



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO ENGENHARIA DE
PRODUÇÃO**



CAIO MIRANDA SHIMOMURA

**ELETRIFICAÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS PARA O
TRANSPORTE PÚBLICO DE UMA CIDADE DE
MÉDIO PORTE UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA COMO FONTE DE SUPRIMENTO**

**OURO PRETO
2026**

CAIO MIRANDA SHIMOMURA

**ELETRIFICAÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS PARA O
TRANSPORTE PÚBLICO DE UMA CIDADE DE
MÉDIO PORTE UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA COMO FONTE DE SUPRIMENTO**

Monografia apresentada ao Curso de Graduação em
Engenharia de Produção da Universidade Federal de
Ouro Preto como requisito parcial para a obtenção do
título de Engenheiro de Produção.

Orientador: Dr. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura

OURO PRETO
2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

S556e Shimomura, Caio Miranda.

Eletrificação da frota de ônibus para o transporte público de uma cidade de médio porte utilizando a energia solar fotovoltaica como fonte de suprimento. [manuscrito] / Caio Miranda Shimomura. - 2026.
68 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientador: Prof. Dr. Gustavo Nikolaus Pinto de Moura.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia de Produção .

1. Transporte. 2. Geração de energia fotovoltaica. 3. Redução de gases do efeito estufa. 4. Planejamento Energético Integrado (PEI). 5. Automóveis elétricos - Veículos a motor - Frotas. I. Moura, Gustavo Nikolaus Pinto de. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU 658.5

Bibliotecário(a) Responsável: Maristela Sanches Lima Mesquita - CRB-1716



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE PRODUÇÃO,
ADMINISTRAÇÃO E ECON



FOLHA DE APROVAÇÃO

CAIO MIRANDA SHIMOMURA

**ELETRIFICAÇÃO DA FROTA DE ÔNIBUS PARA O
TRANSPORTE PÚBLICO DE UMA CIDADE DE
MÉDIO PORTE UTILIZANDO A ENERGIA SOLAR
FOTOVOLTAICA COMO FONTE DE SUPRIMENTO**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Produção da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Produção.

Aprovada em 3 de setembro de 2026

Membros da banca

D.Sc. - Gustavo Nikolaus Pinto de Moura - Orientador(a) Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc - Bruna de Fátima Pedrosa Guedes Flausino - Universidade Federal de Ouro Preto
D.Sc - Mateus Pereira Lavorato - Universidade Federal de Ouro Preto

Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 21/09/2026



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Nikolaus Pinto de Moura, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 21/09/2026, às 17:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1196728** e o código CRC **D89FE552**.

AGRADECIMENTOS

Utilizo esta seção de agradecimentos para ressaltar que não fazemos nada sozinhos. Cada passo dado nesta etapa, que se encerra com a apresentação do presente trabalho, foi incentivado, acompanhado e aplaudido por cada uma das pessoas a quem dedico estas palavras.

Em primeiro lugar, agradeço a Deus por ter me reservado tantas graças ao longo da minha vida. Cada experiência, cada pessoa e até mesmo cada pedra no caminho foram fundamentais para o meu crescimento. Obrigado pela bênção da vida e pela saúde para apreciá-la.

Agradeço à minha família, meu lugar no mundo, onde me formei como homem. Aos meus pais, Eliane e Carlos Itiro, obrigado por sempre me motivarem a buscar aquilo que almejo e por investirem na realização dos meus sonhos. Aos meus irmãos, obrigado por sempre acreditarem em mim. Espero que eu possa inspirá-los a correr atrás de seus próprios objetivos. Às minhas avós, obrigado pela motivação e pelo orgulho que sempre demonstram ter de mim.

Agradeço aos meus amigos, extensão da minha família. Ao Igor, à Dani e ao Matheus, obrigado por todo o apoio até aqui, vocês fazem parte disso e de quem eu sou. Ao Vinicius e ao Bernardo, obrigado pela força durante todo este percurso que agora se encerra, vocês foram fundamentais em cada etapa dele. Ao Qualidade Duvidosa, obrigado por tornarem tudo isso mais leve e divertido. À Júlia, à Lara e ao Léo, obrigado pela amizade de sempre!

Agradeço à Escola de Minas e à Universidade Federal de Ouro Preto pela formação de excelência e por todas as oportunidades proporcionadas ao longo desta trajetória acadêmica. Agradeço também aos professores pela amizade, pelo compromisso e pelo compartilhamento de conhecimentos e experiências. Ao professor Gustavo Nikolaus, meu agradecimento especial pela orientação e pelo apoio durante a realização deste trabalho de conclusão.

Por fim, agradeço ao Caio pela perseverança e pela força para chegar até aqui. Mais uma conquista alcançada, e não pararemos por aqui. Vamos por mais!

*"Consagre ao Senhor tudo o que você faz,
e os seus planos serão bem-sucedidos".*

Provérbios 16:3

RESUMO

Este trabalho analisa a viabilidade técnica, econômica e ambiental da eletrificação da frota de ônibus do transporte público de Mariana, Minas Gerais, associada à geração de energia solar fotovoltaica, sob a perspectiva do Planejamento Energético Integrado. Foram avaliados cenários de eletrificação parcial e total da frota, modelados no *software* HOMER Pro e comparados ao sistema atual movido a diesel, considerando um horizonte de 20 anos e diferentes condições de financiamento. Os resultados demonstraram que a eletrificação é tecnicamente viável e proporciona significativa redução das emissões de gases de efeito estufa. No cenário de eletrificação parcial, as emissões acumuladas foram reduzidas de 25.680 para aproximadamente 12,4 mil tCO₂eq, enquanto a eletrificação total resultou em cerca de 1,7 mil tCO₂eq. Em contrapartida, os indicadores econômicos apresentaram elevada sensibilidade às taxas de juros. Para a taxa de 6,92% a.a., o *Payback* ocorreu no 14º ano, com TIR de 3%; para 9,19% a.a., o retorno ocorreu no 18º ano, com TIR de 1%; e, para 15% a.a., não houve recuperação do investimento no período analisado. Conclui-se que a eletrificação apresenta benefícios técnicos e ambientais relevantes, porém sua atratividade econômica depende de condições de financiamento mais favoráveis e de mecanismos de incentivo à transição energética.

Palavras-chave: Planejamento Energético Integrado; Eletrificação de Frotas; Transporte Público; Energia Solar Fotovoltaica; Descarbonização.

ABSTRACT

This study analyzes the technical, economic, and environmental feasibility of electrifying the public bus fleet in Mariana, Minas Gerais, Brazil, combined with photovoltaic solar power generation, from an Integrated Energy Planning perspective. Partial and full fleet electrification scenarios were evaluated using the HOMER Pro software and compared with the current diesel-powered system, considering a 20-year planning horizon and different financing conditions. The results showed that electrification is technically feasible and can significantly reduce greenhouse gas emissions. In the partial electrification scenario, cumulative emissions decreased from 25,680 to approximately 12.4 thousand tCO₂eq, while full electrification resulted in approximately 1.7 thousand tCO₂eq. However, the economic indicators proved highly sensitive to interest rates. At an annual interest rate of 6.92%, the payback period was 14 years, with an Internal Rate of Return (IRR) of 3%; at 9.19% per year, the payback period was 18 years, with an IRR of 1%; and at 15% per year, the investment was not recovered within the analyzed period. The study concludes that fleet electrification offers relevant technical and environmental benefits, although its economic attractiveness depends on more favorable financing conditions and incentive mechanisms to support the energy transition.

Keywords: Integrated Energy Planning; Fleet Electrification; Public Transportation; Photovoltaic Solar Energy; Decarbonization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Participação dos setores no consumo final de energia no Brasil (2024).....	24
Figura 2 – Emissões de CO ₂ equivalente por setor relacionadas ao uso da energia no Brasil (2024).....	24
Figura 3 – Viagens anuais realizadas por ônibus segundo o porte dos municípios brasileiros em 2024	26
Figura 4 – Opções necessárias para o retorno ao uso do ônibus como meio de deslocamento	27
Figura 5 – Grau de satisfação dos usuários com os atributos dos ônibus elétricos testados em Curitiba	29
Figura 6 – Estoque de outros veículos elétricos no Cenário de Políticas Declaradas	32
Figura 7 – Evolução dos preços médios dos pacotes de baterias por tecnologia 2020/2025 ...	34
Figura 8 – Índice de preços médios dos pacotes de baterias por região 2020/2025.....	35
Figura 9 – Evolução do custo nivelado de energia (LCOE) da energia solar fotovoltaica ao longo dos anos	38
Figura 10 – Interface do <i>software</i> HOMER Pro utilizada para georreferenciamento e obtenção dos dados solares do município de Mariana/MG	39
Figura 11 – Modelo de ônibus utilizado pela Transcotta em Mariana	44
Figura 12 – Frota de ônibus elétricos BYD D9W em São Paulo	45
Figura 13 – Imagem representativa de estação de recarga de ônibus elétricos em São José dos Campos	46
Figura 14 – Imagem representativa de usina solar de 1MWp – UFV Candelária, Rio Grande do Sul	50

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Cálculo do tempo de carregamento dos veículos	46
Tabela 2 – Curvas de carga para os cenários alternativos	47
Tabela 3 – Premissas técnicas do projeto	47
Tabela 4 – Premissas econômicas do projeto	48
Tabela 5 – Resumo dos resultados das simulações	49
Tabela 6 – Resumo das entradas para a análise de investimentos	51
Tabela 7 – Resumo dos resultados obtidos das análises de investimento	52
Tabela 8 – Fluxo de caixa ano a ano	53
Tabela 9 – Resumo do custo por tonelada de CO ₂ evitada.....	55

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

a.a.	Ao ano
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
ANTP	Associação Nacional de Transportes Públicos
ARLA 32	Agente Redutor Líquido Automotivo 32
BNDES	Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social
BYD	<i>Build Your Dreams</i>
CAPEX	<i>Capital Expenditure</i>
CATL	<i>Contemporary Amperex Technology Co., Limited</i>
CCS2	<i>Combined Charging System Type 2</i>
CEMIG	Companhia Energética de Minas Gerais
CNT	Confederação Nacional do Transporte
CO ₂	Dióxido de carbono
CO _{2eq}	Dióxido de carbono equivalente
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
HOMER	<i>Hybrid Optimization Model for Electric Renewables</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
ICCT	<i>International Council on Clean Transportation</i>
IEA	<i>International Energy Agency</i>
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
IRENA	<i>International Renewable Energy Agency</i>
ITDP	<i>Institute for Transportation and Development Policy</i>
LCOE	<i>Levelized Cost of Energy</i>

LED	<i>Light-Emitting Diode</i>
LFP	Lítio-ferro-fosfato
NMC	Níquel-manganês-cobalto
O&M	Operação e manutenção
OPEX	<i>Operational Expenditure</i>
PAC	Programa de Aceleração do Crescimento
PEI	Planejamento Energético Integrado
PLAC-BH	Plano Local de Ação Climática de Belo Horizonte
PlanClima SP	Plano de Ação Climática do Município de São Paulo
SELIC	Sistema Especial de Liquidação e de Custódia
SIMOB	Sistema de Informações da Mobilidade Urbana
SPTrans	São Paulo Transporte S.A.
TCO	<i>Total Cost of Ownership</i>
TIR	Taxa Interna de Retorno
TLP	Taxa de Longo Prazo
VPL	Valor Presente Líquido
WRI	<i>World Resources Institute</i>
ZEBRA	<i>Zero Emission Bus Rapid-deployment Accelerator</i>

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	13
1.1	Formulação do Problema	14
1.2	Justificativa	14
1.3	Objetivos.....	15
1.3.1	Objetivo Geral.....	15
1.3.2	Objetivos Específicos	15
1.4	Estrutura do Trabalho.....	16
2	METODOLOGIA.....	18
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	20
3.1	Planejamento Energético Integrado.....	20
3.2	Transição Energética e o Papel do Poder Público	20
3.2.1	Planos de Ação Climática e Transição no Brasil	21
3.2.2	Planejamento Climático em Cidades Internacionais	22
3.3	Instrumentos de Atuação do Poder Público na Transição Energética	22
3.4	Transporte Urbano e Descarbonização	23
3.5	Transporte Público de Pessoas	25
3.5.1	Qualidade do Serviço e Atração de Passageiros	26
3.5.2	Eletrificação da Frota como Estratégia de Modernização	28
3.6	Eficiência Energética no Transporte Público	30
3.7	Panorama Tecnológico e Industrial do Mercado de Ônibus Elétricos	31
3.7.1	Expansão Mundial e Liderança Chinesa.....	31
3.7.2	Mercado Brasileiro e Indústria Nacional	33
3.7.3	Evolução e Perspectivas dos Custos	33
3.8	Desafios para a Eletrificação do Transporte Público.....	36

3.9	Energia Solar Fotovoltaica	37
3.9.1	Marco Regulatório da Micro e Minigeração Distribuída.....	39
3.10	Infraestrutura de Recarga para Veículos Elétricos	40
3.11	Análise Econômica de Projetos Energéticos	42
4	CENÁRIOS ENERGÉTICOS.....	43
4.1	Apresentação dos Cenários.....	43
4.2	Premissas para a Caracterização da Frota de Ônibus Atual	44
4.3	Premissas e Definição da Dinâmica de Recarga	45
4.4	Curvas de Cargas Elétricas.....	46
4.5	Premissas Técnicas e Econômicas do Projeto	47
4.6	Resultados das Simulações.....	48
4.7	Análise de Investimento dos Cenários.....	51
4.8	Avaliação Direta do Custo por Tonelada de CO ₂ Evitada.....	55
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS	56
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60

1 INTRODUÇÃO

A matriz energética brasileira destaca-se mundialmente pela elevada participação de fontes renováveis, que atingiu 49,1% da Oferta Interna de Energia em 2024. Entretanto, o setor de transportes ainda apresenta forte dependência de derivados de petróleo, com destaque para o óleo diesel, responsável por aproximadamente 44% do consumo nacional desses combustíveis (EPE, 2025). Embora o Brasil seja um importante produtor de petróleo, limitações na capacidade de refino tornam necessária a importação de parcela significativa do diesel consumido no país, aumentando a vulnerabilidade do setor às oscilações do mercado internacional e às variações da taxa de câmbio (EPE, 2024).

Nesse contexto, o setor de transportes representa aproximadamente 33% do consumo final de energia do país, consolidando-se como um dos principais consumidores de energia da matriz brasileira. Além disso, foi responsável pela emissão de 214,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente em 2024, evidenciando seu papel estratégico nas políticas de descarbonização e na transição para sistemas energéticos mais sustentáveis (EPE, 2025).

Entre as alternativas para enfrentar esses desafios destaca-se a eletrificação do transporte público. Sob a perspectiva do Planejamento Energético Integrado (PEI), a substituição da frota convencional por veículos elétricos permite avaliar de forma integrada a demanda energética, a oferta de energia, os aspectos econômicos e os impactos ambientais do sistema. Quando associada à geração de eletricidade por fontes renováveis, como a energia solar fotovoltaica, essa estratégia amplia a utilização de recursos energéticos renováveis e reduz a dependência do óleo diesel (EPE, 2020b; IRENA, 2024).

Diante desse cenário, o presente trabalho analisa a viabilidade técnica, econômica e ambiental da substituição parcial e total da frota de ônibus do transporte público urbano do município de Mariana, Minas Gerais, cidade natal do autor, por veículos elétricos abastecidos por um sistema de geração de energia solar fotovoltaica. Para isso, diferentes cenários são simulados por meio do *software* HOMER Pro, permitindo comparar alternativas de eletrificação sob a perspectiva técnica, econômica e ambiental.

A escolha do HOMER Pro foi fundamentada na utilização da ferramenta durante a disciplina de Planejamento Energético Integrado e em sua ampla aplicação em estudos de planejamento de sistemas energéticos. Entre trabalhos relevantes, destacam-se *Optimization and Designing of Hybrid Power System Using HOMER Pro*, de Khalil *et al.* (2021), que empregou o *software* na otimização de diferentes configurações de

sistemas híbridos, considerando custos e emissões, e *Hybrid Renewable Energy Optimization Using HOMER Pro: A Systematic Literature Review and Future Research Agenda for Emerging Economies*, de Nwachukwu *et al.* (2026), que evidencia, a partir de uma revisão sistemática, sua utilização na modelagem e avaliação de sistemas com fontes renováveis.

