of 5025 km, the city has a diverse and robust economy that includes finance, commerce, services, and manufacturing industries [32].

Transportation has always been a major concern for administrators and politicians throughout its development. As the city grew, so did the need for its population to move around. In this regard, trolleybus systems were considered a solution based on foreign experiences.

In this study, we used Carvalho's methodology to estimate the CO₂ emissions that would have been produced if trolleybus services had not been adopted in the city [33].

$$E_{km} (bus) = E_{es} / E_f \quad (1)$$

where

$E_{km} (bus)$ = emissions of CO₂ (kg)/km by the bus service.

E_{es} = emissions of the energy source in CO₂ (kg)/L.

E_f = energy efficiency in km/L.

Considering the values of E_{es} 3.2 CO₂ (kg)/L and E_f 2.5 obtained by Carvalho [33], it is possible to establish $E_{km} (bus)$, Equation (2):

$$E_{km} (bus) = 3.2 / 2.5 = 1.28 \text{ CO}_2 \text{ kg/km} \quad (2)$$

To establish the distance traveled by the São Paulo trolleybus fleet per month, we obtained the respective itinerary and distances from São Paulo Transporte S/A, the City Hall company that manages the bus system in São Paulo city (Table 1).

Table 1. São Paulo Trolleybus Lines.

Line Number	Destination	Distance (km)	Workdays	Travel Fleet Saturdays	Sundays	Total (km/Month)
2002/10	Circular	7.12	126	108	97	25.575
2100/10	Praça da Sé Vila Carrão	15.27	178	86	-	65.050
		15.59	168	86	-	62.984
2100/21	Pq. D. Pedro II Vila Carrão	15.69	-	-	86	5.397
		14.64	-	-	86	5.036
2290/10	Pq. D. Pedro II São Mateus	25.87	208	120	89	140.008
		21.33	200	114	81	110.489
2290/21	Pq. D. Pedro II	20.81	8	-	-	3.663
3160/10	Pq. D. Pedro II Vila Prudente	8.70	149	96	48	33.530
		7.96	141	94	47	29.181
342M/10	Penha São Mateus	16.07	204	150	89	87.485
		16.10	204	143	84	86.876
4112/10	Circular	12.92	70	-	-	19.897
4113/10	Circular	20.85	170	123	85	95.326
408A/10	Cardoso de Almeida Machado de Assis	11.33	78	37	39	22.887
		9.11	78	37	39	18.402
Total (km/month)						811.786

There are a total of 10 trolleybus lines currently operating, consisting of eight baselines and two services. The term "services" refers to variations of the main lines that operate on specific schedules. Table 1 provides a comprehensive summary of these trolleybus lines that operate for a month, including 22 working days, 4 Saturdays, and 4 Sundays.

In this way, we adopted Equation (3) to determine Emissions.

$$E_{mta} = F_m \times E_{km} (bus) \quad (3)$$

where

E_{mta} = emissions of CO₂ avoided by the trolleybus, in kg.

F_m = the fleet mileage in km.

$E_{km} (bus)$ = emissions of CO₂ (kg)/km bus service.

Emissions of CO₂ that were not emitted were converted into carbon credits to establish a monetary value that allows us to quantify the gains of the system. To do so, we adopted Equation (4).

$$CC = VCC \times (Emta/1000) \quad (4)$$

where

CC = carbon credits in EUR.

VCC = value of carbon credits in EUR per ton.

Emat = emissions of CO₂ avoided by the trolleybus in kg.

We have calculated the negative impact on communities from the local and greenhouse gas (GHG) emissions. The negative impact on communities is a disadvantage caused by transport systems. It refers to the need for infrastructure and the environmental impacts caused by transport systems [1,2].

We obtained the estimated values of local gases and GHG emissions according to Tables 2 and 3 and Equations (5) and (6) [2].

$$LGC = MAPm \times Dist \times Pas \quad (5)$$

where

LGC = Local gases cost.

Dist = Distance of the displacement in kilometers per month.

Pas = Number of passengers transported per month.

$$GHGC = MCCm \times Dist \times Pas \quad (6)$$

where

GHGC = Greenhouse gases cost.

Dist = Distance of the displacement in kilometers per month.

Pas = Number of passengers transported per month.

Table 2. Marginal air pollution costs for metropolitan area (urban roads) in EUR per passenger × kilometer (MAPm).

Mode of Transportation	Fuel Type	Size (Engine Cubic Capacity or Vehicle Dimension)	Emission Class	Value (EUR/Pass × km)
Bus (Ordinary Bus)	Diesel	15 to 18 tonnes	EURO V	0.0116
Bus (Coach)	Diesel	>18 tonnes	EURO V	0.0135

Source: Data from [2].

Table 3. Marginal climate change costs for urban roads in EUR per passenger × kilometer (MCCm).

Mode of Transportation	Fuel Type	Size (Engine Cubic Capacity or Vehicle Dimension)	Emission Class	Value (EUR/Pass × km)
Bus (Ordinary Bus)	Diesel	15 to 18 tonnes	EURO V	0.0060
Bus (Coach)	Diesel	>18 tonnes	EURO V	0.0061

Source: Data from [2].

We considered the values of “ordinary bus” vehicles, which are urban buses with EURO V technology in an urban area. There are two models of trolleybus in operation, the first measuring 12.5 m (100 vehicles), with capacity for 80 passengers, and the second measuring 15 m (101 vehicles), with capacity for 93 passengers. They can operate by merging into some lines, or even eventually replacing diesel vehicles, so it was agreed to use the 12.5 m trolleybus model for this study.

After establishing the environmental impact costs, we compared the operation of São Paulo trolleybus systems with conventional diesel engine vehicles and battery electric buses.

4. Results

The trolleybus network in São Paulo spans over 168.42 km and is supported by 22 Rectifying Transformer Stations (ETRs) [34,35]. The system is responsible for transporting 8 million passengers per month [34,35]. As of 15 September 2023, there were 220 electric buses in operation in São Paulo, out of which 201 were trolleybuses and the remaining 19 were battery-powered [34,35].

Upon converting the emissions avoided in CO₂ by the 201 trolleybuses in São Paulo city into carbon credits, Tables 4 and 5 display the corresponding values [36].

Table 4. CO₂ not emitted by Trolleybus System in São Paulo city.

Variable	Fleet Mileage per Month in km (Fm)	Emissions of CO ₂ (kg)/km for Bus Service (Ekm (bus))	Total (kg of CO ₂)
Emissions of CO ₂ avoided by trolleybus in kg (Emat)	811,786	1.28	1,039,086.08

Table 5. Carbon Credit equivalent CO₂ not emitted by Trolleybus System in São Paulo city.

Variable	Value of Carbon Credits in EUR per Ton (VCC) ¹	Emissions of CO ₂ Are Avoided by Trolleybus in Ton. (Emta/1000)	Total EUR
Carbon Credits (CC)	64.02	1039.087	66,522.29

¹ Carbon credit was EUR 64.02 per ton on 30/01/2024 [36].

According to the findings, the trolleybus operation in the city of São Paulo prevents the release of 1,039,087 kg of CO₂ into the atmosphere every month. This figure translates to a monthly carbon credit of EUR 66,522.29 for the city, as per Equation (4).

In 2022, the trolleybus network had energy availability 99.9% of the time and underwent 3317 interventions, of which only 194 were emergency. This proves the reliability of the São Paulo trolleybus system [34].

Regarding negative impacts on communities, Table 6 presents the values calculated for local gases and GHGs.

Table 6. Negative Impacts on Communities.

Variable	EUR Pass./km	Passengers (Month)	Distance (Month)	Factor Passenger per km	Total (EUR per Month)
Local Gases Cost (LGC)	0.0116	8,000,000	811.786	9.85	92,754.67
Greenhouse Gases (GHG)	0.006	8,000,000	811.786	9.85	47,976.55
Total (EUR per Month)					140,731.22

The values for local gases and GHGs not emitted by the trolleybus correspond to EUR 140,731.22 per month or EUR 1,688,774.64 per year.

The benefits of reduction in emissions in consideration of the costs of maintenance of the trolleybus system can be seen in Table 7 [37].

Table 7. Operational Cost of Trolleybus in the city of São Paulo based on no gas emissions.

Variable	Operational Cost (EUR/km)	Overhead Network Maintenance (Month)	Distance (Month)	Carbon Credits (CC)	Negative Impact on Communities	Total (EUR per Month)
Trolleybus System Cost	0.35 ¹	286,516.85 ¹	811.786			570,641.95
Benefits of no Emissions				66,522.29	140,731.22	207,253.51
Total Cost						363,388.44

¹ Data from [37].

Our results indicated that 36.31% of operational costs can be paid by no emissions generated by the trolleybus operation. It is important to note that our analysis did not account for other factors, such as noise pollution and the emission of NO_x, which is the primary pollutant released by diesel engines. Additionally, we need to consider the health costs associated with diesel engine operation.

In comparison, as a battery electric bus, the trolleybus could be disadvantageous to São Paulo city (Table 8) [37,38].

Table 8. Operational Cost of Battery Electric Bus in the city of São Paulo based on no gas emissions.

Variable	Operational Cost (EUR/km)	Overhead Network Maintenance (Month)	Distance (Month)	Carbon Credits (CC)	Negative Impact on Communities	Total (EUR per Month)
Trolleybus System Cost	0.35 ¹	286,516.85 ¹	811.786	−66,522.29	−140,731.22	363,388.44
Battery Bus Cost	0.55 ²	-	811.786	−66,522.29	−140,731.22	239,228.69
Total Cost						98,497.47

¹ Data from [37]. ² Data from [38].

It is essential to take into account the cost of battery disposal and shorter lifespan when considering trolleybuses versus battery buses. A trolleybus can be operated for 30 years or more, similar to subway lines, while a battery bus can only be operated for 15 years and requires battery pack replacements halfway through its lifespan [39,40]. Therefore, it is crucial to analyze these factors before making a final decision.

5. Discussion

The trolleybus development in São Paulo city remains in the decade of 1920, when the city of São Paulo had a population of 579 thousand inhabitants. At that time, the first studies for the implementation of “electrobuses” commenced [41,42]. However, only in 1939, São Paulo City Hall concluded the feasibility of implementing trolleybus systems to replace old trams operating since 1899 [41].

Unfortunately, the project was interrupted during World War II and resumed in 1946 when São Paulo City Hall began studies for the establishment of the Municipal Public Transport Company (CMTA) that would inherit the tram system from the Light company, which decided to abandon its transport operation in Brazil [41]. Light was an Anglo-Canadian company that had controlled transport systems in São Paulo since 1899 [43].

On 22 April 1949, the first line of trolleybuses was inaugurated with used vehicles acquired from an English Company BUT, connecting João Mendes Square—in the city center—to General Polidoro Square, in the neighborhood of Aclimação (Figure 3).

The trolleybus implementation in São Paulo was a rather late process, and, in some ways, the world was discussing the system’s feasibility at that time. The UK, for instance, implemented the first line in 1911, and in 1939, 35 trolleybus systems were in operation on the isle, involving 3429 vehicles. However, in 1954 London announced its plan to replace all its trolleybuses with diesel buses—just five years after São Paulo’s first line—and this was completed in 1962. Due to London’s decision, the last system in the UK, in Bradford, was closed in 1972. The reasons for the trolleybus decline in the UK were a mixture of operational inflexibility and cost. Despite the discontinued trolleybus, they still outperformed the diesel buses in quiet, vibration-free operation, high performance and overload capacity, long life, and low maintenance requirements. They offered the advantages of no local pollution, due to the use of clean energy [11].

At the time, trolleybuses were seen as a significant improvement over the existing tram system. The city’s transport planning was still in its early stages, and there was no integrated vision of the transport network that would have ensured that different modes of transport complemented each other [42]. As a result, model changes were made without proper consideration, with people naturally assuming that the trolleybus system was a natural evolution of the transport modes [42].



Figure 3. English Trolleybus BUT, João Mendes Square, in 1949. Source: Ref. [44].

In 1958, Brazil manufactured its first national trolleybus, leading to the expansion of the trolleybus network [42]. By 1960 the system had 15 lines, and the fleet had grown to 156 units [42]. However, due to difficulties incorporating this technology into the existing system, trolleybuses often operated alongside small-capacity diesel buses or on roads without special treatment [38].

In 1963 a study conducted by CMTC discovered that running trolleybuses was more cost-effective than using diesel buses or trams [10]. However, diesel vehicles continued to dominate the fleet as trolleybuses were still considered expensive due to low demand for this type of vehicle [10,34,45].

The oil crisis in the 1970s impacted the source of fossil fuels and led to a growing concern for environmental issues in society. As a result, a study plan for a Trolleybus Transport System (SISTRAN) was developed for São Paulo in 1976. The plan aimed to create a system with medium transport capacity that would prioritize trolleybuses in exclusive corridors. The pilot project was constructed on Avenida Paes de Barros in 1980 (as shown in Figure 4) [10,46].



Figure 4. Paes de Barros Avenue Corridor in 1985. Source: Ref. [47].

In 1993, the São Paulo City Hall privatized CMTC, and private companies took over the operation of the trolleybuses. The companies were expected to refurbish the existing vehicles and expand the fleet. By 1998 the system had reached its peak, with a network spanning 264.75 km, 31 lines, and a fleet comprising 552 vehicles [42,48].

Starting from 2001, efforts to reduce the trolleybus network in São Paulo, Brazil, intensified. The rationale behind this decision was that the costs of operating trolleybuses were high, and the system lacked flexibility due to the overhead network [7]. As a result, the trolleybus transport system gradually lost its significance.

However, the trolleybus fleet was revived between 2007 and 2014 when it was renewed and expanded to 201 vehicles [35]. Despite this, in 2023, the mayor of São Paulo city expressed the desire to deactivate the trolleybus network and switch to battery buses, due to high operational costs [49].

Brazil is formed of 27 states, with São Paulo being the most populous and important one, accounting for 20% of the country's population [31]. The city of São Paulo serves as the state capital.

In order to discuss the emissions figures for the city, it is important first to present the data for the state as a whole (Figure 5). Afterward, we can calculate the percentage of emissions specific to the city of São Paulo (Figure 6).

In 2022, nitrogen oxide (NO_x) was the main gas emitted by diesel buses, with 14,644 thousand tons per year, followed by GHG with 3192 thousand tons per year and carbon monoxide (CO) 2865 thousand tons per year.