1.1 Formulação do Problema

O problema central desta pesquisa consiste em avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da eletrificação parcial e total da frota de transporte público urbano do município de Mariana, Minas Gerais, por meio da integração entre uma fazenda solar fotovoltaica dedicada, sistemas de armazenamento de energia e a rede elétrica convencional. Busca-se investigar se essa configuração energética é capaz de atender à demanda da frota e constituir uma alternativa sustentável e economicamente viável para municípios de pequeno e médio porte.

1.2 Justificativa

Embora a eletrificação do transporte público venha sendo amplamente discutida como uma alternativa para reduzir o consumo de combustíveis fósseis e as emissões de gases de efeito estufa, a maior parte das pesquisas disponíveis concentra-se em grandes centros urbanos e regiões metropolitanas, onde a elevada demanda de passageiros, a infraestrutura existente e a maior capacidade de investimento favorecem a implementação dessa tecnologia (EPE, 2020a; IEA, 2025).

Essa concentração torna-se particularmente relevante quando analisada a distribuição dos municípios brasileiros. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), o Brasil possui 5.570 municípios, dos quais 3.770 (67,7%) apresentavam população inferior a 20 mil habitantes em 2021. Em contrapartida, apenas 326 municípios (5,8%) possuíam população superior a 100 mil habitantes, embora concentrassem aproximadamente 57,7% da população brasileira (IBGE, 2021). Esses dados demonstram que a realidade municipal brasileira é predominantemente composta por cidades de pequeno e médio porte, indicando que soluções desenvolvidas para grandes centros nem sempre podem ser diretamente extrapoladas para a maioria dos municípios do país.

Inserido nesse contexto, o município de Mariana, Minas Gerais, constitui um estudo de caso representativo. Com aproximadamente 65 mil habitantes, segundo a estimativa do Tribunal de Contas da União, o município apresenta características típicas

de cidades de médio porte, como frota de transporte coletivo relativamente reduzida, limitações orçamentárias para investimentos em infraestrutura e elevado potencial para geração de energia solar fotovoltaica. Essas condições permitem avaliar a aplicação de soluções de eletrificação em um contexto mais próximo da realidade predominante dos municípios brasileiros.

Diferentemente da maior parte dos estudos encontrados na literatura, esta pesquisa avalia a eletrificação do transporte público sob a perspectiva do Planejamento Energético Integrado, considerando de forma integrada a geração fotovoltaica, os sistemas de armazenamento de energia e a interação com a rede elétrica. Essa abordagem permite analisar simultaneamente critérios técnicos, econômicos e ambientais, contribuindo para uma avaliação mais abrangente da viabilidade da modernização do transporte público.

Dessa forma, espera-se que os resultados obtidos ampliem o conhecimento sobre a aplicação do Planejamento Energético Integrado em sistemas de transporte público de municípios de pequeno e médio porte, oferecendo subsídios técnicos para gestores públicos, concessionárias e pesquisadores na tomada de decisão sobre projetos de eletrificação de frotas associados à geração distribuída de energia solar. Além disso, o trabalho poderá servir como referência para outros municípios brasileiros com características semelhantes às de Mariana, contribuindo para o desenvolvimento de políticas e estratégias voltadas à promoção de uma mobilidade urbana mais eficiente, sustentável e energeticamente resiliente.

1.3 Objetivos

1.3.1 Objetivo Geral

Analisar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da modernização do transporte público da cidade de Mariana, considerando cenários em que a frota atual, convencionalmente movida à óleo diesel, é substituída, total ou parcialmente, por frota movida a ônibus elétricos supridos por uma usina solar fotovoltaica dedicada.

1.3.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos foram:

- Caracterizar o sistema atual de transporte público urbano do município de Mariana, levantando informações referentes à frota, rotas, demanda energética e consumo de óleo diesel;
- Dimensionar e otimizar, por meio do *software* HOMER Pro, um sistema híbrido

de geração de energia capaz de suprir a demanda energética da frota elétrica em diferentes cenários de eletrificação;

- Simular cenários de substituição parcial e total da frota convencional por ônibus elétricos, avaliando os impactos técnicos, econômicos e ambientais de cada alternativa;
- Avaliar indicadores econômicos dos cenários propostos;
- Comparar os cenários simulados quanto ao consumo energético, emissões de gases de efeito estufa e viabilidade técnico-econômica, identificando a alternativa mais adequada para o município de Mariana.

1.4 Estrutura do Trabalho

O presente trabalho foi estruturado nos seguintes capítulos:

- **Introdução:** apresenta os objetivos e a justificativa deste trabalho;
- **Metodologia:** descreve os procedimentos adotados para o desenvolvimento da pesquisa, incluindo o levantamento e a caracterização dos dados do sistema de transporte público de Mariana, a definição dos cenários de eletrificação da frota e a utilização do *software* HOMER Pro para a modelagem, simulação e otimização do sistema energético proposto;
- **Revisão Bibliográfica:** apresenta os principais conceitos relacionados ao Planejamento Energético Integrado, à transição energética, à descarbonização do transporte urbano, à eficiência energética, à eletrificação de ônibus, à geração solar fotovoltaica, à infraestrutura de recarga e à análise econômica de projetos energéticos. Também são discutidos os desafios institucionais e financeiros associados à eletrificação do transporte público;
- **Cenários Energéticos:** apresenta a caracterização do sistema atual de transporte coletivo de Mariana e a análise dos cenários de referência, de eletrificação parcial e de eletrificação total da frota. O capítulo contempla as premissas técnicas e econômicas, as curvas de carga, o dimensionamento do sistema fotovoltaico e os resultados das análises energética, econômica e ambiental;
- **Conclusões e Recomendações Finais:** sintetiza os principais resultados obtidos, avalia a viabilidade técnica, econômica e ambiental da eletrificação da frota

associada à geração solar fotovoltaica e apresenta as limitações da pesquisa e as recomendações para trabalhos futuros.

2 METODOLOGIA

A presente pesquisa caracteriza-se como aplicada, pois busca avaliar uma solução para a modernização do sistema de transporte público urbano por meio da integração entre a eletrificação da frota e a geração de energia solar fotovoltaica. Quanto à abordagem, trata-se de uma pesquisa quali-quantitativa, uma vez que combina a análise técnica dos sistemas energéticos com a avaliação quantitativa de indicadores econômicos, energéticos e ambientais. Em relação aos objetivos, a pesquisa possui caráter exploratório e descritivo, fundamentando-se em revisão bibliográfica, levantamento documental e simulação computacional.

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica com o objetivo de reunir os principais conceitos relacionados à transição energética, eficiência energética, energia solar fotovoltaica, eletromobilidade, infraestrutura de recarga e análise econômica de projetos energéticos. Para essa etapa, foram consultados artigos científicos, documentos técnicos e relatórios publicados por instituições nacionais e internacionais reconhecidas, tais como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), a *International Energy Agency* (IEA), a *International Renewable Energy Agency* (IRENA), a Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP), o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), fornecendo o embasamento teórico necessário ao desenvolvimento da pesquisa.

Na etapa de levantamento de dados, foram utilizados os documentos técnicos referentes ao processo de concessão do transporte coletivo urbano do município de Mariana, disponibilizados pela Prefeitura Municipal de Mariana. Esses documentos forneceram informações sobre a frota de veículos, quilometragem percorrida, consumo de óleo diesel, custos operacionais, características das linhas e demais parâmetros necessários para caracterizar o sistema atual de transporte público e estabelecer o cenário de referência da pesquisa. Para fins deste estudo, foram consideradas exclusivamente as linhas classificadas como urbanas, sendo desconsideradas as linhas distritais e intermunicipais e demais serviços que não integram o recorte urbano adotado (MARIANA, 2023).

A modelagem do sistema energético foi realizada utilizando o *software* HOMER Pro (*Hybrid Optimization Model for Electric Renewables*), amplamente empregado em estudos de planejamento energético para simulação, otimização e análise econômica de sistemas híbridos de geração de energia. Este modelo energético permite avaliar diferentes configurações compostas por fontes de geração, sistemas de armazenamento e conexão à rede elétrica, identificando a solução de menor custo ao longo do horizonte

de planejamento estabelecido, considerando simultaneamente critérios técnicos, econômicos e ambientais (HOMER *ENERGY*, 2025).

Com base nos dados levantados, foram desenvolvidos diferentes cenários de eletrificação da frota, contemplando a substituição parcial e total dos ônibus convencionais por veículos elétricos alimentados por um sistema de geração solar fotovoltaica dedicado. As simulações consideraram a interação entre geração fotovoltaica, banco de baterias e rede elétrica, permitindo avaliar o comportamento energético do sistema diante de diferentes configurações operacionais.

Por fim, os cenários simulados foram comparados por meio de indicadores técnicos, econômicos e ambientais, incluindo investimento inicial (*Capital Expenditure* – CAPEX), custos operacionais (*Operational Expenditure* – OPEX), Valor Presente Líquido (VPL), Taxa Interna de Retorno (TIR), tempo de retorno do investimento (*Payback Time*), e emissões de dióxido de carbono equivalente (CO₂eq) para o horizonte de 20 anos de projeto.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Planejamento Energético Integrado

O Planejamento Energético Integrado (PEI) consiste em uma abordagem que busca avaliar, de forma conjunta, as alternativas de oferta e demanda de energia, considerando aspectos técnicos, econômicos, sociais e ambientais. Diferentemente do planejamento convencional, que frequentemente prioriza apenas a expansão da oferta energética, o PEI incorpora critérios de eficiência, sustentabilidade e uso racional dos recursos, permitindo uma avaliação mais abrangente das alternativas energéticas disponíveis (SILVA; BERMANN, 2002).

O processo de PEI envolve a caracterização do sistema energético, a projeção da demanda futura, a identificação das alternativas tecnológicas disponíveis e a avaliação de seus impactos. Com base nessas informações, são elaborados cenários que subsidiam a definição de estratégias capazes de atender às necessidades energéticas com maior eficiência e menores impactos ambientais (FERREIRA; MACHADO, 2021). Essa abordagem possibilita analisar diferentes configurações do sistema energético e comparar seus resultados sob múltiplos critérios, apoiando a tomada de decisão em contextos de elevada complexidade.

Além de contribuir para a segurança do suprimento energético, o PEI está diretamente relacionado aos princípios do desenvolvimento sustentável, uma vez que busca conciliar crescimento econômico, preservação ambiental e atendimento às demandas da sociedade. Nesse contexto, a incorporação de fontes renováveis e tecnologias mais eficientes torna-se um dos principais instrumentos para reduzir emissões e promover uma matriz energética mais sustentável (SILVA; CÂNDIDO, 2015).

3.2 Transição Energética e o Papel do Poder Público

A transição energética consiste no processo de transformação dos sistemas de produção, distribuição e consumo de energia, caracterizado pela substituição gradual de fontes fósseis por fontes renováveis, pela ampliação da eficiência energética e pela adoção de tecnologias de baixa emissão de carbono. Esse processo busca atender às crescentes demandas energéticas da sociedade de forma ambientalmente sustentável, contribuindo para a mitigação das mudanças climáticas, o fortalecimento da segurança

energética e a promoção do desenvolvimento econômico e social (EPE, 2020b; IRENA, 2024; IPCC, 2022).

A implementação da transição energética depende da atuação coordenada de governos, empresas e sociedade. Nesse contexto, o poder público exerce papel estratégico ao formular políticas públicas, estabelecer metas, promover investimentos e incorporar critérios de sustentabilidade no planejamento dos serviços públicos. Nas últimas décadas, diversos municípios passaram a elaborar planos de ação climática como instrumento para orientar políticas voltadas à redução das emissões de gases de efeito estufa, à eficiência energética, à expansão do uso de fontes renováveis de energia e ao desenvolvimento de sistemas urbanos mais resilientes.

3.2.1 Planos de Ação Climática e Transição no Brasil

No Brasil, os planos municipais de ação climática vêm sendo utilizados como instrumentos para organizar metas de mitigação, adaptação e desenvolvimento urbano sustentável. Entre os principais exemplos estão o Plano de Ação Climática do Município de São Paulo (PlanClima SP) e o Plano Local de Ação Climática de Belo Horizonte (PLAC-BH), que integram ações relacionadas à mobilidade, energia, edificações, resíduos e infraestrutura urbana.

O PlanClima SP estabelece metas específicas para a descarbonização das frotas públicas. Em relação aos níveis de 2016, o município prevê reduzir, até 2028, 50% das emissões de CO₂ fóssil, 90% do material particulado e 80% dos óxidos de nitrogênio. Para 2038, a meta é eliminar as emissões de CO₂ fóssil e reduzir em 95% as emissões de material particulado e óxidos de nitrogênio. O plano também prevê medidas voltadas à ampliação dos corredores de ônibus, à redução dos tempos de viagem, à melhoria da acessibilidade e ao conforto dos usuários, demonstrando que a eletrificação da frota deve estar associada à melhoria da qualidade do serviço prestado (SÃO PAULO, 2025).

Além da mobilidade, o PlanClima SP contempla ações de eficiência energética, ampliação do uso de fontes renováveis, gestão de resíduos e incorporação de critérios climáticos ao planejamento municipal. Essa abordagem evidencia que a transição energética exige a atuação integrada de diferentes áreas da administração pública, e não apenas a substituição de tecnologias ou combustíveis.

Em Belo Horizonte, o PLAC-BH estabelece a meta de reduzir as emissões municipais em 40% até 2040 e alcançar emissões líquidas zero até 2050. O plano identifica a mobilidade como um dos setores com maior potencial de mitigação e prevê medidas como ampliação de faixas exclusivas, criação de zonas de baixas emissões e substituição progressiva da frota coletiva por veículos menos poluentes. No setor energético, são propostas ações de eficiência em escolas e unidades municipais de saúde,

implantação de sistemas solares em prédios públicos e incentivo à geração distribuída (BELO HORIZONTE, 2022).

As estimativas do PLAC-BH indicam que as ações relacionadas ao setor energético podem evitar aproximadamente 118,9 mil toneladas de CO₂ equivalente em 2030, 438,8 mil toneladas em 2040 e cerca de 1,03 milhão de toneladas em 2050, em comparação ao cenário de referência. Esses valores demonstram o potencial de medidas municipais de eficiência e geração renovável para contribuir com metas de descarbonização de longo prazo (BELO HORIZONTE, 2022).

3.2.2 Planejamento Climático em Cidades Internacionais

No cenário internacional, Nova York é uma das principais referências de planejamento climático municipal. O PlaNYC: *Getting Sustainability Done*, publicado em 2023, estabelece como objetivo alcançar emissões líquidas zero até 2050 e integra ações relacionadas à descarbonização, adaptação climática, justiça ambiental, saúde pública e desenvolvimento econômico (NEW YORK CITY, 2023).

No setor de edificações, o plano reforça a meta de redução de 40% das emissões dos maiores edifícios da cidade até 2030, além de prever a neutralidade de carbono até 2050. Para o patrimônio municipal, o documento estabelece a instalação de sistemas solares, tecnologias renováveis, infraestrutura elétrica e outras soluções sustentáveis em propriedades tecnicamente adequadas até 2035.

O PlaNYC também contempla a eletrificação das frotas públicas, a expansão da infraestrutura de recarga, a promoção do transporte coletivo e da mobilidade ativa e a redução da circulação de veículos poluentes. Outro aspecto relevante é a incorporação de critérios climáticos ao processo orçamentário municipal, buscando alinhar os investimentos públicos às metas ambientais de longo prazo.

Além das ações de mitigação, o plano reconhece os riscos associados ao aumento do nível do mar, às inundações e às ondas de calor. Como resposta, são previstas medidas de proteção costeira, melhoria da drenagem urbana, ampliação das áreas verdes e fortalecimento da resiliência da infraestrutura pública.