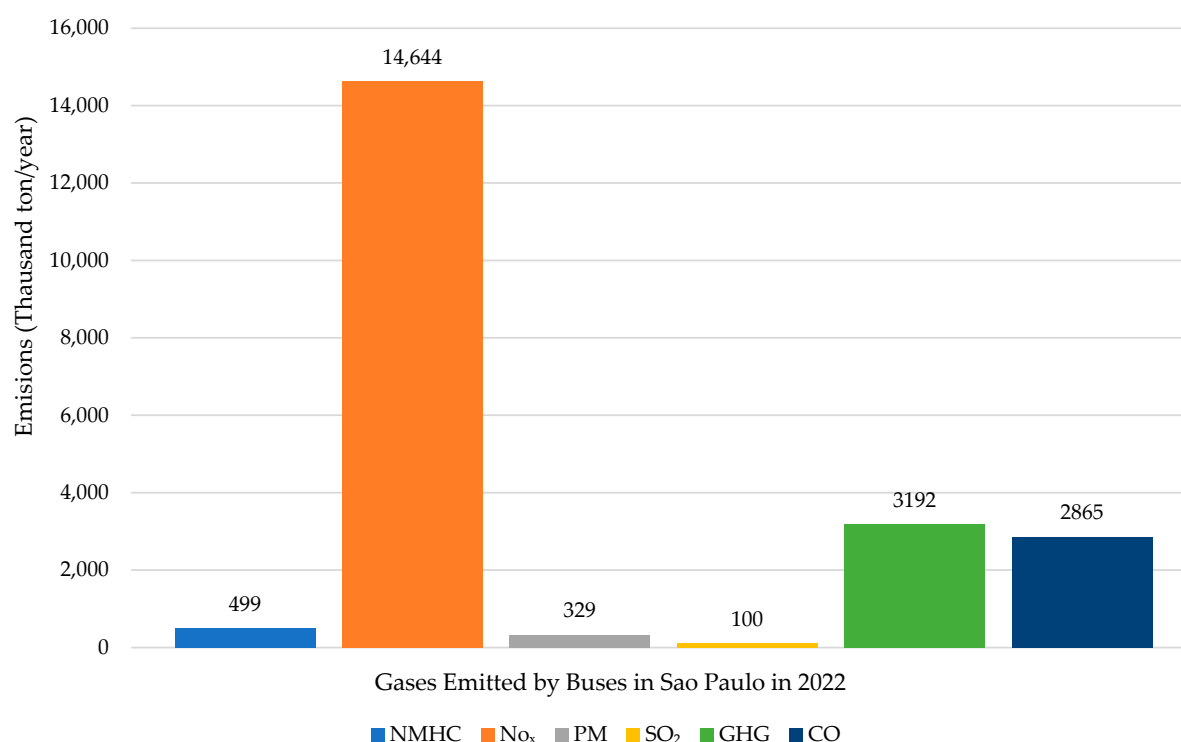


Figure 5. Emission of nocive gases in the atmosphere by São Paulo state bus fleet in 2022. Source: authors using data from CETESB [50]. CO = carbon monoxide; NMHC = nonmethane hydrocarbon; NO_x = nitrogen oxides; PM = particulate matter; SO₂ = sulfur dioxide; GHG = greenhouse gases.

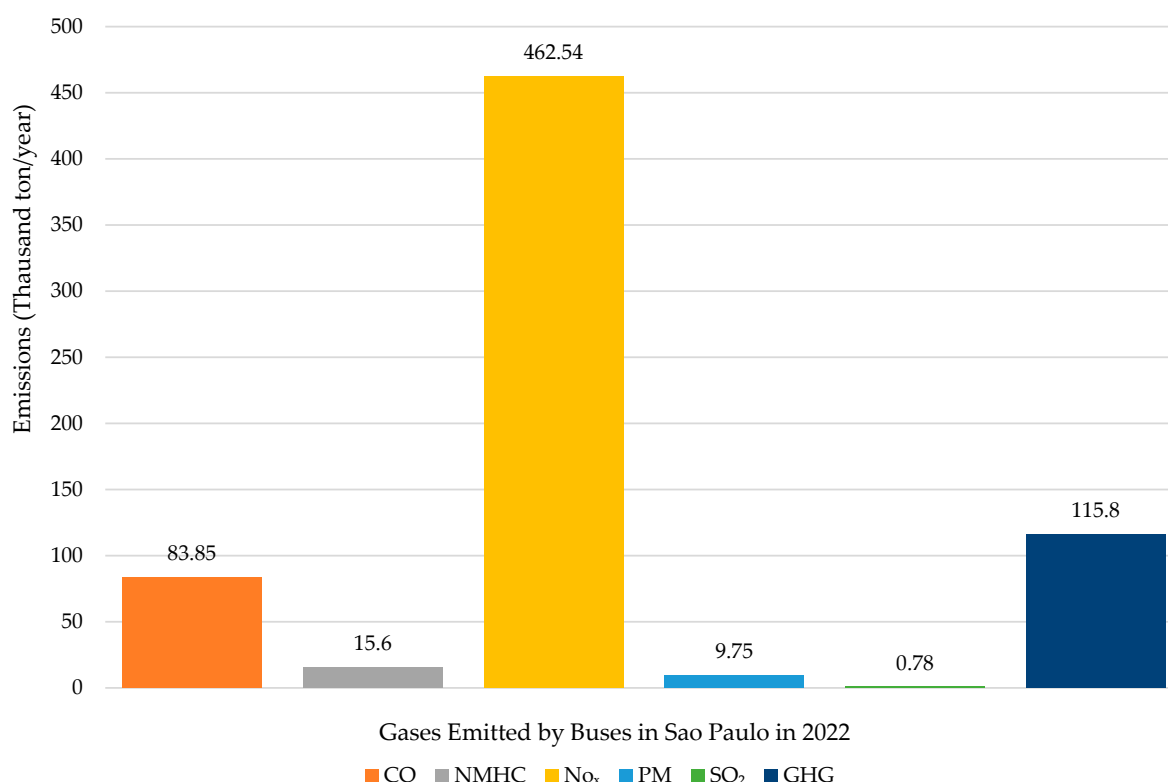


Figure 6. Emission of nocive gases in the atmosphere by São Paulo city bus fleet in 2022 estimated based on fleet proportion. CO = Carbon monoxide; NMHC = Nonmethane Hydrocarbon; NO_x = Nitrogen oxides; PM = Particulate Matter; SO₂ = Sulfur Dioxide; GHG = greenhouse gases.

NO_x occurs when nitrogen reacts with oxygen in a high temperature in the combustion chamber. NO_x participates in the formation of photochemical “smog”, whose main pollutant is ozone. It also contributes to the formation of acid rain and particulates [42]. CO is a gas resulting from incomplete fuel burning and, when inhaled, reduces the blood’s ability to transport oxygen [51]. And the burning of fuels such as coal, natural gas, and petroleum derivatives emits carbon dioxide (CO₂) [52].

A rough estimate of emissions for São Paulo city could be made by considering the fleet size. As the city has 39% of the urban bus fleet of the São Paulo state, we estimated that the same equivalence could be made for emissions. Despite the limitations, this approach allows us to have an idea regarding the emissions provoked by diesel vehicles and validate the reduction in emissions caused by trolleybus systems in the city.

The fact is that the trolleybuses have been running in about 300 cities across the globe for the past 130 years and trolleybus can operate by complementing other modes while new developments such as in-motion charging have been introduced in a range of cities to help the trolleybus fleets to advance [53].

The trolleybus is an important source of sustainable transport for cities and should be improved instead of deactivated for diesel or battery-buses. This solution is much more profitable for the public transport authorities than introducing electric buses which are powered by large, high-capacity batteries with limited life expectancy [22]. This can thus generate significant operating costs in the future (e.g., onboard battery replacement) and affect the performance of the public transport system [22].

IMC trolleybuses present a promising solution for increasing the percentage of electric public transport in cities that already have catenary infrastructure [54]. In the specific case of São Paulo, there is a local company that provides the technology and currently manages the

trolleybus fleet in the city [40], reducing the costs of implementation. However, it ultimately depends on the City Hall's willingness to fund part of the necessary infrastructure.

Our findings regarding the feasibility of the trolleybus in São Paulo can be reinforced by the work of Kliucininkas and Matulevicius [55], who carried out a comparative analysis of costs related to emissions from urban buses and trolleybuses in Lithuania. They conclude that replacement of the bus by the trolleybus will decrease GHG emissions by 389.69 g CO₂/km in 2009 and 287.09 g CO₂/km in 2010; at the same time, replacement will save 0.042 EUR/km and 0.039 EUR/km for each respective year. Połom and Wiśniewski [56] comparing diesel buses and trolleybuses in Gdynia and Sopot, Poland, found that trolleybuses in public transport contribute to a reduction in the damage costs of the emission of pollutants that amount to approximately EUR (€) 30,000–60,000 per year for the analyzed lines.

According to Borowik and Cywiński [57], trolleybuses may be an eco-efficient solution for public urban transport, and they stress the fact that public transport based on trolleybus networks provides new opportunities for sustainable development of cities. The authors describe the effects resulting from the modernization of an existing trolleybus transport system in Tychy, Poland, using IMC technology, and highlight the impact of modernization in creating a more sustainable transport system for city based on UN Agenda 2030 concepts.

São Paulo certainly can benefit from those ideas to carry on with its trolleybus system instead of deactivating, it as proposed by City Hall [58].

6. Final Remarks

6.1. Conclusions

This study examines the trolleybus system in São Paulo, Brazil, with regard to its potential for reducing emissions and its feasibility for use by the population. Currently, the São Paulo City Hall is considering more sustainable transportation options, including the use of battery-powered buses with zero gas emissions for its fleet of over 10,000 buses. The trolleybus system, which has been in use for 74 years, could be a strategic addition to the city's transportation network, particularly when combined with battery-powered buses.

Insofar as we move towards more sustainable modes of transport, battery-powered buses have emerged as a potential solution. However, implementing this technology presents some significant challenges. One such challenge is the disposal of the batteries, which leads to pollution. Additionally, providing sufficient energy to power these buses is difficult, given the current energy generation capacity of the city. To address these challenges, we need significant investments. However, the state does not own the energy company, which makes it challenging to implement sustainable and cost-effective urban transport systems in the short term. Furthermore, energy costs applied to companies operating urban transport systems may make this solution unsustainable in the future.

Our results show that trolleybuses are a reliable and cost-effective solution for reducing environmental emissions. In addition, trolleybuses can complement other systems for a comprehensive and sustainable approach to transportation in cities.

In-motion-charging (IMC) technology can help solve the problem of limited overhead networks, making it possible to extend trolleybus access to more areas of the city. In addition, this technology can be shared with battery electric buses, enabling their batteries to be recharged while in operation. This reduces the amount of time the bus is unavailable for recharging and makes its operation more efficient. Some cities worldwide have been benefiting from this implementation.

This study has certain limitations, as it did not have access to all emission costs of an operational diesel-bus line, which is necessary to calculate all the environmental effects and evaluate all the advantages of a trolleybus system operation. Therefore, more studies will be required to have a comprehensive understanding of how cities can be made more sustainable based on their transportation systems. However, this study is a significant first step toward achieving this goal.

6.2. Implications

Based on our research findings, we propose some directions for analyzing the implications of the bus energy-matrix change in urban transport. It is important to note that while comparing alternatives, immediate costs such as vehicle acquisition, infrastructure maintenance, autonomy, and flexibility should not be the only factors considered. A comprehensive view that takes into account the vehicle's lifetime, energy production capabilities, and externalities for society, such as air pollution, excess of transport infrastructure, and soil contamination, is necessary.

Rodrigues et al. [39] conducted a study comparing battery electric buses with diesel vehicles in a bus rapid-transit system. They used the analytical hierarchy process to analyze the data and found interesting results regarding the advantages of electric bus adoption. This study confirms the assumptions found in our study regarding the need for a comprehensive analysis that help to highlights the need for new methodologies that can guide policymakers towards an efficient transition to a sustainable energy matrix in urban bus transport.

Secondly, an energy transition from fossil fuels to electric energy requires the development of infrastructure to support electric vehicles. Currently, there is a shortage of equipment and energy supply to recharge the electric fleet. Our research suggests that the trolleybus system can be optimized in cities where it is already operating and can be used as a complementary system to create a sustainable transport system.

In this direction, a study conducted by Bartłomiejczyk and Połom [22] explored the use of the catenary by trolleybuses with auxiliary power sources in Gdynia, Poland. The study found that introducing trolleybuses with onboard batteries can expand the zero-emission transport network in places with limited power supply capabilities. Therefore, it is necessary to investigate the transformation of trolleybus systems running with IMC technology adoption as a complementary sustainable transport system.

Last but not least, it is crucial to engage all stakeholders, including policymakers, governments, communities, users, and investors, in the energy transformation matrix for bus transportation. This is because transport infrastructure is expensive and requires a clear set of rules to ensure its success and attract investors. Despite the fact that the initial costs of implementing this solution may be high, its benefits, in the long run, will more than make up for it. Nevertheless, this requires a concerted effort and further research to determine the best course of action. While the trolleybus solution is a viable option, it is important to explore other alternatives as well.

Sellitto et al. [59] proposed a tool for the assessment of the environmental performance of bus transit operators. The tool was tested in six bus transit operations of a Latin America city of about 1,500,000 inhabitants. They concluded that the more problematic criterion was atmosphere; hence, an improvement strategy should focus on it. The comprehensive methodology allows us to infer that a solution for a sustainable transport in cities requires the participation of all the stakeholders to mitigate the issue, who should corroborate regarding the necessity to develop more studies and methodologies involving different actors in the solution to the problem.

Author Contributions: Conceptualization, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; methodology, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; software, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; validation, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; formal analysis, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M. investigation, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; resources, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; data curation, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; writing—original draft preparation, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; writing—review and editing, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; visualization, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; supervision, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; project administration, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M.; funding acquisition, G.S.R., J.G.M.d.R., O.O., K.T., S.T.M. and J.M. All authors have read and agreed to the published version of the manuscript.

Funding: The research was carried out with the financial support obtained from the research subsidy of the Faculty of Engineering Management (WIZ) of Bialystok University of Technology, grant No. WZ/WIZ-INZ/4/2022 (Olga Orynycz). This study was financed in part by the Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior—Brasil (CAPES)—Finance Code 001 (Scholarship for author Gabriel Santos Rodrigues).

Data Availability Statement: Data will be available on request to the corresponding author. The data are not publicly available due to confidentiality of information.

Conflicts of Interest: The authors declare no conflicts of interest.