3.3 Instrumentos de Atuação do Poder Público na Transição Energética

A promoção da transição energética em âmbito municipal depende da adoção de um conjunto de políticas e investimentos capazes de reduzir o consumo de energia, ampliar a participação de fontes renováveis e minimizar os impactos ambientais associados às atividades urbanas. Nesse contexto, o poder público dispõe de diferentes

instrumentos de atuação que abrangem desde medidas de eficiência energética em edificações públicas até intervenções nos setores de mobilidade, resíduos sólidos e infraestrutura urbana.

Uma das principais áreas de atuação refere-se à melhoria da eficiência energética das edificações públicas, como escolas, hospitais, unidades administrativas e equipamentos urbanos. Medidas como substituição de sistemas de iluminação convencionais por tecnologia LED, modernização de equipamentos de climatização, automação predial e gestão do consumo de energia podem reduzir significativamente os gastos públicos com eletricidade e aumentar a eficiência operacional das instalações. Paralelamente, a implantação de sistemas fotovoltaicos em edifícios públicos e usinas solares destinadas ao atendimento das unidades consumidoras municipais tem sido adotada por diversos municípios como estratégia para reduzir custos de energia e ampliar a participação de fontes renováveis na matriz elétrica local.

Outra possibilidade consiste na implementação de políticas voltadas à gestão sustentável dos resíduos sólidos. A ampliação da coleta seletiva, programas de reciclagem, compostagem de resíduos orgânicos e aproveitamento energético do biogás proveniente de aterros sanitários contribuem simultaneamente para a redução das emissões de gases de efeito estufa e para o aproveitamento mais eficiente dos recursos disponíveis. Além dos benefícios ambientais, essas ações podem reduzir custos operacionais e gerar novas oportunidades econômicas associadas à economia circular.

No setor da mobilidade urbana, os governos municipais possuem papel estratégico no planejamento e na operação dos sistemas de transporte coletivo. Entre as alternativas disponíveis destacam-se a renovação das frotas por veículos de menor emissão, a eletrificação de ônibus urbanos e veículos oficiais, a implantação de infraestrutura de recarga, a ampliação da infraestrutura para mobilidade ativa e a adoção de políticas que priorizem o transporte coletivo em relação ao transporte individual. Essas medidas contribuem para reduzir o consumo de combustíveis fósseis, melhorar a qualidade do ar e aumentar a eficiência energética do sistema de transportes.

Dentre as diferentes possibilidades de atuação do poder público, a eletrificação do transporte coletivo destaca-se pelo potencial de reduzir simultaneamente o consumo de óleo diesel, as emissões de gases de efeito estufa e os custos operacionais associados ao abastecimento da frota. Quando integrada à geração de energia por fontes renováveis, essa estratégia amplia ainda mais seus benefícios ambientais e energéticos.

3.4 Transporte Urbano e Descarbonização

O setor de transportes ocupa posição estratégica na transição energética em razão de sua elevada participação no consumo de energia e nas emissões de gases de

efeito estufa. Segundo o Balanço Energético Nacional 2025, o transporte representa aproximadamente 33,2% do consumo final de energia no Brasil, sendo o maior consumidor entre todos os setores da economia, à frente da indústria (31,7%). Conforme ilustrado na Figura 1, essa participação evidencia a elevada dependência do país em relação ao setor de transportes e reforça a importância de políticas voltadas à redução do consumo energético e à substituição de combustíveis fósseis (EPE, 2025).

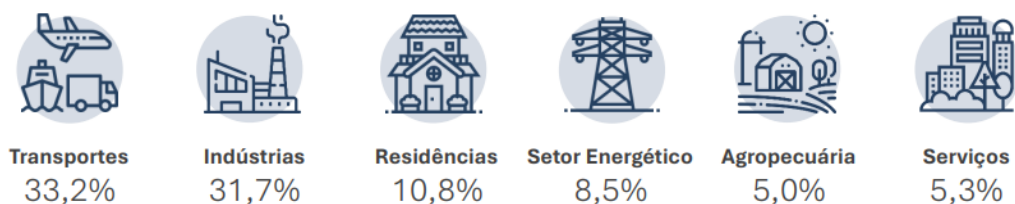


Figura 1 – Participação dos setores no consumo final de energia no Brasil (2024)

Fonte: Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025).

Em escala nacional, essa elevada demanda energética reflete diretamente nas emissões de gases de efeito estufa. Conforme apresentado na Figura 2, o setor de transportes foi responsável pela emissão de aproximadamente 214,3 milhões de toneladas de CO₂ equivalente em 2024, correspondendo à maior parcela das emissões relacionadas ao uso da energia no país. Esse valor supera, individualmente, as emissões provenientes da indústria e do setor residencial, demonstrando que a descarbonização do transporte constitui uma das principais oportunidades para redução das emissões nacionais (EPE, 2025).

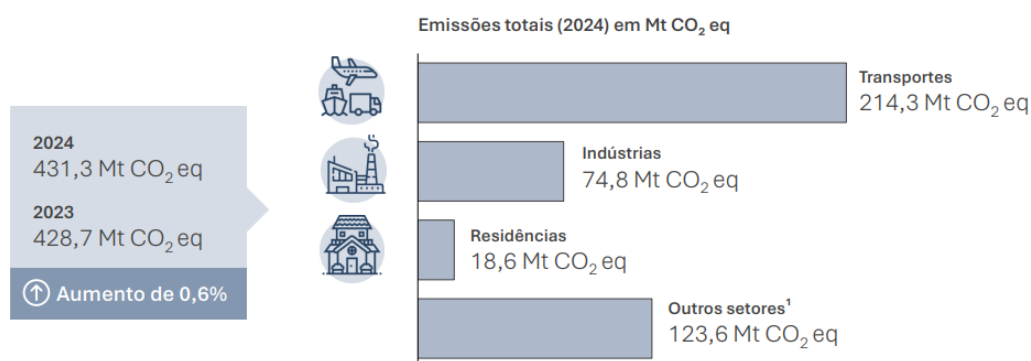


Figura 2 – Emissões de CO₂ equivalente por setor relacionadas ao uso da energia no Brasil (2024)

Fonte: Adaptado de Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2025).

Em âmbito internacional, o setor também figura entre os principais responsáveis pelas emissões associadas ao uso de energia. Segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), os transportes respondem por aproximadamente 23% das emissões globais de CO₂ relacionadas ao setor energético, evidenciando a necessidade de adoção de estratégias voltadas à redução do consumo de combustíveis fósseis e ao aumento da eficiência dos sistemas de mobilidade (IEA, 2024).

No contexto brasileiro, a modernização do transporte público apresenta elevado potencial para contribuir com esse processo. Além dos benefícios ambientais, investimentos em sistemas de transporte coletivo mais eficientes favorecem a redução do consumo energético por passageiro transportado, melhoram a qualidade do serviço prestado e ampliam a sustentabilidade da mobilidade urbana. Nesse cenário, a eletrificação das frotas de ônibus tem recebido crescente atenção por parte de governos, pesquisadores e organismos internacionais, sendo considerada uma das principais estratégias para a descarbonização do transporte urbano, destacando-se por sua capacidade de atender grandes volumes de passageiros com maior eficiência operacional quando comparado ao transporte individual (EPE, 2020a; ANTP, 2024).

3.5 Transporte Público de Pessoas

O transporte público coletivo desempenha função essencial no funcionamento das cidades, garantindo o acesso da população ao trabalho, à educação, à saúde, ao comércio e aos demais serviços urbanos. Sua importância é ainda maior para grupos que dependem exclusivamente desse modo de transporte para realizar seus deslocamentos diários, contribuindo para a inclusão social, a mobilidade urbana e o desenvolvimento econômico das cidades.

A dimensão desse serviço pode ser observada nos dados do Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da Associação Nacional de Transportes Públicos (SIMOB/ANTP). Em 2024, os municípios brasileiros com população superior a 60 mil habitantes registraram aproximadamente 12,3 bilhões de viagens anuais em transporte coletivo, das quais cerca de 10,1 bilhões foram realizadas por ônibus municipais e metropolitanos. O sistema operou com uma frota aproximada de 121,2 mil ônibus e foi responsável pela geração de cerca de 607 mil empregos diretos, evidenciando sua importância para a mobilidade urbana e para a economia nacional (ANTP, 2026).

A distribuição dessas viagens também evidencia a relevância do transporte coletivo em cidades de diferentes portes. Conforme apresentado na Figura 3, embora os municípios com mais de um milhão de habitantes concentrem a maior parcela da demanda, os municípios com população entre 60 mil e 100 mil habitantes, faixa na qual se enquadra o município de Mariana, responderam por aproximadamente 720 milhões

de viagens anuais realizadas por ônibus em 2024. Esses números demonstram que, mesmo fora das grandes metrópoles, o transporte coletivo permanece como um serviço essencial para a mobilidade urbana (ANTP, 2026).

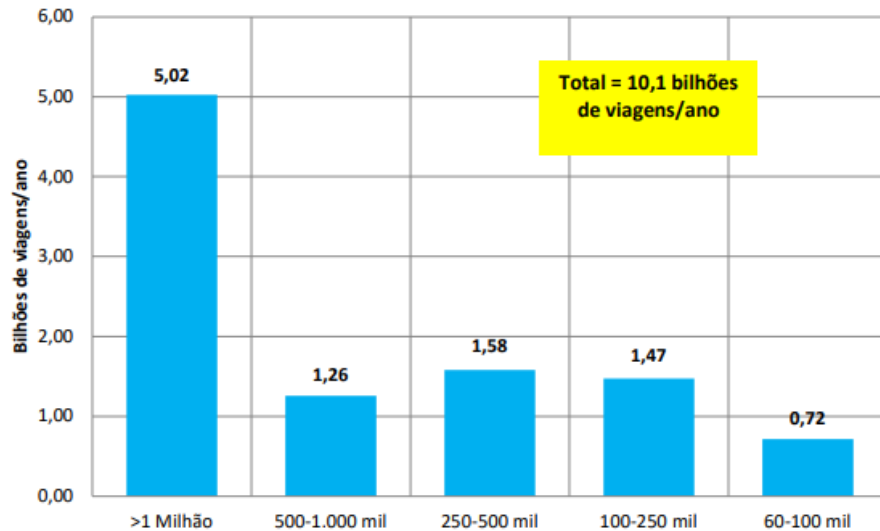


Figura 3 – Viagens anuais realizadas por ônibus segundo o porte dos municípios brasileiros em 2024

Fonte: Associação Nacional de Transportes Públicos (ANTP, 2026).

Apesar de sua relevância, o transporte coletivo brasileiro enfrenta desafios relacionados à perda de demanda, ao aumento dos custos operacionais e à qualidade do serviço oferecido aos usuários. A expansão da motorização individual, associada à percepção de baixa qualidade do transporte coletivo em diversos municípios, tem reduzido sua participação na matriz de mobilidade urbana.

3.5.1 Qualidade do Serviço e Atração de Passageiros

A qualidade do serviço constitui um dos principais fatores associados à atratividade do transporte público coletivo. Embora aspectos econômicos, como o valor da tarifa, influenciem a escolha do modo de transporte, diversos estudos demonstram que atributos operacionais relacionados à frequência, confiabilidade, tempo de viagem, conforto, segurança e acessibilidade possuem papel decisivo na retenção e na atração de passageiros.

Chakrabarti (2015), ao analisar aproximadamente 1.300 pontos de parada atendidos por cerca de 300 linhas de ônibus do sistema de transporte de Los Angeles, verificou que linhas com maior pontualidade e menor variabilidade nos horários apresentavam maior número de embarques. Os resultados indicam que a confiabilidade

operacional reduz a incerteza dos deslocamentos e aumenta a atratividade do transporte coletivo, especialmente em linhas com maiores intervalos entre veículos.

Além da confiabilidade, a experiência do usuário é influenciada por diversos fatores ao longo de toda a viagem. Segundo o ITDP Brasil (2017), aspectos como tempo de espera, velocidade comercial, facilidade de integração entre linhas, acessibilidade, conforto dos veículos, qualidade dos pontos de parada e disponibilidade de informações em tempo real devem ser considerados na avaliação do desempenho dos sistemas de transporte coletivo.

A importância desses atributos também pode ser observada em pesquisas de opinião realizadas com usuários brasileiros. Conforme apresentado na Figura 4, estudos conduzidos pela Confederação Nacional do Transporte (CNT) mostram que os fatores mais associados à possibilidade de retorno ao transporte público são a redução da tarifa, o aumento do conforto e a maior rapidez das viagens. A renovação da frota por ônibus elétricos ou tecnologias menos poluentes foi citada por parcela menor dos entrevistados, indicando que a eletrificação, embora relevante do ponto de vista ambiental, não substitui melhorias operacionais percebidas diretamente pelos usuários (CNT, 2024).



Figura 4 – Opções necessárias para o retorno ao uso do ônibus como meio de deslocamento

Fonte: Confederação Nacional do Transporte (CNT, 2024).

3.5.2 Eletrificação da Frota como Estratégia de Modernização

A eletrificação da frota pode contribuir para a modernização do transporte coletivo, mas não deve ser considerada uma solução isolada para problemas como baixa frequência, atrasos, superlotação, cobertura insuficiente e falta de integração. Esses aspectos dependem principalmente do planejamento e da operação do sistema, independentemente da tecnologia de propulsão adotada.

Por outro lado, os ônibus elétricos apresentam benefícios percebidos diretamente pelos usuários. Em testes operacionais realizados em Curitiba, 90% dos participantes manifestaram-se favoráveis à implantação de mais ônibus elétricos. Além disso, 95% concordaram que os veículos são mais silenciosos, 94% que podem contribuir para a melhoria da qualidade do ar, 89% que podem beneficiar a saúde da população e 81% que são mais confortáveis do que os ônibus a diesel. A pesquisa também mostrou que 44% dos respondentes estariam dispostos a esperar mais tempo para embarcar em um ônibus elétrico (Tavares; Siqueira; Corrêa, 2024).

Conforme a Figura 5, durante avaliação de 14 aspectos dos veículos em demonstração, os atributos diretamente relacionados à tecnologia elétrica estiveram entre os mais bem avaliados. A suavidade das arrancadas, os níveis de vibração e os níveis de ruído alcançaram 90% de satisfação, enquanto ventilação e temperatura obtiveram 77%. Em comparação, lotação e segurança apresentaram os menores níveis de satisfação, com 58% e 45%, respectivamente, evidenciando que esses aspectos estão mais relacionados à operação do serviço do que à tecnologia dos veículos.