References

1. Raymundo, H.; dos Reis, J.G.M. Measures for Passenger-Transport Performance Evaluation in Urban Areas. *J. Urban Plan. Dev.* **2018**, *144*, 04018023. [CrossRef]
2. Raymundo, H.; dos Reis, J.G.M. How to Measure Performance Evaluation in Urban Passenger Transportation by Disutilities: Model and Application in the Ten Largest US Cities. *J. Urban Plann. Dev.* **2023**, *149*, 04023007. [CrossRef]
3. Jereb, B.; Stopka, O.; Skrúčaný, T. Methodology for Estimating the Effect of Traffic Flow Management on Fuel Consumption and CO₂ Production: A Case Study of Celje, Slovenia. *Energies* **2021**, *14*, 1673. [CrossRef]
4. Saldiva, P.H.N. Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve): Emissões de Poluentes Atmosféricos Por Fontes Móveis e Estimativa Dos Efeitos Em Saúde Na RMSP—Cenário Atual e Projeções. Ph.D. Thesis, University of São Paulo (USP)/Faculdade de Medicina/Laboratório de Poluição Atmosférica Experimental, São Paulo, Brazil, 2007.
5. Witkowski, J.; Kusio, T.; Fiore, M.; Olesiński, Z. Taxation Preferences and the Uptake of Hybrid and Electric Vehicles in Poland's Ten Largest Cities: A Case Study. *Sustainability* **2024**, *16*, 1221. [CrossRef]
6. Jaroń, A.; Borucka, A.; Deliś, P.; Sekrecka, A. An Assessment of the Possibility of Using Unmanned Aerial Vehicles to Identify and Map Air Pollution from Infrastructure Emissions. *Energies* **2024**, *17*, 577. [CrossRef]
7. Bazani, A. Available online: <https://diariodotransporte.com.br/2023/04/21/trolebus-74-anos-um-meio-de-transporte-que-e-viavel-para-os-dias-de-hoje-e-para-o-futuro/> (accessed on 22 September 2023).
8. NTU. *NTU 30 Anos*; Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos: Brasília, Brazil, 2017; ISBN 978-85-69544-03-6.
9. Ma, Z.; Jørgensen, B.N.; Ma, Z. A Scoping Review of Energy-Efficient Driving Behaviors and Applied State-of-the-Art AI Methods. *Energies* **2024**, *17*, 500. [CrossRef]
10. Ferreira, E.R. Trólebus, Espaço e Sociedade. Ph.D. Thesis, Universidade de São Paulo, São Carlos, Brazil, 1995.
11. Brunton, L. The Trolleybus Story. *IEE Rev.* **1992**, *38*, 57–61. [CrossRef]
12. Macedo, J.E.J. Estudo de Linha de Trólebus em Natal. Ph.D. Thesis, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brazil, 2017.
13. Grigorieva, O.; Nikulshin, A. Trolleybuses and Trams in the Urban Public Transport Network of Russian Regions: Problems and Prospects. *E3S Web Conf.* **2023**, *371*, 04019. [CrossRef]
14. Landgeist. Available online: <https://landgeist.com/2021/07/04/trolleybus-systems/> (accessed on 1 February 2024).
15. UITP. How in Motion Charging Trolleybuses are Advancing Our Cities: Explore the Knowledge Brief. Available online: <https://www.uitp.org/news/trolleybus-in-motion-charging-knowledge-brief/> (accessed on 1 February 2024).
16. Borowik, L.; Cywiński, A. Modernization of a Trolleybus Line System in Tychy as an Example of Eco-Efficient Initiative towards a Sustainable Transport System. *J. Clean. Prod.* **2016**, *117*, 188–198. [CrossRef]
17. E-Bus Radar. Available online: <https://www.ebusradar.org> (accessed on 1 February 2024).
18. Rasiński, T. Trolleybus communication as one of the alternatives to modern public transport. *Autobusy* **2018**, *19*, 213–216. [CrossRef]
19. Bartłomiejczyk, M.; Goliszek, S.; Połom, M. Innovative solutions as the chance of transportation systems development on the example of the trolleybus transport in Gdynia and Lublin. *Acta Sci. Pol. Adm. Locorum* **2016**, *15*, 7–25.
20. Trolleybuses in Europe. Available online: <https://psmkms.krakow.pl/trolejbusy/trolejbusy-w-europie> (accessed on 29 January 2024).
21. Will Ursus' Electric Buses Go to Mexico? Available online: <https://www.money.pl/gielda/wiadomosci/artykul/elektryczne-autobusy-ursusa-pojada-do,66,0,1909570.html> (accessed on 29 January 2024).
22. Bartłomiejczyk, M.; Połom, M. Sustainable Use of the Catenary by Trolleybuses with Auxiliary Power Sources on the Example of Gdynia. *Infrastructures* **2021**, *6*, 61. [CrossRef]
23. Gunter, M.; Erik, L.; Mikolaj, B.; Wolfgang, B.; Sergei, K. In *Motion Charging Innovative Trolleybus*; UITP: Brussels, Belgium, 2019.
24. Grygar, D.; Koháni, M.; Štefún, R.; Drgoňa, P. Analysis of Limiting Factors of Battery Assisted Trolleybuses. *Transp. Res. Procedia* **2019**, *40*, 229–235. [CrossRef]
25. Wołek, M.; Wolański, M.; Bartłomiejczyk, M.; Wyszomirski, O.; Grzelec, K.; Hebel, K. Ensuring Sustainable Development of Urban Public Transport: A Case Study of the Trolleybus System in Gdynia and Sopot (Poland). *J. Clean. Prod.* **2021**, *279*, 123807. [CrossRef]

26. Kapatsila, B.; Grisé, E.; Crumley, M.; El-Geneidy, A. Empirical Analysis of Battery-Electric Bus Transit Operations in Portland, OR, USA. *Transp. Res. Part D Transp. Environ.* **2024**, *128*, 104120. [CrossRef]
27. Zhang, W.; Liu, J.; Wang, K.; Wang, L. Routing and Charging Optimization for Electric Bus Operations. *Transp. Res. Part E Logist. Transp. Rev.* **2024**, *181*, 103372. [CrossRef]
28. Tong, H.Y.; Ng, K.W. Developing Electric Bus Driving Cycles with Significant Road Gradient Changes: A Case Study in Hong Kong. *Sustain. Cities Soc.* **2023**, *98*, 104819. [CrossRef]
29. Ribeiro, P.J.G.; Dias, G.; Mendes, J.F.G. Public Transport Decarbonization: An Exploratory Approach to Bus Electrification. *World Electr. Veh. J.* **2024**, *15*, 81. [CrossRef]
30. Britannica São Paulo. Available online: <https://www.britannica.com/place/Sao-Paulo-Brazil> (accessed on 29 January 2024).
31. IBGE. Available online: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/sp/sao-paulo/panorama> (accessed on 29 January 2024).
32. Venkatraman, S.; Kandasamy, V.; Rajalakshmi, J.; Sabarunisha Begum, S.; Sujatha, M. Assessment of Urban Heat Island Using Remote Sensing and Geospatial Application: A Case Study in Sao Paulo City, Brazil, South America. *J. S. Am. Earth Sci.* **2024**, *134*, 104763. [CrossRef]
33. Carvalho, C.H. *Emissões Relativas de Poluentes do Transporte Motorizado de Passageiros nos Grandes Centros Urbanos Brasileiros 2011*; IPEA: Brasília, Brazil, 2011.
34. Stiel, W.C. *Historia dos Transportes Coletivos em Sao Paulo*; McGraw-Hill do Brasil: São Paulo, Brazil, 1978.
35. SPTrans. Available online: <https://www.sptrans.com.br/relatorio-integrado-da-administracao-2021/> (accessed on 22 September 2023).
36. Investing.com. Available online: <https://br.investing.com/commodities/carbon-emissions-historical-data> (accessed on 30 January 2024).
37. Mobilize Brasil. Available online: [https://www.mobilize.org.br/noticias/13111/um-diagnostico-atual-do-sistema-trolebus-paulistano.html#:~:text=A%20quantidade%20da%20frota%20atual,em%20R\\$%20972.151,00](https://www.mobilize.org.br/noticias/13111/um-diagnostico-atual-do-sistema-trolebus-paulistano.html#:~:text=A%20quantidade%20da%20frota%20atual,em%20R$%20972.151,00) (accessed on 30 January 2024).
38. Estrada Poggio, A.; Balest, J.; Zubaryeva, A.; Sparber, W. Monitored Data and Social Perceptions Analysis of Battery Electric and Hydrogen Fuelled Buses in Urban and Suburban Areas. *J. Energy Storage* **2023**, *72*, 108411. [CrossRef]
39. Rodrigues, G.S.; dos Reis, J.G.M.; Orynycz, O.; Tucki, K.; Machado, S.T.; Raymundo, H. A Study on the Viability of Adopting Battery Electric Vehicles in Bus Rapid Transit in Brazil Using the AHP Method. *Energies* **2023**, *16*, 4858. [CrossRef]
40. Eletra. Available online: <https://www.eletrabus.com.br/trolebus/> (accessed on 1 February 2024).
41. Figueiredo, P.; Bitar, R. São Paulo dos modernistas: Como era o Centro na época da Semana de 22 e como está 100 anos depois. *G1*, 14 February 2022.
42. Silva, A.C. 50 Anos de Trolebus em São Paulo. *Rev. Transp. Públicos* 1999. Available online: http://files-server.antp.org.br/_5dotSystem/download/dcmDocument/2013/01/10/DFC71538-9D09-445B-AF5D-B886D24BE523.pdf (accessed on 2 March 2024).
43. Rolnik, R.; Klintowitz, D. (I)Mobilidade na cidade de São Paulo. *Estud. Avançados* **2011**, *25*, 89–108. [CrossRef]
44. Movimento Respira São Paulo. Available online: <http://www.respirasaopaulo.com.br/67%20anos%20do%20Sistema%20Trolebus.htm> (accessed on 29 January 2024).
45. Stiel, W.C. *História Do Transporte Urbano No Brasil: História Dos Bondes e Trólebus e Das Cidades Onde Eles Trafegaram*; EBTU: PINI: Brasília, Brazil, 1984.
46. Branco, A. Mobilidade Urbana. *Brasil Engenharia* **2012**. Available online: http://brasilengenharia.com/portal/images/stories/revistas/edicao610/610_opiniao.pdf (accessed on 2 March 2024).
47. São Paulo Antiga. Available online: <https://www.facebook.com/saopauloantiga/photos/a.415416721847984/2098820436840929/> (accessed on 22 September 2023).
48. Agência Brasil. Available online: <https://agenciabrasil.ebc.com.br/geral/noticia/2019-06/exposicao-mostra-historia-de-onibus-eletricos-na-cidade-de-sao-paulo> (accessed on 22 September 2023).
49. Alves, W.; Studio, E.B. Eletrificação de ônibus avança em São Paulo | Mobilidade Estadão | Mês da Mobilidade 2023. *Mobilidade Estadão*, 13 September 2023.
50. CETESB. Reports and Publications—Vehicle Emission. Available online: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/relatorios-e-publicacoes/> (accessed on 1 February 2024).
51. CETESB. Vehicle Emission. Available online: <https://cetesb.sp.gov.br/veicular/> (accessed on 1 February 2024).
52. CETESB. PROCLIMA—State Climate Change Program of the State of São Paulo. Available online: <https://cetesb.sp.gov.br/proclima/gases-do-efeito-estufa/> (accessed on 1 February 2024).
53. UITP. Available online: <https://www.uitp.org/topics/trolleybus/> (accessed on 1 February 2024).
54. Iliopoulou, C.; Tassopoulos, I.X.; Kepaptsoglou, K. Multi-Objective Planning of Electric Bus Systems in Cities with Trolleybus Infrastructure Networks. *Sustain. Cities Soc.* **2024**, *103*, 105227. [CrossRef]
55. Kliucininkas, L.; Matulevicius, J. Comparative Analysis of Bus and Trolleybus Related GHGs Emissions and Costs in Lithuania. In Proceedings of the Knowledge-Based Technologies and OR Methodologies for Strategic Decisions of Sustainable Development, Vilnius, Lithuania, 30 September–3 October 2009; pp. 187–191.
56. Połom, M.; Wiśniewski, P. Assessment of the Emission of Pollutants from Public Transport Based on the Example of Diesel Buses and Trolleybuses in Gdynia and Sopot. *Int. J. Environ. Res. Public Health* **2021**, *18*, 8379. [CrossRef]
57. Połom, M. Technology Development and Spatial Diffusion of Auxiliary Power Sources in Trolleybuses in European Countries. *Energies* **2021**, *14*, 3040. [CrossRef]

-
58. Sant'Anna, E. Available online: <https://www.estadao.com.br/sustentabilidade/prefeito-quer-acabar-com-trolebus-em-sp-vale-a-pena-colocar-fim-nos-onibus-ligados-a-rede-eletrica/> (accessed on 1 February 2024).
 59. Sellitto, M.A.; Borchardt, M.; Pereira, G.M.; Bubicz, M.E. Tool for Environmental Performance Assessment of City Bus Transit Operations: Case Studies. *Clean Technol. Environ. Policy* **2015**, *17*, 1053–1064. [[CrossRef](#)]

Disclaimer/Publisher's Note: The statements, opinions and data contained in all publications are solely those of the individual author(s) and contributor(s) and not of MDPI and/or the editor(s). MDPI and/or the editor(s) disclaim responsibility for any injury to people or property resulting from any ideas, methods, instructions or products referred to in the content.

4.5 SADSJ – *South American Development Society Journal*

Foi publicado na revista **SADSJ – South American Development Society Journal**, em abril de 2025, o trabalho intitulado “**A tecnologia Full Cell Electric Bus (FCEB) na eletromobilidade: uma comparação das tecnologias disponíveis e seus impactos na operação**”. Nesse artigo comparou-se. comparar três tecnologias de ônibus elétricos de emissão zero (ZEBs): Trólebus, Ônibus Elétrico a Bateria (BEB) e Ônibus Elétrico com Célula de Combustível (FCEB).

Figura 18: SADSJ – South American Development Society Journal.



Fonte: Autor

**A TECNOLOGIA FULL CELL ELECTRIC BUS (FCEB) NA ELETROMOBILIDADE:
UMA COMPARAÇÃO DAS TECNOLOGIAS DISPONÍVEIS E SEUS IMPACTOS NA
OPERAÇÃO****Gabriel Santos Rodrigues - UNIP**

biel.rodrigues@outlook.com

João Gilberto Mendes dos Reis - UNIP / UPM

joao.reis@docente.unip.br

Sivanilza Teixeira Machado - IFSP-Campus Suzano

sivanilzamachado@ifsp.edu.br

Fabício Henrique do Nascimento da Silva - UNIP

fhns1410@gmail.com

Daniele dos Santos Ramos Xavier - UNIP

daniele.xavier4@aluno.unip.br

Resumo

A energia elétrica é atualmente a principal alternativa aos combustíveis fósseis para redução das emissões das frotas veiculares. Nas frotas de ônibus, os veículos elétricos já são utilizados há um certo tempo. Atualmente Trólebus e Ônibus Elétricos a Bateria (BEBs) estão em operação no Brasil, porém possuem limitações operacionais, os trólebus precisam de rede aérea para operar, pelo menos em parte de seu caminho e os BEBs dependem da autonomia de energia disponível em suas baterias. Uma alternativa a essas limitações são os ônibus elétricos com célula de combustível, em inglês Full Cell Electric Bus (FCEB), uma tecnologia híbrida, que utiliza célula de combustível de hidrogênio para dar autonomia ao motor elétrico. Desse modo, esse estudo propõe comparar os modelos existentes de Zero Emission Buses (ZEBs), em especial o FCEB, com o Trólebus e o BEB verificando suas vantagens e desvantagens e melhor desempenho operacional para cada um desses modelos. Os resultados indicaram que os FCEBs são promissores para médias e longas distâncias, mas ainda não são competitivos com os BEBs para curtas e médias distâncias e os Trólebus são importantes e ideais para linhas de alta demanda e corredores exclusivos devido ao custo da infraestrutura necessária

Palavras-chave: Ônibus sem emissões; Trólebus; Ônibus Elétrico a Bateria; Ônibus a hidrogênio; Ônibus Elétrico.

Abstract

Electricity is currently the main alternative to fossil fuels for reducing emissions from vehicle fleets. Electric vehicles have been used in bus fleets for some time. Trolleybuses and Battery Electric Buses (BEBs) are currently in operation in Brazil, but they have operational limitations: trolleybuses need an aerial network to operate, at least on part of their route, and BEBs depend on the autonomy of the energy available in their batteries. An alternative to these limitations is the Full Cell Electric Bus (FCEB), a hybrid technology that uses a hydrogen fuel cell to power the electric motor. This study therefore sets out to compare the existing Zero Emission Bus (ZEB) models, especially the FCEB, with the Trolleybus and BEB, checking their advantages and disadvantages and the best operational performance for each of these models. Finally, it was found that FCEBs are promising for medium and long distances, but are not yet competitive with BEBs for short and medium distances, and that trolleybuses are important and ideal for high-demand lines and exclusive corridors due to the cost of the necessary infrastructure

Keywords: Zero Emission Buses; Trolleybuses; Battery Electric Buses; Full Cell Electric Buses; Electric Buses.

1. INTRODUÇÃO

A utilização de energia elétrica é atualmente a principal alternativa aos combustíveis fósseis para redução das emissões das frotas veiculares. Nas frotas de ônibus, os veículos elétricos já são utilizados há um certo tempo. No Brasil, os trólebus, modelos elétricos que operam conectados a uma rede aérea estão em operação desde 1949, e diferente do que se pensa os veículos a bateria os Ônibus Elétricos a

Bateria, também foram comuns no início do século XX, antes da maturação do motor a combustão (NTU, 2019).

Em comum, esses dois modelos de ônibus possuem limitações operacionais, os trólebus precisam de rede aérea para operar, pelo menos em parte de seu caminho e os Ônibus Elétricos a Bateria ou (*Battery Electric Buses –BEBs*) dependem da autonomia de energia disponível em suas baterias, indispensável para esse tipo de veículo se movimentar.