Satisfação dos clientes com fatores de conforto dos ônibus elétricos

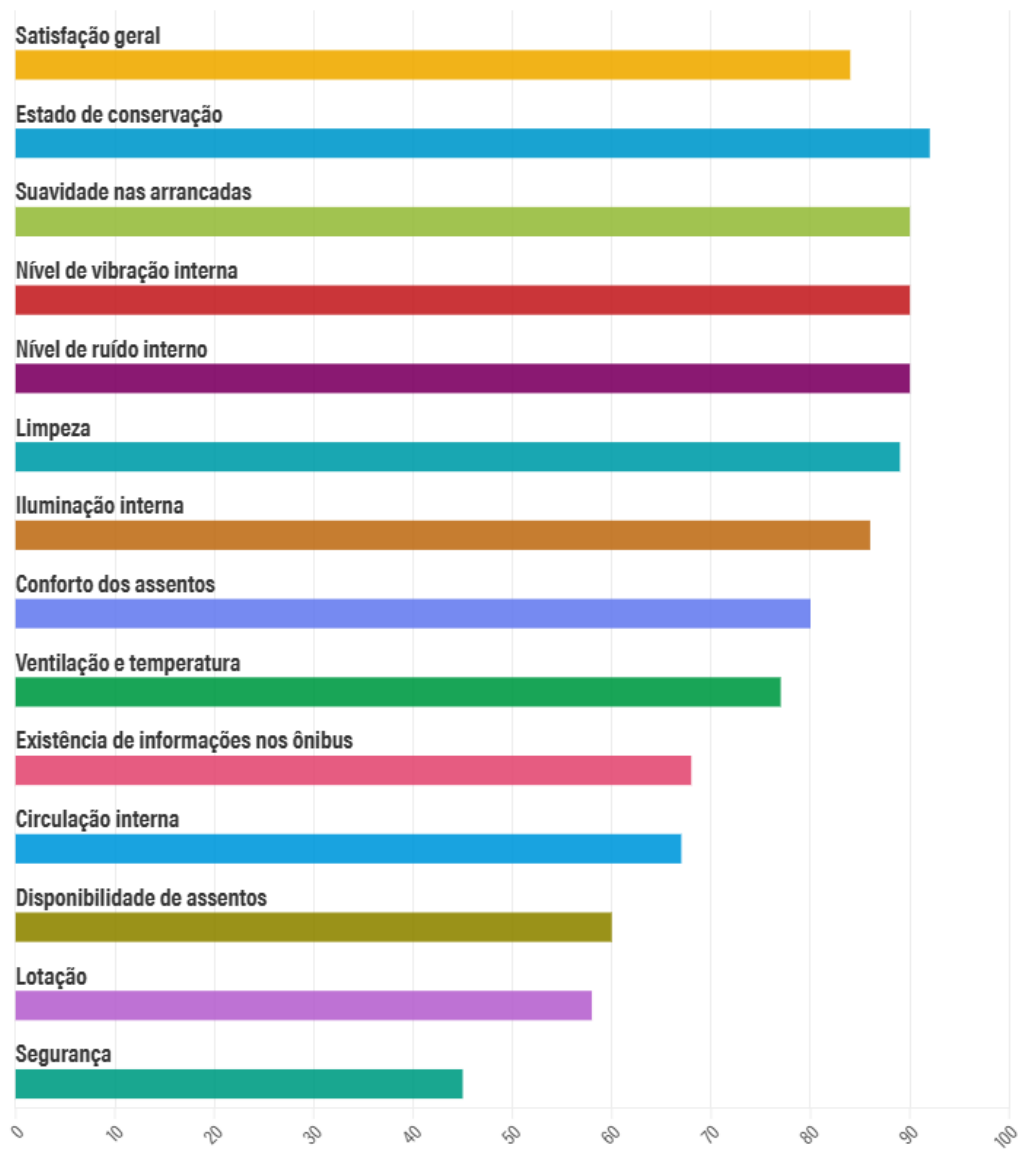


Figura 5 – Grau de satisfação dos usuários com os atributos dos ônibus elétricos testados em Curitiba

Fonte: *World Resources Institute Brasil* (Tavares; Siqueira; Corrêa, 2024).

3.6 Eficiência Energética no Transporte Público

A eficiência energética no setor de transportes refere-se à capacidade de realizar o deslocamento de passageiros utilizando a menor quantidade possível de energia, mantendo os níveis de serviço, conforto e segurança. Sua avaliação pode ser realizada por diferentes indicadores, como o consumo de combustível por distância percorrida, geralmente expresso em L/100 km, a economia de combustível, em km/L, e a intensidade energética por passageiro-quilômetro, que relaciona a energia consumida à quantidade de passageiros transportados e à distância percorrida. Nesse contexto, melhorias de eficiência podem ser obtidas por meio da adoção de tecnologias mais eficientes, da otimização da operação dos sistemas de transporte e da substituição de fontes energéticas de menor rendimento por alternativas de maior desempenho (EPE, 2023).

No transporte rodoviário, grande parte da energia contida nos combustíveis fósseis é dissipada na forma de calor durante o funcionamento dos motores de combustão interna. De acordo com a IEA, motores a diesel convertem aproximadamente 30% a 40% da energia química do combustível em energia mecânica útil, enquanto o restante é perdido principalmente em calor, atritos mecânicos e sistemas auxiliares (IEA, 2024). Em contraste, motores elétricos apresentam rendimento superior a 90%, convertendo a maior parte da energia elétrica consumida em movimento.

Além da maior eficiência do sistema de propulsão, veículos elétricos incorporam tecnologias que ampliam o aproveitamento energético durante sua operação. Entre elas destaca-se a frenagem regenerativa, capaz de recuperar parte da energia cinética dissipada nas frenagens e convertê-la novamente em energia elétrica armazenada nas baterias. Em ambientes urbanos, caracterizados por frequentes acelerações e desacelerações, esse recurso contribui significativamente para a redução do consumo de energia e para o aumento da autonomia dos veículos (IEA, 2024).

Esses ganhos refletem-se diretamente no consumo energético dos ônibus urbanos. Segundo estudo técnico-econômico da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), ônibus elétricos apresentam consumo médio entre 0,8 e 1,5 kWh/km, enquanto veículos convencionais movidos a óleo diesel apresentam consumo energético equivalente entre aproximadamente 3,5 e 4,5 kWh/km, evidenciando uma redução significativa da energia necessária para a realização do mesmo serviço de transporte (EPE, 2020a).

Além da redução do consumo energético, a maior eficiência dos veículos elétricos resulta em menor demanda por energia primária, menores custos operacionais relacionados ao abastecimento e redução das emissões de gases de efeito estufa quando a eletricidade é proveniente de fontes renováveis.

3.7 Panorama Tecnológico e Industrial do Mercado de Ônibus Elétricos

A consolidação dos ônibus elétricos como alternativa ao transporte coletivo convencional está diretamente relacionada à evolução tecnológica dos veículos, ao desenvolvimento da indústria de baterias e à expansão da capacidade produtiva dos fabricantes. Nas últimas décadas, esse mercado passou por um processo acelerado de crescimento, inicialmente concentrado na China e posteriormente ampliado para outras regiões, incluindo o Brasil.

3.7.1 Expansão Mundial e Liderança Chinesa

A expansão do mercado de ônibus elétricos é resultado de um processo iniciado há mais de duas décadas, impulsionado pela necessidade de reduzir as emissões de gases de efeito estufa, melhorar a qualidade do ar nos centros urbanos e diminuir a dependência de combustíveis fósseis. Nesse período, a eletrificação do transporte coletivo deixou de representar uma tecnologia experimental para consolidar-se como uma alternativa comercialmente viável em diversos países, sendo atualmente um dos segmentos mais avançados da eletromobilidade (MANZOLLI; TROVÃO; ANTUNES, 2022).

Um dos principais marcos dessa transformação ocorreu na China. Em 2009, o governo chinês lançou o programa *Ten Cities, Thousand Vehicles*, iniciativa nacional destinada a acelerar a adoção de veículos elétricos inicialmente no transporte público urbano. O programa estabelecia que cidades participantes implantassem, durante três anos, pelo menos mil veículos elétricos em operação, permitindo o desenvolvimento de projetos-piloto, a formação de infraestrutura de recarga e o amadurecimento tecnológico da indústria nacional. A experiência acumulada nesses projetos possibilitou sua posterior expansão para todo o país, tornando a China referência mundial em eletromobilidade (KALTHAUS; SUN, 2021).

Como resultado dessa estratégia, a eletrificação dos ônibus urbanos ocorreu de forma acelerada. Shenzhen tornou-se o principal símbolo desse processo ao concluir, em 2017, a eletrificação integral de sua frota de transporte coletivo, composta por 16.359 ônibus elétricos, tornando-se a primeira cidade do mundo a operar integralmente um sistema de ônibus urbanos eletrificado. O processo foi desenvolvido em três etapas — demonstração (2009–2011), projetos-piloto (2012–2015) e implantação em larga escala (2016–2017) — envolvendo investimentos em infraestrutura de recarga, adaptação operacional e integração entre governo, operadores e fabricantes (CHEN *et al.*, 2021).

Enquanto Shenzhen demonstrava a viabilidade operacional da tecnologia, a indústria chinesa consolidava uma cadeia produtiva altamente integrada. Fabricantes como BYD, Yutong, Zhongtong e Foton ampliaram significativamente sua capacidade

produtiva, ao mesmo tempo em que empresas como CATL passaram a liderar a fabricação mundial de baterias de íons de lítio. Essa integração vertical entre produção de baterias, sistemas de propulsão e veículos completos proporcionou importantes ganhos de escala, redução dos custos de fabricação e fortalecimento da competitividade internacional da indústria chinesa (ALTENBURG; CORROCHER; MALERBA, 2022; MAO; RODRÍGUEZ, 2021).

Essa liderança permanece evidente nos dados mais recentes do mercado chinês, que registrou aproximadamente 230 mil vendas de caminhões e ônibus de emissão zero em 2024, alcançando um recorde histórico (ICCT, 2025). O avanço tecnológico e industrial refletiu-se diretamente na expansão do mercado mundial. Segundo a Agência Internacional de Energia, o estoque global de ônibus elétricos deverá continuar crescendo ao longo da presente década, impulsionado pela ampliação das políticas públicas de descarbonização e pela maior competitividade da tecnologia. Conforme apresentado na Figura 6¹, o número de ônibus elétricos em operação apresenta crescimento contínuo até 2030 no Cenário de Políticas Declaradas, projeção exploratória da Agência Internacional de Energia (IEA) que mostra o caminho provável do sistema de energia global com base em leis, medidas e metas oficiais, mantendo-se como o segmento mais consolidado entre os veículos pesados eletrificados (IEA, 2025).

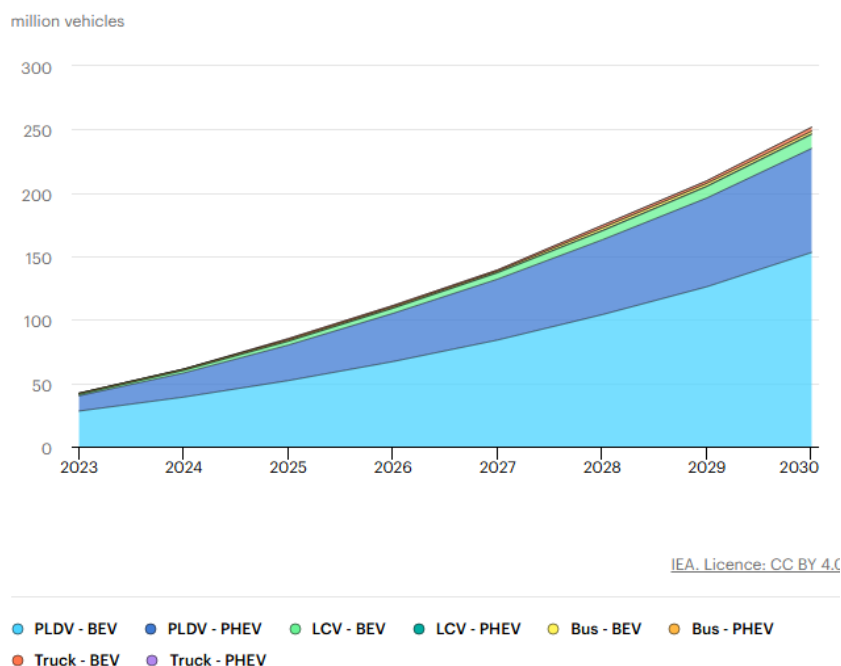


Figura 6 – Estoque de outros veículos elétricos no Cenário de Políticas Declaradas

Fonte: *International Energy Agency* (IEA, 2025).

¹ PLDV – *Passenger Light-Duty Vehicle* (veículo leve de passageiros); LCV – *Light Commercial Vehicle* (veículo comercial leve); BEV – *Battery Electric Vehicle* (veículo elétrico a bateria); PHEV – *Plug-in Hybrid Electric Vehicle* (veículo elétrico híbrido plug-in). *Bus* corresponde a ônibus e *Truck* a caminhão.

3.7.2 Mercado Brasileiro e Indústria Nacional

A eletrificação do transporte coletivo também vem ganhando espaço no Brasil, impulsionada por políticas públicas de descarbonização, metas de renovação de frotas e pela ampliação da oferta de veículos elétricos no mercado nacional. Embora a participação desses veículos na frota brasileira ainda seja reduzida, observa-se um crescimento significativo tanto na diversidade de modelos disponíveis quanto no número de fabricantes atuantes no país. Segundo levantamento realizado pela Aliança ZEBRA, em parceria com o ICCT e a C40 *Cities*, o número de modelos de ônibus elétricos disponíveis no mercado brasileiro aumentou significativamente entre 2022 e 2025, refletindo o amadurecimento do mercado e a ampliação da concorrência entre fabricantes (Silva; Rodrigues; Logiodice, 2026).

Esse crescimento foi inicialmente impulsionado pela importação de veículos e chassis, sobretudo de fabricantes chineses como BYD, Higer, Ankai e Yutong, que passaram a fornecer ônibus elétricos para projetos de eletrificação em cidades brasileiras. Nos últimos anos, entretanto, observa-se um movimento de nacionalização parcial da produção, com a instalação ou ampliação de unidades industriais e linhas de montagem no país. Esse processo busca reduzir custos logísticos, atender às exigências de conteúdo nacional em licitações públicas e ampliar a competitividade dos fabricantes no mercado brasileiro (RODRIGUES *et al.*, 2025; WRI BRASIL, [s.d.]).

Paralelamente, empresas já consolidadas na indústria nacional passaram a investir no desenvolvimento de soluções próprias para a eletromobilidade. Fabricantes como Marcopolo, Mercedes-Benz do Brasil, Volkswagen Caminhões e Ônibus e Eletra ampliaram seus portfólios com modelos elétricos destinados ao transporte urbano, enquanto empresas como a WEG passaram a fornecer motores elétricos, inversores, carregadores e outros componentes para diferentes aplicações.

3.7.3 Evolução e Perspectivas dos Custos

Durante muitos anos, o elevado investimento inicial constituiu o principal obstáculo para a adoção em larga escala dos ônibus elétricos. Embora esses veículos apresentem menores custos com energia e manutenção ao longo da operação, seu preço de aquisição permaneceu significativamente superior ao dos modelos movidos a diesel, principalmente em razão do elevado custo das baterias de íons de lítio, componente de maior valor agregado do veículo (ITDP, 2025).

Nos últimos anos, entretanto, esse cenário vem se modificando em função da rápida evolução da indústria mundial de baterias. De acordo com a Agência Internacional de Energia, os preços médios dos pacotes de baterias continuaram em trajetória de queda, impulsionados por ganhos de escala, avanços tecnológicos,

mudanças nas químicas utilizadas e intensificação da concorrência entre fabricantes. Como evidencia a Figura 7, em 2025, os preços médios diminuirão aproximadamente 8% em relação ao ano anterior, mantendo uma tendência de redução observada ao longo da última década. Além disso, baterias do tipo LFP (lítio-ferro-fosfato) passaram a apresentar custos significativamente inferiores aos das baterias NMC (níquel-manganês-cobalto), favorecendo sua adoção em ônibus elétricos devido ao menor custo e à maior vida útil.

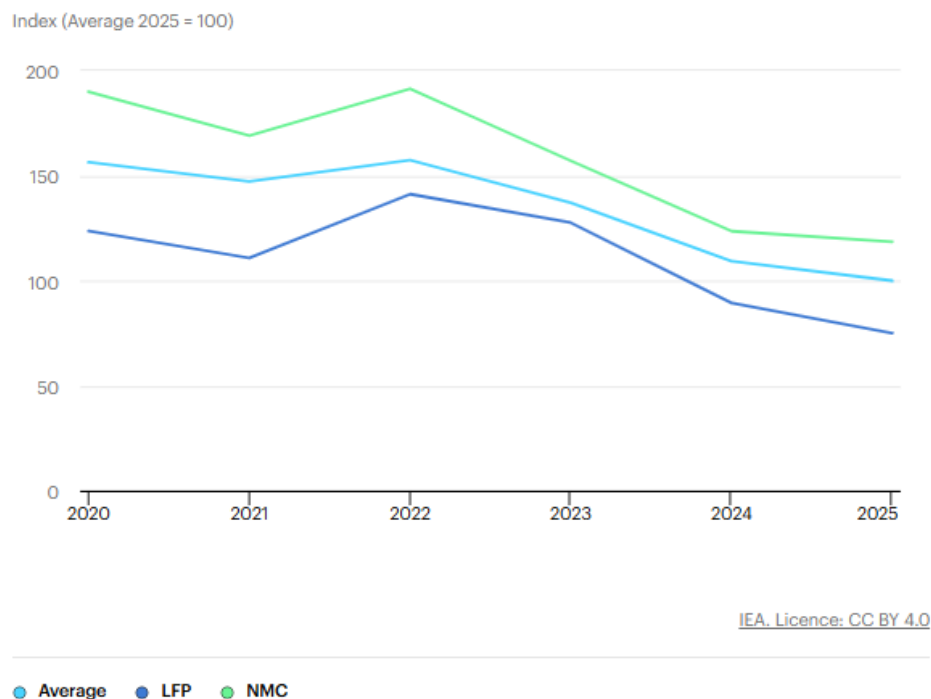


Figura 7 – Evolução dos preços médios dos pacotes de baterias por tecnologia 2020/2025

Fonte: International Energy Agency (IEA, 2026).