Uma alternativa a essas limitações são os ônibus elétricos com célula de combustível, em inglês *Full Cell Electric Bus (FCEB)*. Esse modelo utiliza tecnologia híbrida, diferentemente dos modelos híbridos, que utilizam um motor a combustão para dar autonomia ao motor elétrico, ele possui uma célula de combustível de hidrogênio que fornece a energia para tracionar o veículo. Para Ajanovic; Glatt; Haas (2021) esse modelo de ônibus pode economizar cerca de 93% das emissões de CO₂ em comparação aos ônibus diesel.

Para Wagner e Walther (2024) os ônibus movidos a célula de hidrogênio podem atender a mais requisitos operacionais em termos de alcance e carregamento, do que os ônibus elétricos a bateria, e podem aumentar a eficiência de um sistema de transportes sem emissões de gases. Para Dong et al. (2023) esses modelos de ônibus são promissores para a descarbonização do transporte público.

Para neutralizar as emissões de Gases de Efeito Estufa (GEE), a prefeitura de São Paulo aposta nos BEBs e estuda suprimir a tradicional frota de trólebus da cidade (SANT'ANNA, 2023). Já na Região Metropolitana, o corredor São Mateus – Jabaquara, que liga a Região do ABC à capital, receberá novos trólebus ainda esse ano. Dessa forma os ônibus a célula de combustível podem complementar uma frota de BEBs que possuem autonomia limitada, criando uma alternativa para determinadas rotas (BLADES et al., 2022).

Desde 2006, a EMTU (Empresa Metropolitana de Transportes Urbanos), vem desenvolvendo um projeto de ônibus movido a célula de hidrogênio. Entre 2009 e 2010 houve testes com uma frota de protótipos no corredor São Mateus - Jabaquara com um custo de U\$\$ 16 milhões na época, já em 2023 esse projeto foi retomado

com participação de pesquisadores da USP (Universidade de São Paulo) que irão monitorar as operações (EMTU, 2023).

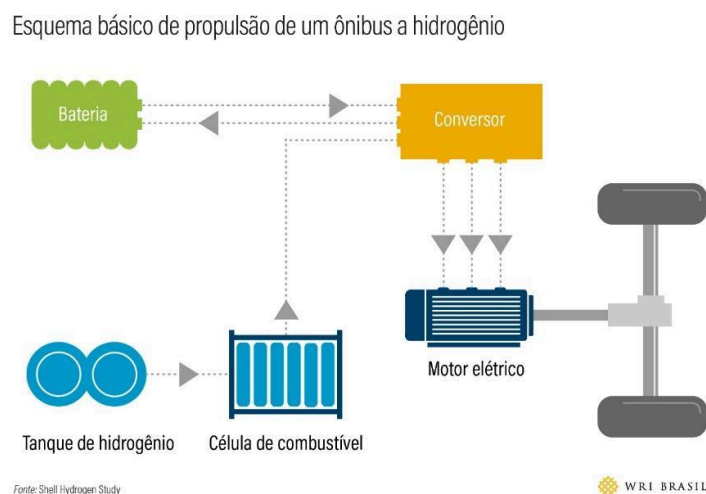
Já na Europa, em janeiro de 2023, estavam em operação 370 ônibus com célula de combustível em operação e planos de chegar a mais de 1200 em 2025. Além das linhas de ônibus urbanos, esse modelo também é indicado para rotas de média e longa distância, porém os custos ainda são uma barreira, pois um ônibus Full Cell é 2,3 vezes mais caro do que um ônibus a bateria (SUSTAINABLE BUS, 2024).

Desse modo esse estudo propõe comparar os modelos existentes de *Zero Emission Buses (ZEBs)*, em especial o FCEB, com o Trólebus e o BEB verificando suas vantagens e desvantagens e melhor desempenho operacional e qual a melhor aplicabilidade para cada um desses modelos.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Full Cell Electric Bus (FCEB) – Ônibus Movido a Célula De Combustível de Hidrogênio

Um ônibus movido a célula de combustível de hidrogênio ou Full Cell Electric Bus (FCEB) é um ônibus elétrico que inclui uma célula de combustível e uma bateria (ou, em alguns casos, um supercapacitor) para se locomover. Essa é uma tecnologia híbrida que usa a célula de combustível de hidrogênio para fornecer a maior parte da energia para operação do veículo, enquanto a bateria auxilia o veículo quando é necessário aumentar o consumo de energia, como no caso, de uma aceleração rápida ou alguma subida (STOLZENBURG; WHITEHOUSE; WHITEHOUSE, 2020). Esse processo pode ser visualizado de maneira simplificada na Figura 1.

Figura 1: Esquema básico de propulsão de um ônibus a hidrogênio

Fonte: Souza; Petzhold; Albuquerque (2021).

Assim quando o motorista dá partida no ônibus, o hidrogênio armazenado nos tanques internos do ônibus, é fornecido para a bateria, as moléculas de hidrogênio são separadas em íons de hidrogênio com carga positiva e elétrons que possuem carga negativa no ânodo, após esse processo os íons de hidrogênio passam pela membrana de troca de prótons e os elétrons passam por um circuito externo onde geram eletricidade (KARSAN, 2023).

Após esse processo os íons de hidrogênio e os elétrons se recombinaem no cátodo da célula de combustível com o oxigênio do ar, produzindo calor e água. A energia é gerada a partir de uma reação eletroquímica, onde o hidrogênio é consumido e os subprodutos resultantes são apenas calor e água (KARSAN, 2023; STOLZENBURG; WHITEHOUSE; WHITEHOUSE, 2020). As células de combustível são consideradas uma solução para ônibus elétricos urbanos quando são necessárias uma autonomia elevada (MERCEDES-BENZ BUSES, 2024).

O uso de células de combustível, não é recente, é um trabalho que vem sendo pesquisado e desenvolvido por quase dois séculos. Há uma controvérsia sobre autoria da invenção da célula de combustível de hidrogênio, mas várias fontes de literatura apontam que foi Sir. William Robert Grove, desenvolveu esse processo,

influenciado pelos estudos de Sir. William Nicholson e Anthony Carlisle sobre eletrólise da água (ANDÚJAR; SEGURA, 2009).

Mesmo com o petróleo abundante e barato e quando a poluição ambiental não era discutida, provavelmente outros campos da ciência e tecnologia, aplicações militares e espaciais mantiveram interesse no desenvolvimento das células de combustível para atender às suas necessidades (ANDÚJAR; SEGURA, 2009).

A tecnologia de célula de combustível, pode fornecer uma autonomia, entre 300 e 500 km, para um ônibus, aliados a uma bateria de tração relativamente pequena eles são capazes de recuperar energia na frenagem, aumentando a autonomia. Um tanque de hidrogênio tem capacidade entre 30 e 50 kg de hidrogênio comprimido, geralmente armazenado em tanques de pressão a 350 bar (BRAVO DIAZ; BOILLOT, 2024).

O consumo médio de combustível é de 8 Kg por 100 km (com uma variação entre 6 e 11 kg), dando uma vantagem energética de cerca de 40% em comparação ao ônibus diesel. O uso de células de combustível de hidrogênio contribui para o desenvolvimento técnico e econômico dessa tecnologia no transporte rodoviário, podendo também ser transferido para outros modelos de veículos comerciais (BRAVO DIAZ; BOILLOT, 2024).

2.2 Trólebus e Ônibus Elétrico a Bateria – BEB

Trólebus (Figura 2) e Ônibus elétricos a Bateria (Figura 3) são as tecnologias de ônibus zero emissões utilizadas no Brasil. Os trólebus estão em operação no Brasil desde 1949, e são carregados dinamicamente através de uma rede aérea. A estrutura dos bondes facilitou a sua implantação e os pneus faziam com eles fossem mais flexíveis podendo desviar de algo que estivesse pelo caminho e facilitava o embarque de passageiros se aproximando da calçada (GRIGORIEVA; NIKULSHIN, 2023).

Os trólebus são importantes para a substituição dos combustíveis fósseis no transporte público, e com a tecnologia In Motion Charging (IMC) que permite que esses veículos operem por trechos desconectados da rede aérea utilizando packs

de baterias menores do que os BEBs e que recarrega quando se conectam novamente a rede, estão se tornando uma alternativa interessante nos países europeus que pretendem zerar emissões e possuem estrutura de rede aérea disponível (BARTŁOMIEJCZYK; POŁOM, 2021).

Na América Latina, México e Brasil possuem as duas maiores frotas de trólebus disponíveis em operação. No México em julho de 2024, a frota era de 694 veículos desse modelo, no Brasil a frota é de 302 trólebus, concentrados na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP) (E-BUS RADAR, 2023).

A Cidade de São Paulo conta com 201 trólebus em operação, em 10 linhas e atendendo 8 milhões de passageiros por mês (SANT'ANNA, 2023), na Região Metropolitana existem mais 96 veículos que estão em operação no corredor São Mateus – Jabaquara, que liga a Zona Leste e a Zona Sul, da cidade de São Paulo passando pelas cidades de Diadema, Mauá, Santo André e São Bernardo do Campo (E-BUS RADAR, 2023).

Figura 2: Trólebus



Fonte: Zanon (2013).

Já os veículos elétricos a bateria, eram bem comuns antes da consolidação dos modelos de motor a combustão, naquela época um dos seus problemas era a baixa

autonomia desses veículos, com a necessidade de se reduzir as emissões de Gases de Efeito Estufa, eles se tornaram uma alternativa atraente para e estão sendo desenvolvidos cada vez mais rápido nos últimos anos com a China investindo pesadamente para atender os mercados local e mundial (NTU, 2019).

Figura 3: Ônibus Elétrico a Bateria



Fonte: Volvo (2024).

Os testes com ônibus elétricos a bateria na cidade de São Paulo se iniciaram no final de 2013, produzido pela BYD, o veículo possuía uma autonomia nominal de 250 km (PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO, 2013).

A EMTU, que também faz a gestão do corredor São Mateus - Jabaquara, em 2014, testou um ônibus articulado a bateria de 18 metros, entre Diadema e o Brooklin, esse veículo apresentava uma autonomia de bateria nominal de 220 km, com recargas longas na garagem e recargas curtas de oportunidade de 4 minutos durante as viagens (GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO, 2014).

Em dezembro de 2018, os ônibus elétricos a bateria, passaram a operar comercialmente na Zona Sul da Cidade de São Paulo na linha 6030/10 UNISA - CAMPUS 1 - Term. Sto. Amaro.

No final de 2022, a Prefeitura de São Paulo proibiu a inclusão de novos ônibus movidos a diesel no sistema de transporte da cidade, o que expandiu a frota e fez com que mais fabricantes disponibilizaram ônibus elétricos a bateria em território brasileiro.

Em julho de 2024, existiam em 19 cidades pelo menos um BEB em operação sendo que em São Paulo, a maior cidade do país, também possui a maior frota 180 BEBs em operação (E-BUS RADAR, 2023)

Esse número poderia ser maior se não fossem as dificuldades como: a capacidade energética da rede elétrica que não é capaz de suportar a quantidade de ônibus da cidade de São Paulo, as adequações necessárias para que as garagens possam oferecer suporte para esse modelo de ônibus (mudança de layout, coberturas para instalação dos carregadores e isolamento do piso, além da necessidade de novos funcionários especializados nesse tipo de veículo (NESPOLI ET. AL., 2023; PETROCILO; PESCARINI, 2024).

2.3 Vantagens e Desvantagens entre os modelos de Ônibus Elétricos existentes – Trólebus, BEB E FCEB

Para Di Vece et al. (2022), os fabricantes precisam tomar decisões estratégicas hoje em relação aos conjuntos de força e das opções de combustível para desenvolver soluções de mobilidade inteligente e verde no futuro, e que com o tempo os veículos elétricos serão mais competitivos em relação aos veículos a combustão.

Outro problema dos veículos elétricos é o descarte de baterias que estão no fim da vida útil, pois atualmente as tecnologias de reciclagem de baterias ainda atendem uma demanda muito baixa. Uma alternativa é a utilização dessas baterias como acumuladores de carga para prolongar sua vida útil (NAZARÉ, 2022).

Além da autonomia e da vantagem energética em relação aos BEBs, os FCEBs possuem uma variação menor de consumo em diferentes épocas do ano, já os BEBs perdem performance em dias mais quentes, porém em uma comparação direta os BEBs possuem uma maior eficiência energética que os FCEBs (ESTRADA POGGIO et al., 2023).

O FCEB, possui um tempo de carregamento menor em relação aos BEB. Os FCEBs são recarregados em um tempo semelhante ao de um ônibus diesel (HENSHER; MULLEY, 2015). Já os BEBs, para operarem precisam de carregamento noturno e, em alguns casos, recarregamento de oportunidade nas paradas (Figura 4) para completar suas operações (MOMCILOVIC; DIMITRIJEVIC; STOKIC, 2023).

Figura 4: Estação de Recarga



Fonte: Volvo (2024).

O custo de fabricação de um ônibus com tecnologia FCEB é alto, mas espera-se que ele seja reduzido com o aumento do volume de produção, além disso, estações de reabastecimento de hidrogênio (Figura 5) ainda não estão amplamente disponíveis, o que contribui, para um crescimento de frota mais lento que os BEBs (BRAVO DIAZ; BOILLOT, 2024). Essa estrutura de estações de carregamento é necessária para que a implantação de uma frota de ônibus a hidrogênio seja bem-sucedida (WANG et al., 2021).

Figura 5: Estação de Recarga de Hidrogênio



Fonte: Bera (2024).

Outra questão levantada por Burke et al. (2023), é em quanto tempo o custo do hidrogênio se reduzirá no futuro, mas que a amortização do investimento com a eletrificação de frota de ônibus é mais rápida do que uma frota de caminhões por exemplo. Outro custo que ainda deve ser avaliado é o custo da infraestrutura de recarga que pode ser determinante para os projetos de se eletrificar com baterias ou com hidrogênio.

Já os trólebus, possuem a necessidade de rede área, mesmo os mais modernos e equipados com a tecnologia In Motion Charging (IMC), que permite que andem desconectados, ainda utilizam da rede, para recarregar suas baterias, pelo menos em parte de sua operação (GUNTER et al., 2019).

2.4 Well To Wheel (WTW) - A Eficiência Energética de um Veículo Elétrico

As emissões de um veículo durante sua circulação é apenas uma parte da mensuração de sua eficiência. O processo completo é chamado do poço a roda (Well to Wheel – WTW ou W2W), ele analisa desde a obtenção do combustível na fonte primária o “poço” passando por toda a cadeia de energia até o consumo final nas rodas (SHEPARD, 2024).

Em muitas análises esse processo é dividido em dois seguimentos o do poço ao tanque (Well to Tank - WTT) e o do Tanque a Roda (Tank to Wheel - TTW). Na abordagem WTT é discutida a eficiência da produção do combustível utilizado até a operação dos veículos já na TTW é avaliada a eficiência do combustível na operação do veículo (Figura 6) (RODRIGUES et al., 2022).

Figura 6: Poço a Roda – Well to Tank -TTW



Fonte: Adaptado de Rodrigues e Abreu (2023).

Li et al. (2016), verificaram que na China, quando as matrizes energéticas são renováveis, as eficiências entre veículos movidos a célula de combustível de hidrogênio e movidos a bateria são próximas.

No Brasil, em agosto de 2024, considerando a região central onde se localiza a cidade de São Paulo, os dados de eficiência energética apontam para uma intensidade de emissão de carbono de 131g CO₂eq/ kWh, sendo que 84% da energia consumida é de baixo carbono e 80% é renovável, predominantemente hidroelétrica. Esses números são menores que os da Alemanha que no mesmo período apresentou 306 CO₂eq/ kWh sendo que 71% da energia consumida é de baixo carbono e 64% é renovável, porém com destaque que 21% do consumo da energia alemã foi proveniente de energia solar (ELECTRICITYMAP, 2024).