Além da redução observada nos preços ao longo do tempo, persistem diferenças importantes entre as regiões produtoras, como mostra a Figura 8. Segundo a IEA, em 2025 os pacotes de baterias produzidos na China apresentavam preços aproximadamente 30% inferiores aos praticados na América do Norte e cerca de 35% inferiores aos observados na Europa. Essa vantagem competitiva decorre principalmente da elevada capacidade produtiva instalada, da integração da cadeia de suprimentos, dos menores custos de manufatura e da intensa concorrência entre fabricantes chineses, fatores que reforçam a posição do país como líder mundial na produção de baterias para veículos elétricos.

Como as baterias representam aproximadamente 40% do custo de aquisição de um ônibus elétrico, sua redução de preço exerce influência direta sobre a

competitividade da tecnologia. O ITDP destaca que, à medida que a demanda por ônibus elétricos aumenta e a produção de baterias se expande, espera-se uma diminuição gradual dos custos de capital desses veículos. Segundo a instituição, os ônibus elétricos poderão alcançar custos de aquisição competitivos em relação aos modelos movidos a diesel entre 2026 e 2030, dependendo das características do mercado, da escala de produção e das políticas de incentivo adotadas em cada país.

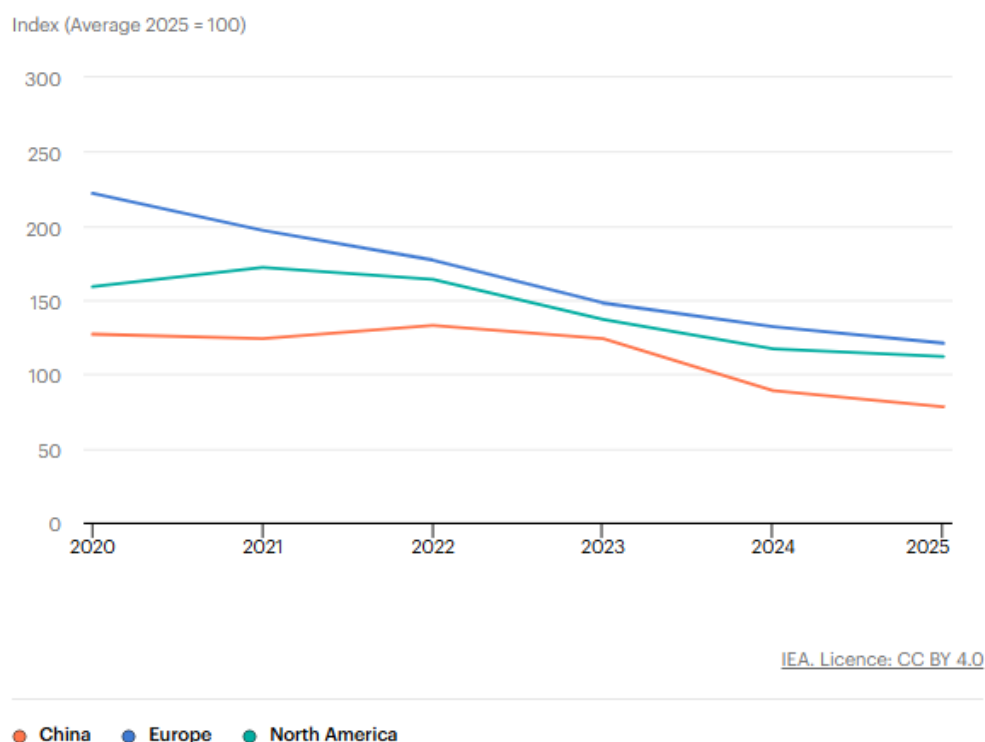


Figura 8 – Índice de preços médios dos pacotes de baterias por região 2020/2025

Fonte: International Energy Agency (IEA, 2026).

Entretanto, a avaliação econômica da eletrificação não deve considerar apenas o investimento inicial. Diversos estudos recomendam a utilização do Custo Total de Propriedade (*Total Cost of Ownership* – TCO), indicador que incorpora, além do preço de aquisição, os custos de energia, manutenção, substituição de componentes e operação ao longo da vida útil do veículo. Nessa perspectiva, os ônibus elétricos tornam-se progressivamente mais competitivos, sobretudo em sistemas urbanos com elevada quilometragem anual, onde a economia obtida com combustível e manutenção tende a compensar o maior investimento inicial (ITDP, 2025; IEA, 2025).

3.8 Desafios para a Eletrificação do Transporte Público

A eletrificação do transporte público não depende exclusivamente da disponibilidade tecnológica ou da viabilidade econômica dos ônibus elétricos. Embora os avanços recentes tenham reduzido custos operacionais e ampliado a oferta de veículos, a implementação em larga escala continua condicionada à existência de mecanismos institucionais e financeiros capazes de viabilizar os investimentos e coordenar os diferentes agentes envolvidos.

No Brasil, estudos do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES) identificam como principais desafios para a expansão dos ônibus elétricos o planejamento da transição, o elevado custo de aquisição dos veículos, a definição das fontes de recursos e a estruturação dos modelos de negócio. Embora a operação dos ônibus elétricos apresente custos inferiores aos dos veículos movidos a diesel, o modelo tradicional de concessão pode dificultar a absorção dos investimentos iniciais necessários à eletrificação das frotas (VILLEN *et al.*, 2024).

Outro desafio refere-se ao financiamento da transição. No caso de São Paulo, o preço de aquisição de um ônibus elétrico foi estimado entre 3,1 e 4,9 vezes superior ao de um ônibus convencional a diesel, evidenciando o impacto do investimento inicial sobre a viabilidade da eletrificação (VILLEN *et al.*, 2024). Embora essa diferença tenda a diminuir com o aumento da escala de produção, ela dificulta a obtenção de crédito pelas concessionárias e amplia a necessidade de instrumentos públicos de financiamento, especialmente para municípios de pequeno e médio porte. Nesse cenário, programas como o Novo PAC, o Fundo Clima e linhas específicas do próprio BNDES passaram a desempenhar papel estratégico na ampliação da eletrificação das frotas brasileiras. Em 2024, por exemplo, o BNDES aprovou aproximadamente R\$ 1,3 bilhão para aquisição de 304 ônibus elétricos destinados a projetos de mobilidade urbana em Porto Alegre, Belo Horizonte, Curitiba e Espírito Santo (BNDES, 2025).

Além da disponibilidade de recursos, a experiência internacional demonstra que a definição do modelo de negócios é um fator decisivo para o sucesso da eletrificação. Em cidades como Shenzhen, Santiago e Bogotá, a implantação das frotas elétricas foi viabilizada por modelos que distribuem responsabilidades entre diferentes agentes. Em muitos casos, a empresa operadora deixa de ser proprietária dos veículos, que passam a ser adquiridos por empresas de leasing, fundos de investimento ou pelo próprio poder público, reduzindo o investimento inicial exigido das concessionárias e facilitando a expansão das frotas. Essa separação entre propriedade dos ativos e operação do serviço tem sido apontada como uma das principais estratégias para acelerar a eletrificação do transporte coletivo (VILLEN *et al.*, 2024).

No Brasil, entretanto, a adoção desses modelos ainda é limitada. Em diversas cidades, contratos de concessão firmados antes da consolidação da eletromobilidade

permanecem estruturados para veículos movidos a diesel, dificultando a incorporação de novas tecnologias sem reequilíbrios contratuais ou novos mecanismos de remuneração. Além disso, a fragmentação das responsabilidades entre municípios, operadores, distribuidoras de energia e instituições financeiras frequentemente dificulta o planejamento integrado da infraestrutura de recarga e da renovação das frotas.

3.9 Energia Solar Fotovoltaica

A energia solar fotovoltaica consiste na conversão direta da radiação solar em energia elétrica por meio do efeito fotovoltaico, fenômeno observado inicialmente por Edmond Becquerel em 1839. Esse processo ocorre quando materiais semicondutores, geralmente compostos à base de silício, absorvem fótons provenientes da radiação solar, promovendo a movimentação de elétrons e gerando corrente elétrica.

Entre as fontes renováveis disponíveis atualmente, a energia solar destaca-se pela elevada disponibilidade do recurso energético, ampla distribuição geográfica e reduzidos impactos ambientais durante sua operação. Nas últimas décadas, essa tecnologia apresentou expressivo crescimento em escala mundial, impulsionado pela redução dos custos dos equipamentos, avanços tecnológicos e políticas de incentivo à transição energética.

Do ponto de vista tecnológico, os módulos fotovoltaicos também apresentaram avanços expressivos em seu desempenho. Em 2010, módulos comerciais de silício cristalino apresentavam eficiência média próxima de 14%, enquanto atualmente os módulos comerciais alcançam eficiências próximas de 25%, evidenciando a evolução da tecnologia nas últimas décadas (NREL, 2011; PHILIPPS; WARMUTH, 2026). O mercado atual é predominantemente composto por módulos de silício cristalino, especialmente monocristalino, com crescente participação de tecnologias como TOPCon, que utiliza contatos passivados para reduzir perdas por recombinação, e heterojunção, que combina diferentes camadas de silício para aumentar a eficiência de conversão (PHILIPPS; WARMUTH, 2026). Além da maior eficiência, esses módulos apresentam elevada durabilidade, com vida útil normalmente superior a 25 anos e taxas de degradação próximas de 0,5% ao ano (UNITED STATES, [s. d.]).

Segundo a IEA, a energia solar fotovoltaica representou aproximadamente 75% da expansão mundial da capacidade renovável adicionada em 2023, consolidando-se como a principal tecnologia responsável pelo crescimento do setor energético renovável. Em escala global, a capacidade instalada acumulada ultrapassou 1,6 TW (terawatts) em 2023, apresentando crescimento superior a 30% em relação ao ano anterior (IEA, 2024).

No Brasil, a expansão dessa tecnologia também tem ocorrido de forma acelerada. Em 2025, a capacidade instalada de geração solar fotovoltaica no país

alcançou aproximadamente 64,8 GW, considerando a geração centralizada e a micro e minigeração distribuída, o que representou um crescimento de 33,7% em relação ao ano anterior (EPE, 2026).

Além do aumento da capacidade instalada, a redução dos custos de implantação e geração constitui um dos principais fatores responsáveis pela expansão da tecnologia fotovoltaica. Segundo a Agência Internacional para Energias Renováveis (IRENA), observou-se uma redução significativa do custo nivelado de energia (*Levelized Cost of Energy* – LCOE) associado aos sistemas solares fotovoltaicos ao longo dos últimos anos, tornando essa tecnologia uma das alternativas mais competitivas para geração elétrica.

A Figura 9 apresenta a evolução histórica dos custos da energia solar fotovoltaica, evidenciando uma tendência contínua de redução ao longo do tempo. Essa diminuição dos custos decorre principalmente de avanços tecnológicos, aumento da escala produtiva, melhorias nos processos de fabricação e expansão do mercado global.

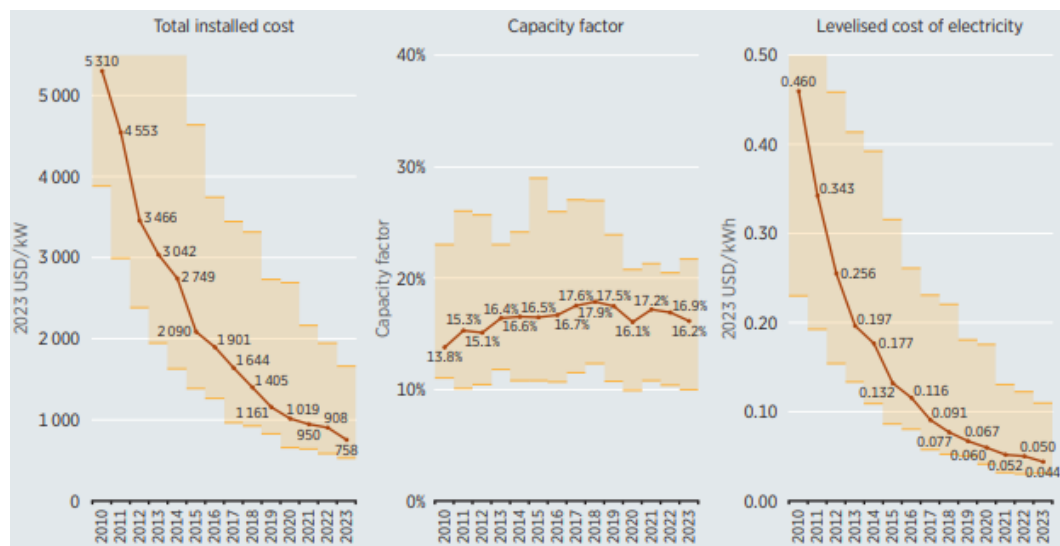


Figura 9 – Evolução do custo nivelado de energia (LCOE) da energia solar fotovoltaica ao longo dos anos

Fonte: IRENA (2024).

Outro fator relevante refere-se ao potencial solar brasileiro. Devido à sua localização geográfica, o Brasil apresenta elevados índices de incidência solar em praticamente todo o território nacional. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a irradiação solar média diária no país varia aproximadamente entre 4,5 e 6,5 kWh/m²/dia, valores superiores aos observados em diversos países que possuem elevada participação da

energia solar em suas matrizes energéticas, como Alemanha e Reino Unido (PEREIRA *et al.*, 2017).

No município de Mariana/MG, a disponibilidade do recurso solar apresenta condições favoráveis para a geração de energia fotovoltaica. Os dados meteorológicos utilizados na modelagem foram obtidos por meio do *software* HOMER Pro, utilizando a ferramenta de georreferenciamento integrada à plataforma, conforme apresentado na Figura 10. A partir da inserção das coordenadas geográficas do município, o modelo energético acessa bases de dados meteorológicos e fornece informações de irradiância solar, temperatura e demais parâmetros necessários à modelagem energética do sistema.

Para a região de Mariana, foi obtida uma irradiância solar média anual de aproximadamente 4,93 kWh/m²/dia, valor que evidencia o potencial local para o aproveitamento da energia solar e fundamenta a consideração da geração fotovoltaica como alternativa para o suprimento energético do sistema proposto.

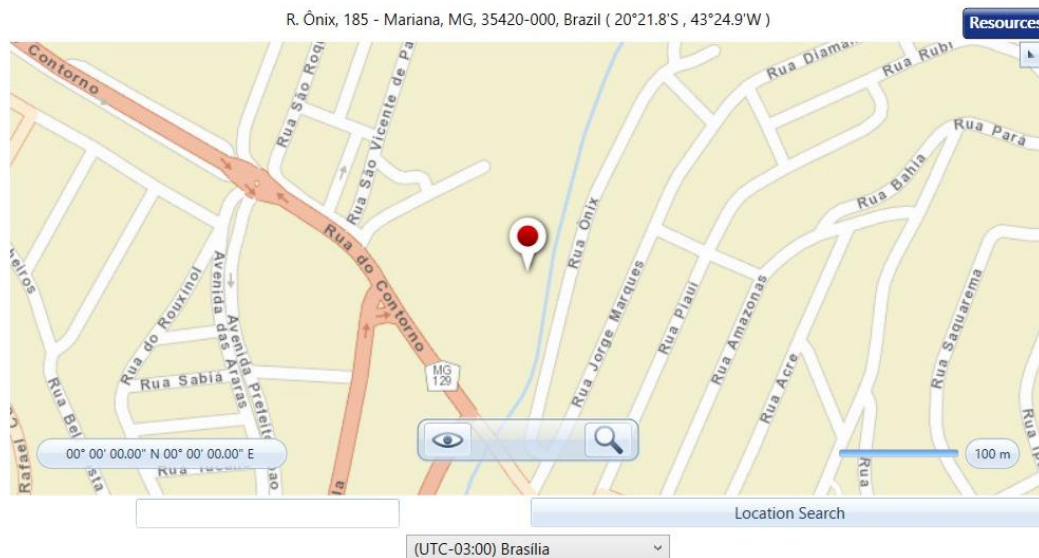


Figura 10 – Interface do *software* HOMER Pro utilizada para georreferenciamento e obtenção dos dados solares do município de Mariana/MG

Fonte: Elaboração própria com base no HOMER Pro (HOMER ENERGY 2025).