Rodrigues et al. (2022), verificaram que se a matriz energética de um veículo elétrico a bateria for baseada em energias renováveis como hidroelétrica ou solar e eólica elas apresentam valores de eficiência de 45,53 - 72,2% e 53,5 – 71,4% respectivamente.

Já para os FCEB o caminho passa pela forma de como o hidrogênio é obtido. Existem modos diferentes para a obtenção de hidrogênio e cada forma, também pode ser chamada de rota de produção, é representada por uma cor (Figura 7).

Figura 7: Cores do Hidrogênio



Fonte: Futuretransport (2023).

O Governo Federal através do Programa Nacional do Hidrogênio (PNH2), utiliza o termo “hidrogênio de baixa emissão” que considera os hidrogênios produzidos de fontes renováveis, energia nuclear e fontes fósseis com captura de carbono. Nos Estados Unidos é utilizada a expressão hidrogênio limpo com uma meta de 4,0 kgCO₂e/kgH₂ para as emissões de GEE associadas à produção de hidrogênio. Por outro lado, a Alemanha, optou pela nomenclatura de cor privilegiando incentivos e

subsídios ao hidrogênio verde e abrindo espaço para os hidrogênios laranja (produzido através de resíduos), azul e rosa (CHIAPPINI, 2023).

A China atualmente o maior produtor de hidrogênio do mundo produzindo cerca de 33 milhões de toneladas por ano, quase em sua totalidade produzida através de combustíveis fósseis, porém a pressão por novas matrizes energéticas para substituir os combustíveis fósseis e carvão faz com que a necessidade de um mercado de hidrogênio de baixo carbono (OLIVEIRA, 2022).

O Brasil, também possui uma produção de hidrogênio com alta emissão de CO₂, nos setores de refino e de fertilizantes e produção de hidrogênio cinza através de gás natural, mas o país tem potencial para se tornar um exportador de hidrogênio de baixo carbono através de fontes eólicas, solar e hídricas (OLIVEIRA, 2022).

3. Metodologia

Esse estudo se propõe a comparar o potencial de aplicação dos principais tipos de ônibus Zero Emissões (ZEBs), Trólebus, BEB e FCEB.

Os modelos de ônibus elétricos, de acordo com a literatura, possuem diferentes características que podem atender diferentes modos de operação. Na Tabela 1 estão sintetizadas características operacionais de cada um dos três modelos.

Tabela 1: Síntese Geral de características de ZEBs

	FCEB	BEB	Trólebus
Autonomia	Entre 300 e 500 km	250 km	Em contato com a Rede
Tempo de Recarga	Minutos	De 3 a 4 horas	Instantâneo

Fonte: Elaborado pelos autores

É possível verificar que os três modelos possuem características distintas de autonomia e recarregamento. Dos três modelos o que possui maior autonomia é o FCEB, que possui autonomia de acordo com os tanques de hidrogênio disponíveis no veículo, mas abrange um intervalo de 300 e 500 km.

Já o BEB possui a autonomia das baterias como limitador, geralmente eles são recarregados durante algumas horas no período noturno, ou no intervalo de suas operações, a capacidade de bateria dos modelos BEB atualmente também varia com a quantidade packs de bateria disponíveis no veículo, porém em sua maioria, essa autonomia gira em torno de 250 km.

Nos trólebus a autonomia basicamente é a dependência de rede aérea, já que ele necessita do contato instantâneo com a rede para ser alimentado, ou no caso do modelo de trólebus com tecnologia IMC ser alimentado e recarregar seu banco de baterias, que lhe permite operar desconectado da rede aérea.

Depois de analisar as características operacionais é necessário verificar a viabilidade de custo de aquisição e de operação. Para isso, analisou-se os custos operacionais disponíveis dos modelos existentes, que podem ser observados na Tabela 2.

Tabela 2: Síntese Geral de custos operacionais de ZEBs

	FCEB	BEB	Trólebus
	R\$	R\$	R\$
Custo de Aquisição	7.064.070,00	2.590.000,00	972,151,00
Custo de operação (R\$/km)	R\$ 7,71	R\$ 3,34	R\$ 3,73

Fonte: Elaborado pelos autores

O primeiro critério que deve ser avaliado em um ônibus é seu custo de aquisição, normalmente um custo de um FCEB, no exterior, pois essa tecnologia ainda está em testes no Brasil é de aproximadamente USD 1.300.000,00 ou R\$ 7.064.070,00 (considerando USD 1,00 = R\$ 5,43 cotação do dólar em 29/09/2024 e sem

considerar taxas de importação e nacionalização). Esse valor é maior que um ônibus elétrico a bateria (12m) no Brasil. Considerando dados obtidos como valor de referência da Prefeitura do Município de São Paulo (2024) um BEB possui um valor de R\$2.590.000,00, com disponibilidade em território nacional esse veículo não necessita de importação.

Já o custo de um trólebus de 12m, no Brasil, é de R\$ 972,151,00 (SILVA, 2022), descontando-se o custo de implementação de infraestrutura de rede aérea. Dessa forma, comparando-se os custos, o ônibus movido a hidrogênio tem um custo, aproximadamente 2,7 vezes maior que um BEB e 7,3 vezes maior que um trólebus.

Por fim, os custos operacionais, por quilômetro, verificados para cada modelo de veículo são de: R\$ 7,71 para o FCEB, de R\$ 3,34 para o BEB e R\$ 3,73 para os trólebus, considerando também o custo de manutenção da rede aérea por quilômetro.

4. Resultados e discussões

Estrada Poggio et al., (2023) afirmam que a eficiência Tank to Wheel (TTW) de um FCEB é menor do que em um BEB, porém há uma variação menor no consumo do FCEB quando comparado BEBs, pois a variação de clima afeta mais os BEBs do que os FCEBs.

Já o custo operacional por quilômetro encontrado para um FCEV foi de 1,27 EUR ou R\$ 7,71 ou já o de um BEB foi 0,55 EUR ou R\$ 3,34 (considerando EUR 1,00 = R\$ 6,07 cotação do Euro em 29/09/2024). Já o custo de operação de um trólebus é de R\$1,85 por quilômetro somados ao custo de manutenção da rede de trólebus, que é de R\$1,88/km (SILVA, 2022).

Para Néspoli et al. (2023) os veículos devem ser escolhidos de acordo com os seguintes critérios: Veículos carregados por rede aérea ou ultracapacitores (Trólebus e BEBs que necessitam de recarga de oportunidade em paradas), por possuírem uma flexibilidade menor, do que os BEBs e os FCEBs, sua aplicação é mais indicada em corredores ou em linhas segregadas como BRTs, para que os

custos de infraestrutura sejam reduzidos devido a economia de escala, assim se tornando mais vantajosos economicamente.

Para Correa, Muñoz e Rodriguez, (2019) os ônibus elétricos são superiores em uma avaliação TTW, pois não emitem gases poluentes, mas para serem veículos sustentáveis devem utilizar energia elétrica obtida de forma mais sustentável, para melhorar seu desempenho energético e ambiental.

Para que para um FCEB seja competitivo, e ambientalmente sustentável a participação de hidrogênio verde na sua célula de combustível deve ser maior do que 50% (CORREA; MUÑOZ; RODRIGUEZ, 2019).

Os BEBs atualmente é a escolha mais comum para eletrificação porém as capacidades de longo prazo ainda são desconhecidas para esse tipo de veículo enquanto o FCEB tem o potencial de complementar uma frota de BEBs, em atividades mais complexas para o sistema de baterias (BLADES et al., 2022).

A tecnologia BEB será ideal no futuro, para distâncias mais curtas e o FCEB para distâncias mais longas, mas é que o Brasil é um local ideal para a aplicação de ônibus totalmente elétricos pela sua matriz energética renovável (CORREA; MUÑOZ; RODRIGUEZ, 2019).

Para Néspoli et al. (2023), os trólebus possuem um custo fixo elevado (rede aérea e custo energético), itinerários rígidos devido a necessidade de rede aérea. Porém se considerarmos esses dados e que a cidade de São Paulo possui uma rede de trólebus desde 1949, as dificuldades desse modelo já possuem um conhecimento adquirido e os valores já estão equacionados no sistema ele tem também suas vantagens.

5. Conclusões

Os ZEBs são o futuro da mobilidade sustentável, o que é bom na eletromobilidade são os diversos modelos disponíveis que podem ser aplicados para cada necessidade operacional. A média de quilometragem da frota da Cidade de São Paulo é de 196km/dia. Sendo os BEBs a alternativa mais adequada para essas distâncias.

Os FCEB ainda não possuem fabricação em território nacional e as formas de obtenção de hidrogênio ainda não permitem que eles sejam utilizados em grande escala, mas no futuro com o barateamento da tecnologia e do potencial de produção de hidrogênio verde (ou de baixo carbono) esse modelo de veículo será importante para deslocamentos de médias e longas distâncias, podendo ser até competitivo com os BEBs nas pequenas e médias.

Os trólebus são indicados para linhas de alta demanda ou para corredores exclusivos, pois o custo de sua rede é considerável. A rede de trólebus disponível na Cidade de São Paulo ainda é importante, a rede possui um custo elevado de implantação e sua desativação, é prejuízo ao erário público, pois está no meio de sua vida útil e contribui de modo eficiente para descarbonização da frota de ônibus.

Estudos futuros podem abordar custos de redes de trólebus atuais e novas sugestões para redes de trólebus ou estudar novos modelos de ônibus elétricos que podem ser aplicados na Cidade de São Paulo.

6. Agradecimentos

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

Referências bibliográficas

AJANOVIC, A.; GLATT, A.; HAAS, R. Prospects and impediments for hydrogen fuel cell buses. **Energy**, v. 235, 2021.

ANDÚJAR, J. M.; SEGURA, F. Fuel cells: History and updating. A walk along two centuries. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 13, n. 9, p. 2309–2322, 1 dez. 2009.

BARTŁOMIEJCZYK, M.; POŁOM, M. Sustainable Use of the Catenary by Trolleybuses with Auxiliary Power Sources on the Example of Gdynia.

Infrastructures, v. 6, n. 4, p. 61, abr. 2021.

BERA, L. **Fotografia reklamowa Wrocław | Produktowa, biznesowa, wnętrz i architektury**. Disponível em: <<https://www.lukaszbera.com>>. Acesso em: 2 out. 2024.

BLADES, L. A. W. et al. **Determining the Distribution of Battery Electric and Fuel Cell Electric Buses in a Metropolitan Public Transport Network**. . Em: WCX SAE WORLD CONGRESS EXPERIENCE. SAE International, 29 mar. 2022. Disponível em: <<https://saemobilus.sae.org/papers/determining-distribution-battery-electric-fuel-cell-electric-buses-a-metropolitan-public-transport-network-2022-01-0675>>. Acesso em: 30 set. 2024

BRAVO DIAZ, L.; BOILLOT, L. **Historical analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects: evaluation of contribution towards the state of the art**. [s.l.] Publications Office of the European Union, 2024.

BURKE, A. F. et al. Projections of the costs of medium- and heavy-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020-2040) and related economic issues. **Energy for Sustainable Development**, v. 77, p. 101343, 1 dez. 2023.

CHIAPPINI, G. **Hidrogênio verde, azul, cinza: entenda o que cada cor significa e as perspectivas de desenvolvimento**. , 2023. Disponível em: <<https://eixos.com.br/hidrogenio/hidrogenio-verde-azul-cinza-entenda-o-que-cada-cor-significa-e-as-perspectivas-de-desenvolvimento/>>. Acesso em: 1 out. 2024

CORREA, G.; MUÑOZ, P. M.; RODRIGUEZ, C. R. A comparative energy and environmental analysis of a diesel, hybrid, hydrogen and electric urban bus. **Energy**, v. 187, p. 115906, 15 nov. 2019.

DI VECE, G. et al. **Development of a Total Cost of Ownership Model to Compare BEVs, FCEVs and Diesel Powertrains on Bus Applications**. . Em: CO2 REDUCTION FOR TRANSPORTATION SYSTEMS CONFERENCE. 14 jun. 2022. Disponível em: <<https://www.sae.org/content/2022-37-0030/>>. Acesso em: 30 set. 2024

DONG, Y. et al. Co-planning of hydrogen-based microgrids and fuel-cell bus operation centers under low-carbon and resilience considerations. **Applied Energy**, v. 336, p. 120849, 15 abr. 2023.

E-BUS RADAR. **E-Bus Radar. E-BUS RADAR**, 2023. Disponível em: <<https://www.ebusradar.org/>>. Acesso em: 30 ago. 2023

ELECTRICITYMAP. **Live 24/7 CO₂ emissions of electricity consumption**. Disponível em: <<http://electricitymap.tmrow.co>>. Acesso em: 1 out. 2024.

EMTU. **Ônibus movido a hidrogênio**. Disponível em: <<https://www.emtu.sp.gov.br/emtu/inovacao/cases-emtu/onibus-movido-a-hidrogenio.fss>>. Acesso em: 30 set. 2024.

ESTRADA POGGIO, A. et al. Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas. **Journal of Energy Storage**, v. 72, p. 108411, 2023.

FUTURETRANSPORT. **Hidrogênio: um problema e uma solução verde** -, 5 dez. 2023. Disponível em: <<https://futuretransport.com.br/hidrogenio-um-problema-e-uma-solucao/>>. Acesso em: 2 out. 2024

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **SP inicia testes com primeiro ônibus articulado do mundo movido a baterias**. Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/ultimas-noticias/sp-inicia-testes-com-primeiro-onibus-articulado-do-mundo-movido-a-baterias/>>. Acesso em: 16 out. 2021.

GRIGORIEVA, O.; NIKULSHIN, A. Trolleybuses and trams in the urban public transport network of Russian regions: problems and prospects. **E3S Web of Conferences**, v. 371, p. 04019, 2023.

GUNTER, M. et al. **In Motion Charging Innovative Trolleybus**. [s.l.] UITP, 2019.

HENSHER, D. A.; MULLEY, C. Modal image: candidate drivers of preference differences for BRT and LRT. **Transportation**, v. 42, n. 1, p. 7–23, jan. 2015.

KARSAN. **What is Hydrogen Fuel Cell Bus?** Disponível em:

<<https://www.karsan.com/en/blog/hydrogen-blog/what-is-hydrogen-fuel-cell-bus#how-does-a-hydrogen-fuel-cell-bus-work->>. Acesso em: 30 set. 2024.

LI, M.; ZHANG, X.; LI, G. A comparative assessment of battery and fuel cell electric vehicles using a well-to-wheel analysis. **Energy**, v. 94, p. 693–704, 1 jan. 2016.

MERCEDES-BENZ BUSES. **The new eCitaro fuel cell**. Disponível em:

<https://www.mercedes-benz-bus.com/en_DE/models/ecitaro-fuel-cell.html>. Acesso em: 30 set. 2024.

MOMCILOVIC, V.; DIMITRIJEVIC, B.; STOKIC, M. Supercapacitor electric bus modeling and simulation framework. **Energy**, v. 282, p. 129020, 1 nov. 2023.

NAZARÉ, E. **Sustentabilidade: descarte de baterias dos carros elétricos ainda precisa ser aperfeiçoado –**. Disponível em:

<<https://jornal.usp.br/campus-ribeirao-preto/sustentabilidade-descarte-de-baterias-dos-carros-eletricos-ainda-precisa-ser-aperfeicoado/>>. Acesso em: 30 set. 2024.

NESPOLI, L. C.; ET. AL. **Custos Dos Serviços De Transporte Público Por Ônibus Elétrico: Metodologia De Cálculo E Parâmetros**. São Paulo, SP: ANTP, 2023.

NTU. **Centro de Documentação e Memória Eurico Divon Galhardi**. 1. ed.

Brasília: Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos - NTU, 2019.

OLIVEIRA, R. C. D. Panorama do hidrogênio no Brasil. 2022.

PETROCILO, C.; PESCARINI, F. **Briga entre prefeitura e Enel trava ônibus elétrico em SP**. Disponível em:

<<https://www1.folha.uol.com.br/cotidiano/2024/03/briga-entre-prefeitura-enel-e-empr-esas-trava-onibus-eletricos-em-sp.shtml>>. Acesso em: 14 mar. 2024.

PREFEITURA DA CIDADE DE SÃO PAULO. **Prefeitura testa ônibus a bateria que percorre 250 km com apenas uma recarga**. Disponível em:

<<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/comunicacao/noticias/?p=162604>>. Acesso em: 16 out. 2021.

PREFEITURA DO MUNICÍPIO DE SÃO PAULO. **Chamada Pública SF/OPCRED Nº 01/2024**. Disponível em: <<https://capital.sp.gov.br/web/fazenda/w/opcred/34653>>. Acesso em: 1 out. 2024.

RODRIGUES, J. P. D. S. et al. **Comparison of Well-to-Wheel energy efficiency between combustion vehicles and electric vehicles**. 2022 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET). **Anais...** Em: 2022 INTERNATIONAL CONFERENCE ON ELECTRICAL, COMPUTER AND ENERGY TECHNOLOGIES (ICECET). jul. 2022. Disponível em: <<https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/9872658>>. Acesso em: 30 set. 2024

RODRIGUES, L.; ABREU, R. O papel da bioenergia na Mobilidade sustentável De baixo carbono. **Agroanalysis**, v. 43, n. 6, 2023.

SANT'ANNA, E. **Prefeito quer acabar com trólebus em SP: vale a pena abandonar ônibus ligados à rede elétrica?** Disponível em: <<https://www.estadao.com.br/sustentabilidade/prefeito-quer-acabar-com-trolebus-em-sp-vale-a-pena-colocar-fim-nos-onibus-ligados-a-rede-eletrica/>>. Acesso em: 22 set. 2023.

SHEPARD, J. **What is well-to-wheel efficiency in an EV?** Disponível em: <<https://www.evengineeringonline.com/what-is-well-to-wheel-efficiency-in-an-ev/>>. Acesso em: 30 set. 2024.

SILVA, T. **Um diagnóstico atual do sistema trólebus paulistano**. , 2022. Disponível em: <<https://plamurbblog.wordpress.com/2022/04/07/um-diagnostico-atual-do-sistema-tr-olebus-paulistano/>>. Acesso em: 15 set. 2023

SOUZA, H.; PETZHOLD, G.; ALBUQUERQUE, C. **Ônibus a hidrogênio pode complementar veículos a bateria em transição para transporte limpo**. Disponível em: <<https://www.wribrasil.org.br/noticias/onibus-hidrogenio-pode-complementar-veiculos-bateria-em-transicao-para-transporte-limpo>>. Acesso em: 30 set. 2024.

STOLZENBURG, K.; WHITEHOUSE, N.; WHITEHOUSE, S. **Ônibus Movidos A Hidrogénio: Melhores Práticas E Comercialização**. Bélgica: UITP, 2020.

SUSTAINABLE BUS. **Fuel cell bus projects in the world: what's going on?**

Disponível em:

<<https://www.sustainable-bus.com/fuel-cell-bus/fuel-cell-bus-hydrogen/>>. Acesso em: 30 set. 2024.

VOLVO BUSES. **Volvo Buses**. Disponível em: <<https://www.volvobuses.com/en/>>.

Acesso em: 2 out. 2024.

WAGNER, D.; WALTHER, G. Techno-economic analysis of mixed battery and fuel cell electric bus fleets: A case study. **Applied Energy**, v. 376, p. 124285, 2024.

WANG, Y. et al. Polymer electrolyte membrane fuel cell and hydrogen station networks for automobiles: Status, technology, and perspectives. **Advances in Applied Energy**, v. 2, p. 100011, 26 maio 2021.

ZANON, M. **Trólebus**. Disponível em: <<https://monicazanon.com.br/>>. Acesso em: 22 set. 2023.

4.6 Integração Analítica da Pesquisa

O primeiro artigo cumpre o primeiro objetivo específico da tese de forma decisiva pois além de um mapeamento bibliométrico descritivo, faz uma análise estrutural da produção científica publicada internacionalmente sobre ônibus elétricos. Dessa maneira verificou-se através de redes de autoria, clusters temáticos a evolução das publicações durante os últimos anos e quais os eixos de estudo em maior evidência como: modelagem energética, análise do ciclo de vida, otimização operacional e avaliações do custo do ciclo de vida.

Assim, o Artigo 1, demonstra que a literatura global está fortemente concentrada nos Estados Unidos, Europa e Ásia e com poucos estudos aplicados em países Latino-Americanos, como o Brasil revelando uma lacuna de pesquisa.

Mais do que catalogar as tendências, o artigo delimita criticamente as fronteiras do conhecimento, evidenciando as limitações metodológicas e conceituais ainda existentes em parte da literatura, especialmente, no que diz respeito à ausência de análises que integrem simultaneamente custos operacionais, impactos ambientais locais, desempenho real em corredores urbanos e viabilidade financeira para o poder público e para operadores de transportes. Essa leitura crítica permite compreender que o campo científico avança rapidamente, mas de forma fragmentada com muitos estudos de prognóstico, e com poucos estudos em ambientes operacionais reais.

O Artigo 1 também aponta lacunas como: falta de estudos comparativos entre diferentes tecnologias de emissão zero; escassez de avaliações econômicas em contextos latino-americanos; necessidade de validação empírica em um BRT em operação; e pouca atenção às tecnologias elétricas já consolidadas, como os trólebus, dessa maneira, justificando diretamente os artigos seguintes que respondem aos próximos objetivos específicos e conferindo a coesão metodológica e o rigor científico necessário ao trabalho.

Dessa maneira, o Artigo 1 cumpre o primeiro objetivo específico mapeando a literatura existente e articulando criticamente o estado da arte, produzindo evidências sociais e científicas importantes que estruturaram o percurso de investigação da tese. O Artigo 1 é fundamental pois esclarece que a tese podia e precisava avançar para comparações multicritério (Artigo 2), para uma validação em um ambiente real (Artigo 3), sem deixar de lado uma tecnologia consolidada e que poderia ser aplicada (Artigo 4), com uma comparação transversal final (Artigo 5), abrangendo todos os modelos de ônibus sem emissões. Em resumo, o Artigo 1 além de responder o objetivo específico 1, constrói uma estrutura para as etapas seguintes da tese.

O Artigo 2, cumpre o segundo objetivo específico, ao comparar o desempenho de um ônibus elétrico movido a bateria com um ônibus movido a diesel, por meio de uma análise multicritério (AHP), trazendo uma contribuição analítica mais ampla,

ao transformar variáveis técnico-operacionais, econômicas e ambientais em critérios formalmente estruturados. O artigo estabelece a primeira avaliação, com critérios, indicadores e níveis de desempenho, permitindo julgar os dois modelos de ônibus. Isto, não apenas operacionaliza o mapeamento realizado no Artigo 1, mas contribui para criar um referencial metodológico para a sequência investigativa da tese.

Mais importante, o Artigo 2 produz um conjunto de resultados normativos, ou seja, indica quais tecnologias podem ser superiores sob determinados pesos e contextos, criando um ponto de partida lógico para que fossem testadas, em um BRT em operação, como o Expresso Tiradentes, papel assumido pelo Artigo 3; ou se comparadas a uma tecnologia consolidada estudada no Artigo 4.

Dessa forma, além de responder ao segundo objetivo específico o Artigo 2 estrutura o eixo comparativo da tese, inaugurando uma lógica avaliativa que será expandida e refinada nos artigos posteriores.

O Artigo 3, responde ao terceiro objetivo específico, sendo um estudo de caso realizado para uma validação empírica, ao avaliar a substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos no Expresso Tiradentes, saindo do plano abstrato comparativo (Artigo 2) e entra em uma validação empírica, para verificar se a hipótese do Artigo 2 poderia ser aplicada em operação real.

Ao analisar o consumo energético, desempenho operacional, custos diretos, custos sociais e emissões evitadas, o Artigo 3 testa se as vantagens atribuídas aos ônibus elétricos se confirmam na prática. O estudo incorpora complexidade para a tese que é a validação de condições institucionais e financeiras que podem pesar na mudança de tecnologia e que poderiam tornar resultados incompatíveis.

Analiticamente, o artigo funciona como um pivô metodológico que valida os resultados do Artigo 2 e cria parâmetros empíricos para comparação com os trólebus (Artigo 4), e fornece métricas operacionais essenciais para a comparação transversal do Artigo 5, cumprindo o terceiro objetivo específico e trazendo robustez e confiabilidade para o estudo.

O Artigo 4 cumpre o quarto objetivo específico ao examinar o desempenho ambiental e operacional do sistema de trólebus de São Paulo, em operação há 76 anos, na tese sua contribuição analítica é singular, introduzindo uma tecnologia consolidada, algo não muito comum em teses mais focadas em inovação.

Enquanto ônibus movidos a bateria e ônibus movidos a hidrogênio, configuram-se tecnologias emergentes, ou em fase de adoção, como o caso da cidade de São Paulo, os trólebus representam um caso de êxito histórico (mesmo com altos e baixos), pois é possível vê-los em operação há décadas e inclusive em corredores de média e alta capacidade, usando matriz energética renovável. Isto permitiu a tese fazer algo incomum na literatura: o contraste da tecnologia emergente e a tecnologia já madura, revelando também as vantagens dessa tecnologia com base em critérios como (maior

disponibilidade, menor variação de desempenho, e previsibilidade de custos).

Além disso, a análise dos trólebus, problematiza a narrativa dominante de que a eletrificação deve-se basear no modelo de ônibus elétrico movido a bateria. Assim o artigo mostra que diferentes tecnologias podem atender públicos e projetos diferentes, pois cada contexto é singular, reforçando a necessidade de se usar a diversidade tecnológica disponível na transição energética brasileira e que não está aquém do que está sendo estudado e baseando a eletrificação em outros países.

Com isso, o Artigo 4, responde o quarto objetivo específico, ao fornecer o um exemplo de operação elétrica de longo prazo estabelecendo um contraponto empírico para enriquecer a comparação do Artigo 5, e ampliar a tese mostrando que a transição não é tão somente sobre adotar novas tecnologias, mas também reconhecer, aproveitar e expandir tecnologias que já funcionam bem e que podem contribuir para uma transição energética sustentável. Assim, com o Artigo 4, foi possível reforçar a coerência interna da tese em conectar presente e futuro em uma mesma análise.

O Artigo 5, cumpre o quinto objetivo específico da tese ao comparar transversalmente, ou seja, nesse período, ônibus elétricos movidos a bateria e trólebus com o modelo de ônibus movido a células de combustível de hidrogênio, fazendo uma síntese final desta tese no formato *multipaper*.

Ao integrar resultados dos artigos anteriores como: tendências científicas (Artigo 1), avaliação multicritério (Artigo 2), validação empírica (Artigo 3) e a performance de uma tecnologia consolidada (Artigo 4), o Artigo 5, cria uma matriz comparativa abrangente que permite identificar em que contextos cada tecnologia apresenta maior viabilidade.

Essa síntese é essencial porque nenhum dos artigos anteriores, isoladamente, seria capaz de responder à pergunta de pesquisa da tese. Assim o Artigo 5 ao integrar variáveis energéticas, operacionais, ambientais e econômicas das três tecnologias, concluiu o raciocínio iniciado no primeiro artigo.

Analiticamente, ele demonstra que os ônibus elétricos movidos a bateria, possuem maior eficiência energética e menor custo social. Os ônibus movidos a célula de combustível de hidrogênio possuem potencial em operações de longa distância, mas tem a limitações logísticas de abastecimento e de obtenção de hidrogênio de baixa emissão. E por fim os trólebus que são vantajosos em corredores exclusivos e de alta demanda.

Assim o Artigo 5, cumpre o com quinto objetivo específico e conclui o percurso investigativo, revelando que a transição energética brasileira demanda pluralidade tecnológica, planejamento integrado e políticas públicas robustas sendo, portanto, o elemento integrado e conclusivo da tese *multipaper*.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

5.1 Conclusões

Esta tese buscou analisar, de forma integrada e multidimensional, o desempenho técnico-operacional, econômico e ambiental das principais tecnologias de ônibus de emissão zero: Trólebus, Ônibus Elétrico Movido a Bateria (BEB) e Ônibus Elétrico movido a Célula de Combustível de Hidrogênio (FCEB), no contexto brasileiro, mas com ênfase na cidade de São Paulo. Além disso, investigou-se de que forma a redução de externalidades negativas (ruído, poluição atmosférica local e emissões de gases de efeito estufa) contribuí para financiar, ainda que indiretamente, a substituição da matriz energética na frota de ônibus.

Baseado, em uma abordagem *multipaper* estruturada em cinco artigos complementares, a tese construiu uma visão abrangente, comparativa e contextualizada, integrando tendências globais com as especificidades brasileiras. Usando-se de métodos distintos como: bibliometria, análise multicritério (AHP), aplicação em um corredor em operação como o Expresso Tiradentes e uma comparação transversal entre todos os modelos que permitiu formar uma estrutura capaz de orientar decisões estratégicas de eletrificação de frotas.

O primeiro artigo, estabeleceu as diretrizes iniciais ao realizar uma análise bibliométrica ampla da literatura internacional sobre ônibus elétricos. Assim foi possível identificar tendências, predominância de temas e lacunas científicas. Entre as principais lacunas, destacam-se: a concentração de estudos em países da América do Norte, Europa e Ásia; e um número reduzido de investigações relacionando desempenho econômico e ambiental em corredores reais. Esse mapeamento permitiu delimitar o escopo da tese, justificar os estudos seguintes e fundamentar cientificamente a necessidade de uma abordagem comparativa e integrada contribuindo diretamente para alcançar o objetivo geral.

O segundo artigo aprofundou a análise ao comparar, com base em um método multicritério (AHP), o desempenho técnico, econômico e ambiental de um ônibus movido a bateria e um ônibus a diesel em um BRT, o nível máximo de priorização operacional que um ônibus pode ter. Os resultados indicaram superioridade do modelo elétrico, quando avaliado, sob critérios técnicos, ambientais e econômicos, o que reforça a importância de decisões baseadas em critérios integrados, e não em atributos isolados independente de ser um critério positivo como o desempenho ambiental ou negativo como o custo de aquisição. Assim o modelo AHP funcionou como uma primeira estrutura avaliativa integrada e contribuiu diretamente para a construção ana-

lítica exigida pelo objetivo geral.

O terceiro artigo validou o Artigo 2, ao analisar a substituição de ônibus a diesel por ônibus elétricos no corredor Expresso Tiradentes. Esse estudo em um ambiente em operação revelou que a viabilidade dos ônibus elétricos depende tanto de parâmetros técnicos do veículo quanto de condições operacionais. Essa validação aproximou a tese da realidade operacional brasileira e fortaleceu a robustez das conclusões.

O quarto artigo examinou o sistema de trólebus da cidade de São Paulo, uma tecnologia elétrica consolidada, com 76 anos de operação. Foram quantificados os benefícios ambientais, a regularidade do serviço e a elevada disponibilidade operacional do sistema, demonstrando que tecnologias maduras tem suas vantagens quando comparadas as mais novas. Um exemplo é a confiabilidade, ou seja, em caso de falhas já existe um protocolo, especialmente em corredores estruturados onde é possível diluir seus custos operacionais.