3.9.1 Marco Regulatório da Micro e Minigeração Distribuída

A expansão da geração distribuída no Brasil está diretamente relacionada à evolução de seu marco regulatório. Um dos principais marcos ocorreu em 2012, com a publicação da Resolução Normativa nº 482 da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), que estabeleceu as condições para o acesso da micro e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição e criou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE). Esse mecanismo possibilitou que consumidores passassem a produzir

sua própria energia a partir de fontes renováveis ou cogeração qualificada e utilizassem a energia excedente injetada na rede para compensar posteriormente seu consumo de eletricidade (ANEEL, 2012).

Em 2015, a Resolução Normativa nº 687 ampliou e aperfeiçoou as regras estabelecidas pela REN nº 482/2012. Entre as principais alterações, a norma redefiniu os limites de potência, classificando como microgeração as centrais com potência instalada de até 75 kW e como minigeração aquelas com potência superior a 75 kW e de até 5 MW para as demais fontes renováveis, incluindo a solar fotovoltaica. A resolução também ampliou as possibilidades de participação no sistema de compensação, contribuindo para a expansão da geração distribuída no país (ANEEL, 2015).

Posteriormente, a publicação da Lei nº 14.300, em 6 de janeiro de 2022, instituiu o Marco Legal da Microgeração e Minigeração Distribuída, conferindo maior segurança jurídica ao setor e estabelecendo em legislação federal as principais regras relacionadas ao SCEE. Atualmente, a Lei classifica como microgeração distribuída as centrais com potência instalada de até 75 kW e como minigeração aquelas acima de 75 kW e de até 3 MW para fontes não despacháveis, categoria na qual se enquadram, em regra, os sistemas solares fotovoltaicos sem armazenamento que atenda aos requisitos de despachabilidade. Para fontes despacháveis, o limite estabelecido é de até 5 MW (BRASIL, 2022).

A regulamentação atualmente aplicável à micro e minigeração distribuída foi posteriormente consolidada pela ANEEL na Resolução Normativa nº 1.000/2021, alterada pela Resolução Normativa nº 1.059/2023 para adequação às disposições da Lei nº 14.300/2022. Essa atualização incorporou às condições gerais de fornecimento de energia as regras relacionadas à conexão, ao faturamento e ao funcionamento do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, além de revogar formalmente as antigas Resoluções nº 482/2012 e nº 687/2015 (ANEEL, 2021; ANEEL, 2023).

3.10 Infraestrutura de Recarga para Veículos Elétricos

A infraestrutura de recarga representa um dos principais elementos para a implementação de sistemas de transporte público eletrificados, uma vez que sua configuração influencia diretamente o desempenho operacional e econômico da frota. Diferentemente dos sistemas convencionais movidos a diesel, a adoção de ônibus elétricos requer investimentos adicionais em equipamentos de recarga e adequações na infraestrutura energética, tornando esse componente parte relevante do custo inicial de implantação (EPE, 2020a).

A especificação do processo de recarga depende de diversos fatores relacionados à operação dos veículos, incluindo a capacidade de armazenamento das baterias, as características das rotas, as distâncias percorridas, a topografia do trajeto, a demanda de passageiros e o tamanho da frota em operação. Dessa forma, o planejamento da infraestrutura deve considerar simultaneamente aspectos técnicos e operacionais, buscando garantir a autonomia necessária dos veículos e a continuidade do serviço prestado. Estudos recentes ressaltam que o dimensionamento adequado da infraestrutura de recarga constitui um dos principais fatores para o sucesso operacional e econômico das frotas de ônibus elétricos, influenciando diretamente a programação dos veículos, a utilização dos carregadores e o custo total do sistema (EPE, 2020a; ZHOU *et al.*, 2024).

Segundo o estudo técnico-econômico da Empresa de Pesquisa Energética, existem três modalidades de carregamento mais empregadas em sistemas urbanos de ônibus elétricos: recarga *plug-in*, recarga pantográfica e recarga *wireless* (sem fio). A recarga *plug-in* destaca-se por apresentar menor custo de implantação e maior simplicidade operacional, sendo amplamente utilizada em garagens para carregamentos realizados durante o período noturno. Já a recarga pantográfica possibilita carregamentos rápidos em terminais ou pontos estratégicos das rotas, enquanto a tecnologia *wireless* permite a transferência de energia por indução eletromagnética, embora sua aplicação ainda seja limitada pelo elevado custo da infraestrutura (EPE, 2020a; ZHOU *et al.*, 2024).

Em relação às características operacionais, os sistemas *plug-in* podem operar em diferentes faixas de potência. Os carregadores lentos, entre 15 e 22 kW, permitem a recarga completa dos veículos em aproximadamente dez horas, enquanto carregadores rápidos, com potências entre 22 e 120 kW, reduzem esse intervalo para cerca de duas a seis horas. Os sistemas pantográficos normalmente operam entre 150 e 300 kW, possibilitando recargas em poucos minutos durante a operação da frota. Por sua vez, a tecnologia *wireless* utiliza potências superiores a 200 kW, permitindo recargas durante o embarque e desembarque de passageiros, porém com custos de implantação significativamente mais elevados (EPE, 2020a).

Além dos custos associados aos equipamentos de recarga, a implantação dessa infraestrutura pode exigir investimentos complementares na rede elétrica local. Em determinadas situações, torna-se necessária a construção ou ampliação de subestações, instalação de transformadores e reforços na rede de distribuição para atender ao aumento da demanda elétrica. Estudos recentes também destacam que a integração entre infraestrutura de recarga, sistemas fotovoltaicos e armazenamento em baterias pode reduzir custos operacionais, minimizar impactos sobre a rede elétrica e aumentar a flexibilidade operacional das frotas elétricas (EPE, 2020a; LIU *et al.*, 2023).

3.11 Análise Econômica de Projetos Energéticos

A análise econômica constitui uma etapa fundamental do planejamento energético, permitindo avaliar a viabilidade financeira de diferentes alternativas tecnológicas e subsidiar a tomada de decisão em projetos de geração, armazenamento e uso da energia. Em empreendimentos dessa natureza, caracterizados por elevados investimentos iniciais e longos períodos de operação, torna-se necessário considerar não apenas o custo de implantação, mas também os custos de operação, manutenção e reposição de equipamentos ao longo de toda a vida útil do sistema (CASAROTTO FILHO; KOPITTKE, 2020; EPE, 2020a).

Entre os principais indicadores utilizados destaca-se o CAPEX, que representa os investimentos necessários para implantação do projeto, incluindo aquisição de equipamentos, instalação e infraestrutura. Por sua vez, o OPEX corresponde aos custos recorrentes de operação e manutenção, abrangendo despesas com energia, substituição de componentes e demais custos necessários ao funcionamento do sistema (EPE, 2020a).

Além desses parâmetros, indicadores financeiros como o VPL, a Taxa Interna de Retorno e o *Payback Time* são amplamente empregados para avaliar a atratividade econômica de investimentos. O VPL representa o valor presente dos fluxos de caixa líquidos gerados pelo projeto ao longo de sua vida útil, permitindo verificar sua viabilidade econômica. A TIR corresponde à taxa de desconto que iguala o valor presente das receitas aos custos do empreendimento, enquanto o *Payback* estima o tempo necessário para recuperação do capital investido (CASAROTTO FILHO; KOPITTKE, 2020).

No presente trabalho, esses indicadores são utilizados para avaliar os diferentes cenários de eletrificação. A análise conjunta dos indicadores econômicos permite comparar as alternativas simuladas no modelo energético HOMER Pro e identificar aquelas que apresentam maior viabilidade técnica, econômica e ambiental.

4 CENÁRIOS ENERGÉTICOS

4.1 Apresentação dos Cenários

Com o objetivo de avaliar a viabilidade técnica, econômica e ambiental da eletrificação do sistema de transporte público de Mariana-MG, foram definidos três cenários de substituição da frota, considerando demanda energética, custos de implantação e operação, disponibilidade de recursos e redução das emissões de gases de efeito estufa, sendo analisado um horizonte de tempo de 20 anos.

- Cenário de Referência: cenário que representa a situação atual do sistema, com frota convencional movida à diesel;
- Cenário Alternativo I com 50% da Frota Eletrificada: cenário com substituição parcial da frota de ônibus com usina solar fotovoltaica dedicada para suprir sua demanda de energia elétrica;
- Cenário Alternativo II com 100% da Frota Eletrificada: cenário com substituição total da frota de ônibus com usina solar fotovoltaica dedicada para suprir sua demanda de energia elétrica.

Para cada cenário, foram analisadas diferentes condições de financiamento, totalizando nove configurações de análise. Foi adotada a taxa de 15% a.a., representando um cenário conservador baseado na taxa Selic vigente durante o desenvolvimento da pesquisa (BANCO CENTRAL DO BRASIL, 2025). A taxa de 9,19% a.a. corresponde ao valor da Taxa de Longo Prazo (TLP) fixado para o primeiro trimestre de 2026, representando um cenário intermediário de financiamento de longo prazo (BNDES, 2026). Por fim, adotou-se a taxa de 6,92% a.a., correspondente à Taxa de Longo Prazo (TLP) projetada para contratos do BNDES assinados em março de 2019, conforme apresentado pela EPE (2020a)², representando um cenário de menor custo de capital.

² A Nota Técnica *Avaliação Técnico-Econômica de Ônibus Elétrico no Brasil*, publicada pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) em 2020, avalia a substituição de ônibus urbanos a diesel por modelos elétricos a bateria no contexto brasileiro. O estudo considera parâmetros de aquisição e operação dos veículos e utiliza indicadores econômicos como VPL, TIR, *payback* e Custo Total de Propriedade (TCO), constituindo uma importante referência nacional para análises sobre a eletrificação do transporte público urbano.

4.2 Premissas para a Caracterização da Frota de Ônibus Atual

A análise parte da caracterização do sistema atual de transporte coletivo que atende o recorte urbano de Mariana, utilizado como cenário de referência para comparação com os cenários eletrificados. Todos os dados utilizados na caracterização do cenário de referência foram obtidos a partir dos estudos técnicos do processo de concessão do transporte público municipal, realizados em 2023, incluindo informações referentes à frota, quilometragem, consumo de combustível, custos operacionais e preços dos insumos (MARIANA, 2023).

Com base nesses documentos, considerou-se uma frota operante de 18 veículos do tipo “Ônibus Básico”, correspondentes aos veículos efetivamente utilizados no atendimento das linhas urbanas consideradas no estudo. Para Mariana, destaca-se a utilização de carrocerias nacionais Marcopolo montadas sobre chassis Mercedes-Benz, conforme representado na Figura 11. A operação dessas linhas totaliza aproximadamente 92.443 km percorridos mensalmente, equivalentes a cerca de 171 km por veículo por dia. Conforme os parâmetros apresentados nos estudos de concessão, adotou-se consumo médio de 0,45 L/km, resultando em demanda mensal aproximada de 40.880 litros de diesel e emissão de cerca de 107 toneladas de CO₂ equivalente por mês (MARIANA, 2023).

Os custos de combustível representam um dos principais componentes operacionais do sistema. Também conforme os valores de referência estabelecidos nos estudos de concessão, foram considerados os preços de R\$ 5,73 por litro de óleo diesel e R\$ 2,50 por litro de ARLA 32, agente redutor utilizado nos veículos a diesel, resultando em gasto mensal aproximado de R\$ 234.288,16 com diesel (MARIANA, 2023).



Figura 11: Modelo de ônibus utilizado pela Transcotta em Mariana

Fonte: Transcotta, via Itatiaia (2025).

4.3 Premissas e Definição da Dinâmica de Recarga

A definição do modelo tecnológico para modernização do sistema de transporte coletivo de Mariana considerou critérios de desempenho operacional e disponibilidade tecnológica. Nesse contexto, foi selecionado o chassi elétrico BYD D9W, representado pela Figura 12, cujas características são compatíveis com a operação proposta. Segundo estudos da SPTrans em parceria com a BYD Brasil (2023), o modelo apresenta autonomia superior a 200 km por carga, valor suficiente para atender ao percurso médio diário de aproximadamente 171 km por veículo em Mariana.

Embora outros fabricantes disponham de soluções tecnicamente compatíveis, como o Marcopolo Attivi Integral, cuja autonomia pode atingir 250 km, a escolha da BYD considerou também o grau de consolidação de sua tecnologia no transporte coletivo brasileiro. A empresa produz chassis de ônibus elétricos em Campinas (SP) desde 2015 e, em 2026, alcançou a marca de 1.000 unidades produzidas no país. Além disso, a tecnologia apresenta ampla aplicação operacional na cidade de São Paulo, onde, em junho de 2026, aproximadamente 550 ônibus elétricos da fabricante encontravam-se em operação (BYD BRASIL, 2026; MARCOPOLO, 2025).



Figura 12 – Frota de ônibus elétricos BYD D9W em São Paulo

Fonte: Estadão (2025).

Para o sistema proposto, foram considerados carregadores de corrente contínua com padrão CCS2 e potência de 60 kW. A Figura 13 exemplifica uma estação de carregamento de ônibus elétricos em funcionamento na cidade de São José dos Campos.



Figura 13 – Imagem representativa de estação de recarga de ônibus elétricos em São José dos Campos

Fonte: Claudio Vieira/PMSJC (2026).

Considerando a janela de carregamento entre 00h00 e 05h30, foi realizado o cálculo do tempo necessário para recarga dos veículos, apresentado na Tabela 1.

Tabela 1: Cálculo do tempo de carregamento dos veículos

BYD D9W	Consumo (kWh/km)	Capacidade da bateria (kWh)	Autonomia (km)
	1,3	344	264,62
Consumo diário de um veículo	Distância percorrida (km)	Consumo (km/kWh)	Energia consumida por dia (kWh)
	171	0,77	222,08
Para carregar 100% da bateria	Percentual inicial da bateria	Potência do carregador (kW)	Tempo para recarga (h)
	35	60	3,7

Fonte: Adaptado de BYD (2023) e Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2020a).

4.4 Curvas de Cargas Elétricas

A curva de carga representa a demanda de energia elétrica necessária para atendimento da frota eletrificada, sendo utilizada como parâmetro para o dimensionamento do sistema fotovoltaico e da infraestrutura energética. Considerando

os cenários alternativos propostos e o horário de carregamento estabelecido entre 00h00 e 05h30, as curvas de carga adotadas são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2: Curvas de carga para os cenários alternativos

Horas do dia	Cenário Alternativo I (kWh)	Cenário Alternativo II (kWh)
00:00	300	540
01:00	600	1080
02:00	600	1080
03:00	600	1080
04:00	325	585
05:00	25	45
Restante do dia	-	-

Fonte: Elaboração Própria.

4.5 Premissas Técnicas e Econômicas do Projeto

Tabela 3: Premissas técnicas do projeto

Parâmetro	Valor	Fonte
Tempo de vida do projeto (anos)	20	Premissa adotada no estudo
Emissão de dióxido de carbono (g/kWh)	50	EPE – BEN 2024
Redução de capacidade do sistema (%)	80	Premissa adotada no HOMER Pro
Vida útil do conversor (anos)	15	Premissa adotada no HOMER Pro
Eficiência do conversor (%)	95	Premissa adotada no HOMER Pro
Radiação solar média anual no município (kWh/m²/dia)	4,93	Base de dados meteorológicos integrada ao HOMER Pro
Horário da janela de carregamento	00:00 às 05:30	Premissa operacional adotada no estudo
Emissão anual do ônibus convencional (t CO ₂ eq.)	71,33	Calculado a partir dos dados operacionais de MARIANA (2023)

Fonte: Adaptado de EPE (2020a; 2025), Mariana (2023), fabricantes e elaboração própria.

Tabela 4: Premissas econômicas do projeto

Parâmetro	Valor	Fonte
Taxa de juros (%)	15; 9,19; 6,92	Banco Central do Brasil; EPE (2020)
Taxa de inflação (%)	5	Banco Central do Brasil
Preço unitário do kWh (R\$)	0,6075	CEMIG
Aquisição e instalação de placa fotovoltaica 625 W (R\$)	1800	Cotação de mercado adotada no estudo
O&M anual placas fotovoltaicas (R\$)	90	Premissa adotada no estudo
Aquisição e instalação de conversor de 350 kW (R\$)	40.000	Cotação de mercado adotada no estudo
O&M anual conversor (R\$)	2.000	Premissa adotada no estudo
Valor do ônibus convencional novo (R\$)	577.979,54	MARIANA (2023)
Valor do ônibus elétrico novo (R\$)	2.500.000	Cotação/modelo adotado no estudo
Valor da manutenção do ônibus convencional (R\$/km)	5,32	MARIANA (2023)
Valor da manutenção do ônibus elétrico (R\$/km)	2,13	Estimativa adotada no estudo
Troca da bateria do ônibus elétrico (R\$)	600.000	Cotação/premissa adotada no estudo
Valor do carregador duplo de 120 kW (R\$)	140.000	Cotação adotada no estudo
Valor residual do ônibus convencional (R\$)	144.494,89	MARIANA (2023) / cálculo do estudo
Valor residual do ônibus elétrico (R\$)	500.000,00	Premissa adotada no estudo
Valor residual da bateria do ônibus elétrico (R\$)	60.000,00	Premissa adotada no estudo

Fonte: Adaptado de EPE (2020a; 2025), Mariana (2023), Banco Central do Brasil (2025), BNDES (2026), CEMIG (2026), fabricantes e elaboração própria.

Os parâmetros definidos nas tabelas 3 e 4 e incorporados a modelagem energética e a análise de investimentos são de fundamental importância para estudo da viabilidade técnica e econômica do sistema.

4.6 Resultados das Simulações

A partir das premissas definidas para a modelagem energética no HOMER, foram realizadas simulações dos cenários alternativos para dimensionamento do sistema fotovoltaico. A Tabela 5 apresenta um resumo dos resultados obtidos. O Cenário de Referência não foi incluído por não utilizar geração fotovoltaica.

Tabela 5: Resumo dos resultados das simulações

Cenário	Juros (%)	CAPEX solar (R\$)	OPEX solar (R\$)	Eletricidade gerada (kWh)	Emissão anual solar (t CO ₂ eq.)
Alternativo I	15	1.820.000	439.480	930.152	46,51
	9,19	1.830.000	435.254	937.824	46,89
	6,92	1.900.000	435.845	979.054	48,95
Alternativo II	15	3.280.000	788.177	1.678.056	83,90
	9,19	3.330.000	780.284	1.698.034	84,90
	6,92	3.300.000	780.223	1.698.034	84,90

Fonte: Elaboração própria.

Considerando módulos fotovoltaicos de 625 W, o Cenário Alternativo I demandaria aproximadamente 998 módulos, correspondendo a uma potência instalada de cerca de 624 kWp, enquanto o Cenário Alternativo II exigiria aproximadamente 1.779 módulos, totalizando cerca de 1,11 MWp. Adotando uma ocupação de 1,5 hectare por MWp instalado, valor correspondente ao limite superior da faixa média de 1 a 1,5 ha/MWp indicada para usinas fotovoltaicas com estrutura fixa (ANGRA DOS REIS, 2026), estima-se uma área aproximada de 9.350 m² para o Cenário Alternativo I e 16.680 m² para o Cenário Alternativo II, equivalentes a aproximadamente 1,3 e 2,3 campos de futebol, respectivamente.

Em relação ao porte, ambas as usinas se enquadram como minigeração distribuída, uma vez que apresentam potência instalada superior a 75 kW e inferior ao limite de 3 MW estabelecido para fontes não despacháveis pela Lei nº 14.300/2022 (BRASIL, 2022). A Figura 14 exemplifica uma usina solar de capacidade semelhante ao Cenário Alternativo II.



Figura 14 – Imagem representativa de usina solar de 1MWp – UFV Candelária, Rio Grande do Sul

Fonte: Usinas de Investimento Brasil ([s. d.]).

4.7 Análise de Investimento dos Cenários

A Tabela 6 apresenta os dados utilizados na análise econômica dos cenários considerando um horizonte de planejamento de 20 anos. Para o cenário de eletrificação parcial (Alternativo I), foram considerados 8 veículos elétricos e 10 veículos movidos a diesel. O parâmetro denominado reinvestimento líquido corresponde aos custos de substituição dos veículos e das baterias ao longo do projeto, descontados os respectivos valores residuais.

Tabela 6: Resumo das entradas para a análise de investimentos

Cenário	Juros (%)	CAPEX (R\$)	O&M (R\$)	Reinvestimento líquido (R\$)	Emissão total (tCO ₂ eq)
Referência	15; 9,19; 6,92	-	174.261.312,86	5.201.815,86	25.680
Alternativo I	15	26.075.051,15	112.468.440,04	2.711.918,16	12.343,49
	9,19	26.085.051,15	112.383.920,04	2.711.918,16	12.351,16
	6,92	26.155.051,15	112.395.740,04	2.711.918,16	12.392,39
Alternativo II	15	46.939.092,07	62.976.401,79	720.000	1.678,06
	9,19	46.989.092,07	62.818.541,79	720.000	1.698,03
	6,92	46.959.092,07	62.817.321,79	720.000	1.698,03

Fonte: Elaboração Própria.

A partir dos dados apresentados na Tabela 6, foram calculados o VPL, a TIR e o *Payback Time* de cada cenário, cujos resultados são apresentados na Tabela 7.

Tabela 7: Resumo dos resultados obtidos das análises de investimento

Cenário	Juros (%)	VPL (R\$)	TIR (%)	<i>PayBack Time</i> (Ano)
Referência	15	-56.307.763,80	-	-
	9,19	-81.263.171,38	-	-
	6,92	-96.197.112,14	-	-
Alternativo I	15	-63.089.786,29	-4	-
	9,19	-79.313.511,00	1	18
	6,92	-88.990.170,83	3	14
Alternativo II	15	-68.501.333,59	-4	-
	9,19	-77.761.203,96	1	18
	6,92	-83.058.800,22	3	14

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados da Tabela 7 indicam que os cenários de eletrificação não apresentaram atratividade econômica nas condições avaliadas, uma vez que a TIR permaneceu inferior às taxas de juros adotadas. Embora tenha sido observado *Payback* para as menores taxas de juros, o retorno ocorreu apenas entre os anos 14 e 18, evidenciando elevado tempo de recuperação do investimento. Para a elaboração do fluxo de caixa, convencionou-se a substituição da frota de ônibus e das baterias dos veículos elétricos no 10º ano do horizonte de análise. Nesse mesmo período, considerou-se a venda dos ativos substituídos, incorporando ao fluxo de caixa seus respectivos valores residuais. A Tabela 8 apresenta, de forma detalhada, o fluxo de caixa ano a ano do estudo.

Tabela 8: Fluxo de caixa ano a ano

Ano	Cenário de Referência	Cenário Alternativo I	Cenário Alternativo II
Taxa de Juros a 15% a.a.			
0	R\$ -	-R\$ 26.075.051,15	-R\$ 46.939.092,07
1	-R\$ 7.576.578,82	-R\$ 4.889.932,18	-R\$ 2.738.104,43
2	-R\$ 6.588.329,41	-R\$ 4.252.114,94	-R\$ 2.380.960,37
3	-R\$ 5.728.982,09	-R\$ 3.697.491,25	-R\$ 2.070.400,32
4	-R\$ 4.981.723,56	-R\$ 3.215.209,78	-R\$ 1.800.348,11
5	-R\$ 4.331.933,53	-R\$ 2.795.834,59	-R\$ 1.565.520,09
6	-R\$ 3.766.898,72	-R\$ 2.431.160,51	-R\$ 1.361.321,82
7	-R\$ 3.275.564,11	-R\$ 2.114.052,62	-R\$ 1.183.758,10
8	-R\$ 2.848.316,61	-R\$ 1.838.306,63	-R\$ 1.029.354,87
9	-R\$ 2.476.797,06	-R\$ 1.598.527,50	-R\$ 895.091,19
10	-R\$ 4.082.450,56	-R\$ 3.582.027,54	-R\$ 3.180.975,51
11	-R\$ 1.872.814,41	-R\$ 1.208.716,45	-R\$ 676.817,54
12	-R\$ 1.628.534,27	-R\$ 1.051.057,78	-R\$ 588.536,99
13	-R\$ 1.416.116,76	-R\$ 913.963,29	-R\$ 511.771,30
14	-R\$ 1.231.405,87	-R\$ 794.750,68	-R\$ 445.018,52
15	-R\$ 1.070.787,72	-R\$ 691.087,55	-R\$ 386.972,62
16	-R\$ 931.119,75	-R\$ 600.945,70	-R\$ 336.497,93
17	-R\$ 809.669,35	-R\$ 522.561,48	-R\$ 292.606,90
18	-R\$ 704.060,31	-R\$ 454.401,28	-R\$ 254.440,78
19	-R\$ 612.226,35	-R\$ 395.131,55	-R\$ 221.252,85
20	-R\$ 373.454,54	R\$ 32.538,16	R\$ 357.508,72
Taxa de Juros a 9,19% a.a.			
0	R\$ -	-R\$ 26.085.051,15	-R\$ 46.989.092,07
1	-R\$ 7.979.728,59	-R\$ 5.146.255,15	-R\$ 2.876.570,28
2	-R\$ 7.308.113,00	-R\$ 4.713.119,47	-R\$ 2.634.463,12
3	-R\$ 6.693.024,09	-R\$ 4.316.438,75	-R\$ 2.412.732,96
4	-R\$ 6.129.704,27	-R\$ 3.953.144,75	-R\$ 2.209.664,77
5	-R\$ 5.613.796,38	-R\$ 3.620.427,47	-R\$ 2.023.687,85
6	-R\$ 5.141.309,99	-R\$ 3.315.713,40	-R\$ 1.853.363,73
7	-R\$ 4.708.590,52	-R\$ 3.036.645,67	-R\$ 1.697.374,97
8	-R\$ 4.312.290,98	-R\$ 2.781.065,73	-R\$ 1.554.515,04
9	-R\$ 3.949.346,08	-R\$ 2.546.996,73	-R\$ 1.423.678,94
10	-R\$ 6.855.997,92	-R\$ 6.013.841,75	-R\$ 5.338.799,56
11	-R\$ 3.312.527,25	-R\$ 2.136.302,04	-R\$ 1.194.115,48

12	-R\$ 3.033.727,68	-R\$ 1.956.499,72	-R\$ 1.093.612,49
13	-R\$ 2.778.393,33	-R\$ 1.791.830,49	-R\$ 1.001.568,36
14	-R\$ 2.544.549,26	-R\$ 1.641.020,69	-R\$ 917.271,14
15	-R\$ 2.330.386,72	-R\$ 1.502.903,83	-R\$ 840.068,82
16	-R\$ 2.134.249,21	-R\$ 1.376.411,60	-R\$ 769.364,25
17	-R\$ 1.954.619,67	-R\$ 1.260.565,62	-R\$ 704.610,54
18	-R\$ 1.790.108,68	-R\$ 1.154.469,84	-R\$ 645.306,84
19	-R\$ 1.639.443,79	-R\$ 1.057.303,64	-R\$ 590.994,45
20	-R\$ 1.053.263,98	R\$ 92.496,50	R\$ 1.009.651,70
Taxa de Juros a 6,92% a.a.			
0	R\$ -	-R\$ 26.155.051,15	-R\$ 46.959.092,07
1	-R\$ 8.149.144,82	-R\$ 5.256.067,16	-R\$ 2.937.585,19
2	-R\$ 7.621.721,68	-R\$ 4.915.887,72	-R\$ 2.747.460,90
3	-R\$ 7.128.434,05	-R\$ 4.597.725,14	-R\$ 2.569.641,69
4	-R\$ 6.667.072,62	-R\$ 4.300.154,46	-R\$ 2.403.331,18
5	-R\$ 6.235.571,10	-R\$ 4.021.842,93	-R\$ 2.247.784,49
6	-R\$ 5.831.996,91	-R\$ 3.761.544,08	-R\$ 2.102.304,99
7	-R\$ 5.454.542,57	-R\$ 3.518.092,10	-R\$ 1.966.241,10
8	-R\$ 5.101.517,55	-R\$ 3.290.396,65	-R\$ 1.838.983,45
9	-R\$ 4.771.340,77	-R\$ 3.077.437,95	-R\$ 1.719.962,07
10	-R\$ 4.458.821,03	-R\$ 2.842.084,85	-R\$ 1.586.894,62
11	-R\$ 4.173.712,55	-R\$ 2.691.977,37	-R\$ 1.504.530,41
12	-R\$ 3.903.584,50	-R\$ 2.517.749,13	-R\$ 1.407.155,26
13	-R\$ 3.650.939,49	-R\$ 2.354.797,17	-R\$ 1.316.082,36
14	-R\$ 3.414.645,99	-R\$ 2.202.391,66	-R\$ 1.230.903,82
15	-R\$ 3.193.645,70	-R\$ 2.059.850,04	-R\$ 1.151.238,14
16	-R\$ 2.986.948,84	-R\$ 1.926.533,89	-R\$ 1.076.728,53
17	-R\$ 2.793.629,67	-R\$ 1.801.846,14	-R\$ 1.007.041,27
18	-R\$ 2.612.822,36	-R\$ 1.685.228,34	-R\$ 941.864,26
19	-R\$ 2.443.717,14	-R\$ 1.576.158,19	-R\$ 880.905,60
20	-R\$ 1.603.302,80	R\$ 140.645,29	R\$ 1.536.931,18

Fonte: Elaboração Própria.

4.8 Avaliação Direta do Custo por Tonelada de CO₂ Evitada

A avaliação do custo por tonelada de CO₂ equivalente evitada foi realizada a partir da relação entre o VPL incremental e a redução acumulada das emissões ao longo do horizonte do projeto. A Tabela 9 apresenta os resultados obtidos para os cenários analisados.

Tabela 9: Resumo do custo por tonelada de CO₂ evitada

Cenário	Juros (%)	VPL incremental (R\$)	Redução na emissão (t CO ₂ eq.)	Valor tCO ₂ eq. (R\$)
Alternativo I	15	-6.782.022,49	-13.336,51	508,53
	9,19	1.949.660,38	-13.328,84	-146,27
	6,92	7.206.941,31	-13.287,61	-542,38
Alternativo II	15	-12.193.569,79	-24.001,94	508,02
	9,19	3.501.967,42	-23.981,97	-146,03
	6,92	13.138.311,92	-23.981,97	-547,84

Fonte: Elaboração Própria.

Os resultados demonstram influência significativa da taxa de juros sobre a viabilidade dos cenários de eletrificação. Para a taxa de 15%, ambos os cenários apresentaram custos positivos de abatimento, próximos de R\$ 508/tCO₂eq, indicando necessidade de investimento adicional para cada tonelada de emissão evitada.

Para as taxas de 9,19% e 6,92%, observaram-se custos negativos por tonelada evitada, indicando situações em que a redução das emissões ocorre simultaneamente à obtenção de ganhos econômicos líquidos. De forma geral, os resultados evidenciam que menores taxas de juros reduzem significativamente os custos associados à mitigação das emissões e aumentam a atratividade econômica dos projetos.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FINAIS

O presente trabalho analisou a viabilidade técnica, econômica e ambiental da eletrificação parcial e total da frota de ônibus do transporte público do município de Mariana-MG, utilizando uma abordagem de Planejamento Energético Integrado e simulações realizadas no *software* HOMER Pro. Os resultados demonstraram que a integração entre ônibus elétricos e geração de energia solar fotovoltaica é tecnicamente viável e proporciona expressiva redução das emissões de gases de efeito estufa, além de contribuir para a diminuição da dependência de combustíveis fósseis.