Essa análise foi essencial para inserir uma perspectiva histórica, institucional e operacional no debate sobre eletrificação, permitindo comparar soluções maduras e emergentes sob o mesmo critério analítico e concluindo que todas são importantes e complementares para um projeto maior de transporte sustentável.

O quinto artigo integrou todos os resultados anteriores ao comparar trólebus e ônibus movidos a bateria e os ampliou ao incluir os ônibus movidos a hidrogênio e completar os modelos de ônibus zero emissões disponíveis. Foram considerados critérios como: eficiência energética, custos, infraestrutura necessária e adequação operacional. Essa análise consolidou a estrutura da tese e permitiu responder de forma direta e completa ao objetivo geral, identificando contextos de maior viabilidade para cada tecnologia.

Por fim, a convergência dos cinco artigos demonstra que o objetivo geral foi plenamente alcançado. Com cada estudo contribuindo de maneira específica e complementar para a construção de uma visão multidimensional da transição energética para ônibus de emissão zero no Brasil.

A transição para ônibus de emissão zero no Brasil é tecnicamente viável, ambientalmente desejável e socialmente necessária. Contudo, ela exige planejamento integrado, visão sistêmica e coordenação institucional. A cidade de São Paulo, possui uma estrutura de transporte consolidada e mesmo assim com desafios socioambientais, que constituem um laboratório único para consolidar essa transição.

Esta tese, ao integrar múltiplas metodologias e perspectivas, contribui para o avanço científico e para o aprimoramento das políticas públicas, oferecendo uma análise robusta que pode orientar o futuro da mobilidade urbana sustentável no Brasil.

5.2 Limitações e Trabalhos Futuros

Essa tese alcançou os objetivos propostos, contudo questões subjacentes foram observadas e não puderam ser analisadas no desenvolvimento da pesquisa. Nessa seção sugerem-se possíveis estudos para expandir esse trabalho, que podem se converter em melhorias para mobilidade sustentável.

No Artigo 1, a utilização de bases indexadoras (Scopus/Web of Science), pode não conter produção regional ou publicações governamentais relevantes para a temática. E ao fazer análise de coautoria usando termos padronizados podem não trazer produções que poderiam contribuir com esse estudo.

No Artigo 2, a metodologia AHP depende da atribuição de pesos e julgamentos subjetivos, mesmo que ainda fundamentados, podem interferir no resultado dependendo dos critérios.

No Artigo 3, as linhas do Expresso Tiradentes (5405-10 e 5109-10), possuem parâmetros operacionais singulares, devido ao BRT, podem não refletir o comportamento de outras linhas do sistema de ônibus municipal da cidade de São Paulo.

No Artigo 4, a análise se concentrou na rede atual de operação do município de São Paulo, não levando em consideração as linhas intermunicipais do corredor ABD (São Mateus – Jabaquara), tampouco os valores para implementação e expansão da rede atual.

No Artigo 5, a os diferentes graus de maturidade tecnológica dos modelos de ônibus zero emissão (Trólebus, ônibus a bateria e ônibus a hidrogênio) além de parâmetros operacionais de ônibus a hidrogênio que foram obtidos na Europa podem afetar a comparação direta entre os três modelos.

Há também limitações de ordem institucional e políticas públicas, como a falta de política sobre hidrogênio no Brasil e o modelo de contrato entre a prefeitura de São Paulo e os operadores de ônibus, que é subsidiado pelo poder público e não é replicável em outras cidades brasileiras. Esse estudo também não incorporou análises de impacto na saúde pública ou de mortalidade evitada o que poderia ampliar a compreensão dos benefícios ambientais da eletrificação, nem o impacto do descartes de baterias usadas pois ainda não há um protocolo sobre reciclagem e reutilização.

Também não foi incorporada a rápida evolução dos preços de baterias, hidrogênio verde e infraestruturas elétricas que podem alterar os resultados em curto prazo.

Por último, esse trabalho considerou apenas uma análise do Tanque a Roda (*Tank- to- Wheel*), desconsiderando as emissões de gases a montante do abastecimento dos veículos.

Como recomendações para trabalhos futuros sugerem - se as seguintes temáticas:

1. Uma análise da emissões do Poço a Roda (*Well-to Tank*), contemplando do Poço

ao Tanque (*Well-to-Tank*, ou a montante do abastecimento) e do Tanque-a-Roda (*Tank- to-Wheel*, ou jusante do abastecimento do veículo).

2. Modelagens integradas entre infraestrutura elétrica, demanda e programação operacional dos ônibus.
3. Estudos sobre governança, arranjos institucionais e modelos de contratação para frotas elétricas.
4. Estudos comparativos em múltiplas cidades brasileiras, ampliando a validade externa das conclusões.
5. Avaliação da autonomia, degradação de baterias e custos de manutenção em séries temporais longas.
6. Avaliação da reutilização/descarte de baterias veiculares.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Matriz elétrica brasileira alcança 200 GW**. 2024. Acesso em: 15 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>>.

AMICCI, A. G. N. *et al.* Guia TPC: orientações para seleção de tecnologias e implementação de projetos de transporte público coletivo. 2018. Disponível em: <<http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/14921>>.

ANTP. **Proposta para um transporte público eficiente, barato e com qualidade**. 2021. Disponível em: <<https://files.antp.org.br/2021/7/2/proposta-para-um-transporte-publico-eficiente-barato-e-com-qualidade.pdf>>.

ANTP. **Rotas tecnológicas de descarbonização para o transporte público**. 2024. Disponível em: <https://files.antp.org.br/2024/7/29/caderno-tecnico-29-rotas-tecnologicas-de-descarbonizacao-para-transporte-publico_2.pdf>.

ARANTES, F. **Cidade terá mais 13,9 km de faixas exclusivas para ônibus**. 2013. Disponível em: <<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/comunicacao/noticias/?p=157915>>.

ARANTES, F. **Corredor de ônibus na avenida Cidade Jardim beneficia 231 mil pessoas**. 2015. Disponível em: <<https://www.capital.sp.gov.br/noticia/corredor-de-onibus-na-avenida-cidade-jardim>>.

ARRHENIUS, S. XXXI. *On the influence of carbonic acid in the air upon the temperature of the ground*. **The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science**, v. 41, n. 251, p. 237–276, 1896. ISSN 1941-5982, 1941-5990. Disponível em: <<https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/14786449608620846>>.

AZEVEDO, J. **Combustíveis fósseis: tipos e impactos**. 2023. Disponível em: <<https://www.ecycle.com.br/combustiveis-fosseis/>>.

BANISTER, D. The sustainable mobility paradigm. **Transport Policy**, v. 15, n. 2, p. 73–80, 2008. ISSN 0967-070X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X07000820>>.

BARABINO, B.; FRANCESCO, M. D. Characterizing, measuring, and managing transit service quality. **Journal of Advanced Transportation**, v. 50, n. 5, p. 818–840, ago. 2016. ISSN 0197-6729, 2042-3195. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/atr.1377>>.

BASTOS, C. **Cidade Universitária terá a primeira estação de hidrogênio renovável a partir do etanol do mundo**. 2023. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/institucional/cidade-universitaria-tera-a-primeira-estacao-de-hidrogenio-renovavel-a-partir-do-etanol-do-mundo/>>.

BAZANI, A. **Ônibus a hidrogênio têm nova expansão na Alemanha: RVK faz quarta encomenda de modelos da Solaris para operar em Colônia – e no Brasil?** 2024. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2024/04/05/onibus-a-hidrogenio-tem-nova-expansao-na-alemanha-rvk-faz-quarta-encomenda-de-modelos-da-solaris-para-operar-em-colonia-e-no-brasil/>>.

BERNHARDT, J. **Vilnius – Riga – Tallinn: The Baltic capitals are increasingly focussing on electric buses.** 2024. Disponível em: <<https://www.urban-transport-magazine.com/en/vilnius-riga-tallinn-the-baltic-capitals-are-increasingly-focussing-on-electric-buses/>>.

BOROWIK, L.; CYWIŃSKI, A. Modernization of a trolleybus line system in Tychy as an example of eco-efficient initiative towards a sustainable transport system. **Journal of Cleaner Production**, v. 117, p. 188–198, 2016. ISSN 0959-6526. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0959652615017424>>.

BRASIL. **Acordo de Paris.** 2025. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/clima/convencao-das-nacoes-unidas/acordo-de-paris.html>>.

BURKE, A. F. *et al.* Projections of the costs of medium- and heavy-duty battery-electric and fuel cell vehicles (2020-2040) and related economic issues. **Energy for Sustainable Development**, v. 77, p. 101343, 2023. ISSN 0973-0826. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0973082623002004>>.

CAPOMACCIO, S. **Na cidade de SP, carros particulares são responsáveis por cerca de 73% dos gases de efeito estufa.** 2024. Acesso em: 15 nov. 2025. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/atualidades/na-cidade-de-sp-carros-particulares-sao-responsaveis-por-cerca-de-73-dos-gases-de-efeito-estufa/>>.

CARVALHO, C. H. R. d. Mobilidade urbana sustentável : conceitos, tendências e reflexões. <http://www.ipea.gov.br>, 2016. Disponível em: <<http://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/6637>>.

CATS, O.; WEST, J.; ELIASSON, J. A dynamic stochastic model for evaluating congestion and crowding effects in transit systems. **Transportation Research Part B: Methodological**, v. 89, p. 43–57, 2016. ISSN 0191-2615. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0191261516301643>>.

CEDER, A. **Public Transit Planning and Operation.** CRC Press, 2007. ISBN 978-0-429-21400-4. Disponível em: <<https://www.taylorfrancis.com/books/9780080549545>>.

CETESB. **Poluentes.** 2025. <<https://cetesb.sp.gov.br/ar/poluentes/>>. Acesso em: 15 nov. 2025.

DIAZ, L. B.; BOILLOT, L. **Historical analysis of Clean Hydrogen JU Fuel Cell Electric Vehicles, Buses and Refuelling Infrastructure Projects: evaluation of contribution towards the state of the art.** Publications Office of the European Union, 2024. ISBN 978-92-68-13418-4. Disponível em: <<https://data.europa.eu/doi/10.2760/892745>>.

DRUMM, F. C. *et al.* Poluição atmosférica proveniente da queima de combustíveis derivados do petróleo em veículos automotores. **Revista Eletrônica em Gestão, Educação e Tecnologia Ambiental**, v. 18, n. 1, p. 66–78, 2014. ISSN 22361170, 22361170. Disponível em: <<http://cascavel.ufsm.br/revistas/ojs-2.2.2/index.php/reget/article/view/10537>>.

E-BUS RADAR. **E-BUS RADAR – Ônibus Elétricos na América Latina**. 2025. <<https://ebusradar.org/pt/>>. Acesso em: 15 nov. 2025.

EMTU. **Empreendimentos - BRT - ABC**. 2025. Disponível em: <<https://www.emtu.sp.gov.br/emtu/empreendimentos/empreendimentos/brt-abc.fss>>.

FERREIRA, E. R. **Trólebus, espaço e sociedade**. 1995. Tese (Doutorado em Transportes) — Universidade de São Paulo, São Carlos, 1995. Disponível em: <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18137/tde-09042018-092133/>>.

FRANÇA, R. de; FLEURY, A. d. T. Implantação de ônibus com maior eficiência energética como evolução para o transporte público na cidade de São Paulo. 2023.

GIL, A. C. **Como Fazer Pesquisa Qualitativa**. 1. ed. Barueri: Atlas / Grupo GEN, 2022. 184 p. E-book, publicado em 20 de outubro de 2021. ISBN 9786559770489.

GOVERNO DO ESTADO DE SÃO PAULO. **SP inicia testes com primeiro ônibus articulado do mundo movido a baterias**. 2014. Publication Title: Governo do Estado de São Paulo. Disponível em: <<https://www.saopaulo.sp.gov.br/ultimas-noticias/sp-inicia-testes-com-primeiro-onibus-articulado-do-mundo-movido-a-baterias/>>.

GRIGORIEVA, O.; NIKULSHIN, A. Trolleybuses and trams in the urban public transport network of Russian regions: problems and prospects. **E3S Web of Conferences**, v. 371, p. 04019, 2023. ISSN 2267-1242. Disponível em: <<https://www.e3s-conferences.org/10.1051/e3sconf/202337104019>>.

GUNTER, M. *et al.* **Knowledge Brief: Infrastructure – In Motion Charging Trolleybus**. [S.l.], 2019. Relatório técnico, maio 2019. Depósito legal: D/2019/0107/3. Disponível em: <<https://www UITP.org/wp-content/uploads/sites/7/2025/04/Knowledge-Brief-Infrastructure-May-2019-FINAL.pdf>>.

HAMURCU, M.; EREN, T. Electric bus selection with multicriteria decision analysis for green transportation. **Sustainability**, MDPI, v. 12, n. 7, p. 2777, 2020. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/2071-1050/12/7/2777>>.

HANSEN, J. *et al.* Climate Impact of Increasing Atmospheric Carbon Dioxide. **Science**, v. 213, n. 4511, p. 957–966, 1981. ISSN 0036-8075, 1095-9203. Disponível em: <<https://www.science.org/doi/10.1126/science.213.4511.957>>.

HENSHER, D. A.; MULLEY, C. Modal image: candidate drivers of preference differences for BRT and LRT. **Transportation**, v. 42, n. 1, p. 7–23, jan. 2015. ISSN 0049-4488, 1572-9435. Disponível em: <<http://link.springer.com/10.1007/s11116-014-9516-7>>.

HENSHER, D. A.; WEI, E.; BALBONTIN, C. Comparative assessment of zero emission electric and hydrogen buses in Australia. **Transportation Research Part D: Transport**

and Environment, v. 102, p. 103130, jan. 2022. ISSN 1361-9209. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920921004259>.

IBAMA. **Programa de Controle de Emissões Veiculares (Proconve)**. 2022. <https://www.gov.br/ibama/pt-br/assuntos/emissoes-e-residuos/emissoes/programa-de-controle-de-emissoes-veiculares-proconve>. Acesso em: 15 nov. 2025.

IEA. **Energy technology perspectives 2020**. Paris, 2020.

HEMA. **Estudo sobre faixas exclusivas de ônibus – São Paulo/SP**. [S.l.], 2017. Relatório técnico. Avaliação de velocidade, consumo de combustível e emissões de poluentes em faixas exclusivas de ônibus. Disponível em: https://energiaeambiente.org.br/wp-content/uploads/2017/01/HEMA_faixasexclusivasdeonibus.pdf.

IMPACT ON URBAN HEALTH. **Air pollution and older people**. 2018. <https://urbanhealth.org.uk/insights/reports/air-pollution-and-older-people>.

IPCC. **About the IPCC**. 2025. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/about/>.

IPSOS. **Pesquisa “Viver nas Cidades – Mobilidade Urbana”**. [S.l.], 2025. Versão 1; 3.500 entrevistas em 10 capitais brasileiras. Disponível em: https://nossasaopaulo.org.br/wp-content/uploads/2019/02/Pesquisa-Viver-nas-Cidades-Mobilidade-Urbana_2025.pptx.pdf. Disponível em: https://nossasaopaulo.org.br/wp-content/uploads/2019/02/Pesquisa-Viver-nas-Cidades-Mobilidade-Urbana_2025.pptx.pdf.

ITDP. **Padrão de Qualidade BRT: 2024**. 2024. Relatório técnico. Disponível em: <https://itdp.org/wp-content/uploads/2024/03/Padrao-de-Qualidade-BRT-2024-SEPT.pdf>.

KUBOTA, F. *et al.* **Teses e dissertações em formato de coletânea de artigos: Identificação e análise de características fundamentais para uma estruturação robusta**. 2018. 14 p.

LANDGEIST. **Trolleybus Systems**. 2021. Disponível em: <https://landgeist.com/2021/07/04/trolleybus-systems/>.

LI, Y.; VOEGE, T. Mobility as a Service (MaaS): Challenges of Implementation and Policy Required. **Journal of Transportation Technologies**, v. 7, n. 2, p. 95–106, mar. 2017. Disponível em: <http://www.scirp.org/Journal/Paperabs.aspx?paperid=74675>.

LIN, Y. *et al.* Charging Network Planning for Electric Bus Cities: A Case Study of Shenzhen, China. **Sustainability**, v. 11, n. 17, p. 4713, 2019. ISSN 2071-1050. Number: 17 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/11/17/4713>.

LITMAN, T. **Evaluating Transportation Equity: Guidance for Incorporating Distributional Impacts in Transport Planning**. 2025. 80 p. Disponível em: <https://www.vtpi.org/equity.pdf>.

LIU, Z. *et al.* Research on the critical issues for power battery reusing of new energy vehicles in china. **Energies**, MDPI, v. 13, n. 8, p. 1932, 2020. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/8/1932>.

MACEDO, J. E. J. **Estudo de linha de trólebus em Natal**. 2017. 60 p. Trabalho de Conclusão de Curso — Curso de Engenharia Civil, Centro de Tecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2017.

MANABE, S.; WETHERALD, R. T. Thermal Equilibrium of the Atmosphere with a Given Distribution of Relative Humidity. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 24, n. 3, p. 241–259, 1967. ISSN 0022-4928, 1520-0469. Disponível em: <[http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0469\(1967\)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2](http://journals.ametsoc.org/doi/10.1175/1520-0469(1967)024<0241:TEOTAW>2.0.CO;2)>.

MARCONI, M. d. A.; LAKATOS, E. M. **Metodologia Científica**. 8. ed. Barueri: Atlas / Grupo GEN, 2022. 392 p. ISBN 9786559770656.

MEDEIROS, R.; SCABIN, D. **Efeito estufa**. 2023. Disponível em: <<https://semil.sp.gov.br/educacaoambiental/prateleira-ambiental/efeito-estufa/>>.

MEINSHAUSEN, M. *et al.* Greenhouse-gas emission targets for limiting global warming to 2 °C. **Nature**, v. 458, n. 7242, p. 1158–1162, 2009. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature08017>>.

MENDES, A. **Mortes devido à poluição aumentam 14% em dez anos no Brasil**. 2022. Disponível em: <<https://www.gov.br/saude/pt-br/assuntos/noticias/2019/junho/mortes-devido-a-poluicao-aumentam-14-em-dez-anos-no-brasil>>.

METRÔ-SP. **Pesquisa Origem e Destino 2023 — Relatório Síntese (Ebook Resultados)**. 2025. <https://transparencia.metrosp.com.br/sites/default/files/MetroSP_OD2023_Ebook_Resultados_0.pdf>. Acesso em: 15 nov. 2025.

MISHRA, A. K. Cities, transport and agglomeration: Addressing the urban mobility challenges in India. **Growth and Change**, v. 50, n. 3, p. 1115–1133, 2019. ISSN 1468-2257. Disponível em: <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/grow.12321>>.

MORAES, J. F. d. **Utilização da malha de rede de trólebus para recarga das baterias de ônibus elétricos**. 2025. Disponível em: <<https://diariodotransporte.com.br/2025/04/07/ouca-boletim-uma-alternativa-para-onibus-eletricos-em-sao-paulo-nao-ficarem-parados-nas-garagens-rede-de-trolebus-e-subutilizada-e-tem-energia-de-sobra-para-carregar-os-verdinhos/>>.

MOURA, B. de F. **Em grandes cidades, deslocamento é drama diário para o trabalhador**. 2024. Acesso em: 16 nov. 2025. Disponível em: <<https://agenciabrasil.ebc.com.br/direitos-humanos/noticia/2024-04/em-grandes-cidades-deslocamento-e-drama-diario-para-o-trabalhador>>.

NASSI-CALò, L. **Teses e dissertações: prós e contras dos formatos tradicional e alternativo**. 2016. Disponível em: <<https://blog.scielo.org/blog/2016/08/24/teses-e-dissertacoes-pros-e-contras-dos-formatos-tradicional-e-alternativo/#.Y3wFxHbMLIU>>.

NESPOLI, L. C. M. **Método de cálculo da prestação de serviço por ônibus elétrico a bateria**. 2023. Acesso em: 15 nov. 2025. Disponível em: <<https://files.antp.org.br/2023/10/30/metodo-de-calculo-da-prestacao-de-servico-por-onibus-eletrico-a-bateria.pdf>>.

NEXT MOBILIDADE. **Corredor ABD**. 2025. Disponível em: <<https://corredorabd.nextmobilidade.com.br/>>.

NTU. **NTU 30 anos**. Brasília: Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos, 2017. ISBN 978-85-69544-03-6.

NTU. **Centro de Documentação e Memória Eurico Divon Galhardi**. 1. ed. Brasília: Associação Nacional das Empresas de Transportes Urbanos - NTU, 2019. ISBN 978-85-66881-12-7.

NTU. **Anuário NTU: 2023–2024**. Brasília: NTU, 2024. 72 p. CDU 656.1/.5. ISSN 2317-8868.

NTU. **Anuário NTU: 2024–2025**. Brasília: NTU, 2025. 72 p. CDU 656.1/.5. ISSN 2317-8868.

OLIVEIRA, R. C. D. Panorama do hidrogênio no Brasil. 2022. Disponível em: <https://portalantigo.ipea.gov.br/portal/images/stories/PDFs/TDs/2787_218762_td_2787_web.pdf>.

ONU. Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável. v. 25, n. 1, p. 171–190, 2018. ISSN 2386-4362, 1887-2417. Disponível em: <<https://revistas.udc.es/index.php/RAS/article/view/ams.2018.25.1.4655>>.

ONU. **Poluição do ar causou 8,1 milhões de mortes em 2021**. 2024. Disponível em: <<https://news.un.org/pt/story/2024/06/1833321>>.

PHILLIPS, I.; KENLEY, R. **Verification of Intelligent Transportation Systems: Challenges And Possibilities**. 2022. 127-131 p.

POGGIO, A. E. *et al.* Monitored data and social perceptions analysis of battery electric and hydrogen fuelled buses in urban and suburban areas. **Journal of Energy Storage**, v. 72, p. 108411, 2023. ISSN 2352-152X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X2301808X>>.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Prefeitura testa ônibus a bateria que percorre 250 km com apenas uma recarga**. 2013. Disponível em: <<https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/comunicacao/noticias/?p=162604>>.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **PlanClima SP**. 2021. Publisher: Prefeitura da Cidade de São Paulo. Disponível em: <https://www.prefeitura.sp.gov.br/cidade/secretarias/governo/secretaria_executiva_de_mudancas_climaticas/aceso_a_informacao/acoes_e_programas/planclimasp/?p=315991>.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Frota Contratada**. 2025. Disponível em: <https://prefeitura.sp.gov.br/mobilidade/w/institucional/sptrans/aceso_a_informacao/245214>.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Legislação - Secretaria Municipal do Verde e do Meio Ambiente**. 2025. Disponível em: <https://prefeitura.sp.gov.br/web/meio_ambiente/w/comite_do_clima/legislacao/15090>.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Prefeito concretiza linha de crédito de US\$ 100 milhões com Banco da China para aquisição de mais ônibus elétricos.** 2025. Disponível em: <<https://capital.sp.gov.br/w/prefeito-concretiza-linha-de-cr%C3%A9dito-de-us-100-milh%C3%B5es-com-banco-da-china-para-aquisi%C3%A7%C3%A3o-de-mais-%C3%B4nibus-el%C3%A9tricos>>.

PREFEITURA DE SÃO PAULO. **Ônibus elétricos em São Paulo deixaram de emitir CO₂ equivalente ao plantio de 2,7 milhões de árvores.** 2025. <<https://prefeitura.sp.gov.br/w/%C3%B4nibus-el%C3%A9tricos-em-s%C3%A3o-paulo-deixaram-de-emitir-co2-equivalente-ao-plantio-de-2-7-milh%C3%B5es-de-%C3%A1rvores>>. Acesso em: 16 nov. 2025.

RICHARDSON, R. J. **Pesquisa Social – Métodos e Técnicas.** 4^a. ed. São Paulo: Atlas, 2017. ISBN 978-8597013832.

RITCHIE, H. Cars, planes, trains: where do co2 emissions from transport come from? **Our World in Data**, 2020. Disponível em: <<https://ourworldindata.org/co2-emissions-from-transport>>.

ROCKSTRÖM, J. *et al.* A safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, n. 7263, p. 472–475, 2009. ISSN 0028-0836, 1476-4687. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/461472a>>.

ROGELJ, J. *et al.* Paris Agreement climate proposals need a boost to keep warming well below 2 °C. **Nature**, v. 534, n. 7609, p. 631–639, 2016. ISSN 1476-4687. Publisher: Nature Publishing Group. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/nature18307>>.

ROGGE, M.; WOLLNY, S.; SAUER, D. U. Fast charging battery buses for the electrification of urban public transport — a feasibility study focusing on charging infrastructure and energy storage requirements. **Energies**, MDPI, v. 8, n. 5, p. 4587–4606, 2015. Disponível em: <<https://www.mdpi.com/1996-1073/8/5/4587>>.

SANT'ANNA, E.; QUEIROZ, T. **Prefeito quer acabar com trólebus em SP: vale a pena abandonar ônibus ligados à rede elétrica?** 2023. Disponível em: <<https://www.estadao.com.br/sustentabilidade/prefeito-quer-acabar-com-trolebus-em-sp-vale-a-pena-colocar-fim-nos-onibus-ligados-a-rede-eletrica/>>.

SANTOS, G. Road transport and CO2 emissions: What are the challenges? **Transport Policy**, v. 59, p. 71–74, 2017. ISSN 0967-070X. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0967070X17304262>>.

SCOTT, R. A.; GEORGE, B. T.; PRYBUTOK, V. R. A Public Transportation Decision-Making Model within a Metropolitan Area. **Decision Sciences**, v. 47, n. 6, p. 1048–1072, 2016. ISSN 1540-5915. Disponível em: <<https://www.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1111/dec.12203>>.

SERINI, R. **Aumento da Mistura de Biodiesel no Diesel: Riscos e Impactos para o Transporte Rodoviário de Cargas.** 2025. Acesso em: 16 nov. 2025. Disponível em: <<https://www.iptcsp.com.br/aumento-da-mistura-de-biodiesel-no-diesel-riscos-e-impactos-para-o-transporte-rodoviario-de-cargas/>>.

SHEN, X. Feasibility and economic analysis of electric vehicle battery secondary utilization to reduce wind and photovoltaic abandonment. **International Journal of Low-Carbon Technologies**, Oxford University Press, v. 19, p. 324–329, 2024. Disponível em: <<https://academic.oup.com/ijlct/article/19/2/324/7612225>>.

SILVA, C. P. D. Avaliação do impacto da propulsão elétrica e sistema BRT no consumo energético e emissões de CO₂ no transporte público no Distrito Federal. p. 90, 2020. Disponível em: <<http://educapes.capes.gov.br/handle/capes/952117>>.

SOLARIS BUS. **Solaris to deliver 41 trolleybuses to Lithuania's capital**. 2018. Disponível em: <<https://www.solarisbus.com/en/press/solaris-to-deliver-41-trolleybuses-to-lithuania-s-capital-887>>.

SPTRANS. **Relatório Integrado da Administração 2024**. 2025. Disponível em: <<https://www.sptrans.com.br/relatorio-integrado-da-administracao-2024/>>.

STOLZENBURG, K.; WHITEHOUSE, N.; WHITEHOUSE, S. **Ônibus Movidos A Hidrogénio: Melhores Práticas E Comercialização**. Bélgica, 2020.

SUMMIT MOBILIDADE URBANA. **Em Shenzhen, na China, 100% dos ônibus e táxis são elétricos**. 2020. Disponível em: <<https://summitmobilidade.estadao.com.br/ir-e-vir-no-mundo/em-shenzhen-na-china-100-dos-onibus-e-taxis-sao-eletricos/>>.

TEIXEIRA, Y. Mobilidade sustentável reduz poluição e atua contra a mudança climática. **Jornal da USP — Rádio USP**, jun 2025. Acesso em: 16 nov. 2025. Disponível em: <<https://jornal.usp.br/radio-usp/mobilidade-sustentavel-reduz-poluicao-e-atua-contr-a-mudanca-climatica/>>.

TENG, J.; CHEN, T.; FAN, W. D. Integrated approach to vehicle scheduling and bus timetabling for an electric bus line. **Journal of Transportation Engineering, Part A: Systems**, v. 146, n. 2, p. 04019073, 2020.

TZENG, G.; LIN, C.-W.; OPRICOVIC, S. Multi-criteria analysis of alternative-fuel buses for public transportation. **Energy Policy**, v. 33, n. 11, p. 1373–1383, 2005.

UITP. **Trolleybus**. 2023. Disponível em: <<https://www.uitp.org/topics/trolleybus/>>.

US EPA. Overviews and Factsheets, **Learn About Impacts of Diesel Exhaust and the Diesel Emissions Reduction Act (DERA)**. 2015. Disponível em: <<https://www.epa.gov/dera/learn-about-impacts-diesel-exhaust-and-diesel-emissions-reduction-act-dera>>.

VASCONCELLOS, E. A. d. Mobilidade cotidiana, segregação urbana e exclusão. In: BALBIM, R. N. O.; KRAUSE, C.; LINKE, C. C. (ed.). **Cidade e Movimento: mobilidades e interações no desenvolvimento urbano**. Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) / ITDP, 2016. p. 57–79. Disponível em: <<https://repositorio.ipea.gov.br/server/api/core/bitstreams/ffaadca6-de57-4b30-a994-a807a917dd66/content>>.

VAZ, L. F. H.; BARROS, D. C.; CASTRO, B. H. R. d. Veículos híbridos e elétricos: sugestões de políticas públicas para o segmento. **BNDES Setorial**, BNDES, Rio de Janeiro, n. 41, p. 295–344, mar. 2015. Disponível em: <<https://>>

[//web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4284/1/BS%2041_Ve%C3%ADculos%20h%C3%ADbridos%20e%20el%C3%A9tricos_P.pdf](http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/bitstream/1408/4284/1/BS%2041_Ve%C3%ADculos%20h%C3%ADbridos%20e%20el%C3%A9tricos_P.pdf)>.

WANG, Y. *et al.* Optimal recharging scheduling for urban electric buses: A case study in davis. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 100, p. 115–132, 2017.

WANG, Y. *et al.* Polymer electrolyte membrane fuel cell and hydrogen station networks for automobiles: Status, technology, and perspectives. **Advances in Applied Energy**, v. 2, p. 100011, 2021. ISSN 2666-7924. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2666792421000044>>.

WOLFF, C. S. O método ahp – revisão conceitual e proposta de simplificação. **PUC-Rio**, 2008. Disponível em: https://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/12401/12401_1.PDF>.

WWF-BRASIL. **Impactos ambientais do petróleo pressionam o setor para a energia limpa**. 2022. Disponível em: <https://www.wwf.org.br/?84444/impactos-ambientais-do-petroleo-pressionam-o-setor-para-a-energia-limpa>>.

XYLIA, M. *et al.* Impact of bus electrification on carbon emissions: The case of stockholm. **Journal of Cleaner Production**, v. 209, p. 74–87, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.10.085>>.

YIGITCANLAR, T. Towards Smart and Sustainable Urban Electromobility: An Editorial Commentary. **Sustainability**, v. 14, n. 4, p. 2264, 2022. ISSN 2071-1050. Number: 4 Publisher: Multidisciplinary Digital Publishing Institute. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/14/4/2264>>.