Do ponto de vista ambiental, os resultados foram particularmente significativos. Ao longo do horizonte de 20 anos, o Cenário de Referência apresentou emissões acumuladas de aproximadamente 25,7 mil tCO₂eq, enquanto o Cenário Alternativo I, correspondente à eletrificação parcial da frota, reduziu esse valor para cerca de 12,4 mil tCO₂eq. No Cenário Alternativo II, com eletrificação total, as emissões foram reduzidas para aproximadamente 1,7 mil tCO₂eq, representando uma redução próxima de 93% em relação ao sistema convencional. Esses resultados evidenciam o potencial da associação entre eletromobilidade e geração renovável como estratégia de descarbonização do transporte coletivo.

Sob a perspectiva econômica, verificou-se elevada sensibilidade dos indicadores financeiros às taxas de juros adotadas e à escala do projeto. Para a taxa de 6,92% a.a., o projeto apresentou *Payback* no 14º ano e TIR de 3%; para 9,19% a.a., o retorno ocorreu no 18º ano, com TIR de 1%; enquanto, para a taxa de 15% a.a., não houve recuperação do investimento dentro do horizonte analisado. Em todos os casos, a TIR permaneceu inferior à respectiva taxa de juros considerada, evidenciando a influência do custo de capital sobre a atratividade econômica da eletrificação. Por outro lado, a análise incremental demonstrou que, para as taxas de 9,19% e 6,92%, a redução das emissões pode ocorrer simultaneamente à obtenção de ganhos econômicos em relação ao cenário de referência, reforçando a importância das condições de financiamento para a viabilização desses projetos.

A relevância dos resultados obtidos torna-se ainda maior quando considerada a estrutura dos municípios brasileiros. Conforme apresentado na justificativa deste trabalho, dos 5.570 municípios existentes no país, 3.770 possuíam população inferior a 20 mil habitantes, enquanto apenas 326 apresentavam população superior a 100 mil habitantes. A partir desses valores, observa-se que aproximadamente 1.474 municípios encontravam-se na faixa intermediária entre 20 mil e 100 mil habitantes e que cerca de

94% dos municípios brasileiros possuíam até 100 mil habitantes (IBGE, 2021). Dessa forma, embora os grandes centros urbanos concentrem parcela significativa da população e da demanda por transporte coletivo, a estrutura municipal brasileira evidencia a importância da investigação de alternativas energéticas também para cidades de pequeno e médio porte.

Essa dimensão pode ser observada de forma mais específica a partir dos dados do Sistema de Informações da Mobilidade Urbana da ANTP. No universo considerado pelo SIMOB/ANTP, os municípios com população entre 60 mil e 100 mil habitantes, faixa na qual se enquadra Mariana, reuniam aproximadamente 7.370 ônibus em operação em 2024 e transportavam cerca de 717 milhões de passageiros por ano (ANTP, 2026). Considerando o valor unitário de R\$ 2,5 milhões por ônibus elétrico adotado neste trabalho, a substituição integral dessa frota por veículos elétricos demandaria um investimento da ordem de R\$ 18,4 bilhões apenas para aquisição dos veículos, sem considerar os investimentos adicionais necessários em infraestrutura de recarga, geração fotovoltaica e eventuais adequações da rede elétrica.

Como exercício de ordem de grandeza dos benefícios ambientais associados a uma política dessa magnitude, no sistema atual de Mariana os 18 ônibus convencionais correspondem a emissões anuais estimadas em aproximadamente 1.284 tCO₂eq, enquanto o cenário de eletrificação total apresentou emissões próximas de 85 tCO₂eq por ano. Dessa forma, a redução obtida foi de aproximadamente 1.199 tCO₂eq por ano para os 18 veículos, equivalente a cerca de 66,6 tCO₂eq evitadas por ônibus ao ano. Mantidas condições operacionais e de suprimento energético semelhantes às consideradas neste estudo, a eletrificação dos 7.370 ônibus identificados pelo SIMOB/ANTP poderia representar uma redução da ordem de 491 mil tCO₂eq por ano. Essa estimativa deve ser interpretada como um exercício de extrapolação e não como uma projeção direta, uma vez que quilometragem percorrida, topografia, consumo energético, condições operacionais e características do suprimento elétrico variam entre os municípios.

Os resultados evidenciam que a eletrificação do transporte público não deve ser avaliada apenas por indicadores financeiros, uma vez que, por se tratar de um serviço público essencial, também devem ser consideradas as externalidades sociais e ambientais associadas à tecnologia. Entre esses benefícios destacam-se a redução das emissões de gases de efeito estufa e de poluentes atmosféricos, a diminuição de ruído e vibração, a melhoria do conforto dos passageiros e os potenciais ganhos à qualidade do ar e à saúde da população. Nesse sentido, a menor atratividade financeira observada em determinadas condições não implica, isoladamente, a inviabilidade da eletrificação, pois, sob a perspectiva do Planejamento Energético Integrado, a tomada de decisão deve incorporar dimensões técnicas, econômicas, sociais e ambientais, incluindo benefícios

que não são diretamente capturados pelo fluxo de caixa do projeto, como a redução potencial de aproximadamente 491 mil tCO₂eq por ano estimada para uma eletrificação em escala equivalente à frota dos municípios analisados.

Dessa forma, conclui-se que a eletrificação do transporte coletivo associada à geração solar fotovoltaica apresenta elevado potencial técnico e ambiental para municípios de pequeno e médio porte, embora sua implementação em maior escala dependa de mecanismos capazes de reduzir as barreiras decorrentes do elevado investimento inicial. A criação de linhas de financiamento com menor custo de capital, políticas públicas de incentivo e modelos de negócio que distribuam os investimentos entre diferentes agentes podem desempenhar papel decisivo nesse processo, especialmente em municípios com menor capacidade de investimento. Nesse contexto, iniciativas nacionais como o Novo PAC – Mobilidade Urbana Sustentável e as linhas do Fundo Clima operadas pelo BNDES demonstram a existência de mecanismos voltados à renovação e à eletrificação das frotas, incluindo o financiamento de ônibus elétricos e de infraestrutura de recarga. A atuação de organismos internacionais também pode contribuir para ampliar a disponibilidade de recursos e assistência técnica, como exemplificado pela parceria entre o Banco Mundial e a Caixa Econômica Federal para estruturação de uma linha nacional de crédito destinada à aquisição de ônibus elétricos e à infraestrutura associada. A ordem de grandeza de R\$ 18,4 bilhões estimada para aquisição de uma frota elétrica equivalente aos 7.370 ônibus considerados pelo SIMOB/ANTP evidencia a necessidade de políticas estruturadas e de longo prazo para promover essa transição. Ao mesmo tempo, as condições atuais de acesso a determinados programas reforçam a necessidade de instrumentos especificamente adequados à realidade dos municípios de menor porte, uma vez que algumas modalidades do Novo PAC destinadas diretamente ao setor público estabelecem critérios de elegibilidade associados ao porte populacional.

Como trabalhos futuros, recomenda-se ampliar a análise para diferentes municípios e perfis operacionais, permitindo avaliar em que medida os resultados encontrados para Mariana podem ser reproduzidos em outras localidades. Recomenda-se também investigar diferentes modelos de financiamento, incentivos fiscais, comercialização de créditos de carbono, compartilhamento de infraestrutura de recarga e alternativas de contratação e propriedade dos veículos. Nesse sentido, estudos futuros podem avaliar de forma específica a aplicação de instrumentos como o Fundo Clima, o Novo PAC e linhas de crédito apoiadas por organismos multilaterais, considerando taxas de financiamento, prazos, contrapartidas e critérios de elegibilidade e seus efeitos sobre a viabilidade econômica da eletrificação em municípios de pequeno e médio porte. Por fim, sugere-se a realização de análises de custo-benefício social que permitam valorar economicamente externalidades relacionadas à qualidade do ar, saúde pública, redução

de ruído e emissões de gases de efeito estufa, possibilitando uma avaliação mais abrangente dos benefícios associados à eletrificação do transporte público e fornecendo subsídios mais completos à tomada de decisão dos gestores públicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012**. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e o sistema de compensação de energia elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2012.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012, e os Módulos 1 e 3 dos Procedimentos de Distribuição – PRODIST. Brasília, DF: ANEEL, 2015.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021**. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2021.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023**. Aprimora as regras para a conexão e o faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída em sistemas de distribuição de energia elétrica e as regras do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2023.

ALTENBURG, Tilman; CORROCHER, Nicoletta; MALERBA, Franco. China's leapfrogging in electromobility: a story of green transformation driving catch-up and competitive advantage. **Technological Forecasting and Social Change**, v. 183, art. 121914, 2022. DOI: 10.1016/j.techfore.2022.121914. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.techfore.2022.121914>. Acesso em: 5 ago. 2026.

ANGRA DOS REIS. Prefeitura Municipal. **Caderno 1 – Modelagem técnica**. Angra dos Reis: Fundação Ezute, 2026. Disponível em: Caderno 1 – Modelagem Técnica. Acesso em: 27 ago. 2026.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). **Rotas tecnológicas de descarbonização para o transporte público**. Caderno Técnico 29. São Paulo: ANTP, 2024. Disponível em: <https://files.antp.org.br/2024/7/22/caderno-tecnico-29--rotas-tecnologicas-de-descarbonizacao-para-transporte-publico.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2026.

ASSOCIAÇÃO NACIONAL DE TRANSPORTES PÚBLICOS (ANTP). **Sistema de**

Informações da Mobilidade Urbana da ANTP: Relatório Geral 2024. São Paulo: ANTP, 2026. Disponível em: <https://files.antp.org.br/simob/simob-2024-final.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2026.

BANCO CENTRAL DO BRASIL. **Taxa Selic.** Brasília, DF: Banco Central do Brasil, 2025. Disponível em: <https://www.bcb.gov.br/controleinflacao/taxaselic>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **BNDES é o maior financiador de ônibus elétricos da América Latina, aponta estudo.** Rio de Janeiro: BNDES, 2025. Disponível em: <https://agenciadenoticias.bndes.gov.br/infraestrutura/BNDES-e-o-maior-financiador-de-onibus-eletricos-da-America-Latina-aponta-estudo/>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E SOCIAL (BNDES). **Taxa de Longo Prazo – TLP.** Rio de Janeiro: BNDES, 2026. Disponível em: <https://www.bndes.gov.br/wps/portal/site/home/financiamento/guia/custos-financeiros/tlp-taxa-de-longo-prazo/>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BELO HORIZONTE. Prefeitura Municipal. **Plano Local de Ação Climática de Belo Horizonte (PLAC-BH).** Belo Horizonte: Prefeitura Municipal de Belo Horizonte; ICLEI – Governos Locais pela Sustentabilidade, 2022. Disponível em: <https://prefeitura.pbh.gov.br/sites/default/files/estrutura-de-governo/meio-ambiente/placfinal.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2026.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022.** Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e o Programa de Energia Renovável Social (PERS). Brasília, DF: Presidência da República, 2022.

BYD BRASIL. **D9W 20.410: chassi para ônibus elétrico.** Campinas: BYD Brasil, 2023. Disponível em: <https://bydbrasil.com.br/chassi-byd-d9w-20-410/>. Acesso em: 25 fev. 2026.

BYD BRASIL. **BYD chega a histórica marca de 1.000 chassis para ônibus elétricos produzidos no Brasil.** Campinas, 25 ago. 2026. Disponível em: BYD Brasil – 1.000 chassis elétricos produzidos. Acesso em: 27 ago. 2026.

CASAROTTO FILHO, Nelson; KOPITTKKE, Bruno Hartmut. **Análise de investimentos: manual para solução de problemas e tomadas de decisão.** 12. ed. São Paulo: Atlas, 2020.

CEMIG. **Valores de tarifas e serviços**. Belo Horizonte: CEMIG, 2026. Disponível em: <https://www.cemig.com.br/atendimento/valores-de-tarifas-e-servicos/>. Acesso em: 25 fev. 2026.

CHAKRABARTI, Sandip. The demand for reliable transit service: new evidence using stop-level data from the Los Angeles Metro bus system. **Journal of Transport Geography**, v. 48, p. 154–164, 2015. DOI: 10.1016/j.jtrangeo.2015.09.006.

CHEN, Yang et al. **Electrification of public transport: a case study of the Shenzhen Bus Group**. Washington, DC: World Bank, 2021. DOI: 10.1596/35935. Disponível em: <https://documents.worldbank.org/en/publication/documents-reports/documentdetail/708531625052490238/electrification-of-public-transport-a-case-study-of-the-shenzhen-bus-group>. Acesso em: 5 ago. 2026.

CONFEDERAÇÃO NACIONAL DO TRANSPORTE (CNT). **Pesquisa CNT de mobilidade da população urbana**. Brasília, DF: CNT, 2024. 134 p. ISBN 978-85-68865-21-7. Disponível em: <https://data.cnt.org.br/transporte/rodoviario/pesquisa-cnt-de-mobilidade-da-populacao-urbana/>. Acesso em: 28 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Avaliação técnico-econômica de ônibus elétrico no Brasil**. Brasília, DF: EPE, 2020a. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-480/topico-527/NT%20SEE-SDB%20-%20Avalia%C3%A7%C3%A3o%20T%C3%A9cnico-Econ%C3%B4mica%20de%20%C3%94nibus%20El%C3%A9trico%20no%20Brasil.pdf>. Acesso em: 27 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Nacional de Energia 2050**. Rio de Janeiro: EPE, 2020b. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Nacional-de-Energia-2050>. Acesso em: 28 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Atlas da Eficiência Energética Brasil 2023**. Rio de Janeiro: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/publicacoes/atlas-de-eficiencia-energetica-brasil-2023>. Acesso em: 28 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Plano Decenal de Expansão de Energia 2034**. Rio de Janeiro: EPE, 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-decenal-de-expansao-de-energia-2034>. Acesso em: 28 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2025: síntese – ano-base 2024**. Rio de Janeiro: EPE, 2025. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-767/BEN_S%C3%ADntese_2025_PT.pdf. Acesso em: 28 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). **Balanco Energético Nacional 2026: ano-base 2025**. Rio de Janeiro: EPE, 2026. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/balanco-energetico-nacional-2026>. Acesso em: 28 jul. 2026.

ESTADÃO. BYD entrega 60 ônibus elétricos para o transporte público de São Paulo. **Jornal do Carro**, São Paulo, 2025. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/jornal-do-carro/estradao/byd-entrega-60-onibus-eletricos-para-o-transporte-publico-de-sao-paulo/>. Acesso em: 27 ago. 2026.

FERREIRA, Thiago Vasconcellos Barral; MACHADO, Giovani Vitória. O papel do planejamento na transição energética: mais luz e menos calor. **Revista Brasileira de Energia**, v. 27, n. 2, p. 40–64, 2021. DOI: 10.47168/rbe.v27i2.635. Disponível em: <https://sbpe.org.br/index.php/rbe/article/view/635>. Acesso em: 28 jul. 2026.

HOMER ENERGY. **HOMER Pro**, version 3.18. Boulder, CO: HOMER Energy LLC, 2025. Software.

INSTITUTE FOR TRANSPORTATION AND DEVELOPMENT POLICY (ITDP). **Advancing E-Buses: a guide to batteries and charging**. New York: ITDP, 2025. Disponível em: <https://itdp.org/publication/advancing-e-buses-a-guide-to-batteries-and-charging/>. Acesso em: 5 ago. 2026.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **IBGE divulga estimativa da população dos municípios para 2021**. Rio de Janeiro: IBGE, 2021. Disponível em: <https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/agencia-sala-de-imprensa/2013-agencia-de-noticias/releases/31461-ibge-divulga-estimativa-da-populacao-dos-municipios-para-2021>. Acesso em: 27 jul. 2026.

INSTITUTO DE POLÍTICAS DE TRANSPORTE E DESENVOLVIMENTO (ITDP BRASIL). **Metodologia para avaliação de corredores de transporte de média e alta capacidade**. Rio de Janeiro: ITDP Brasil, 2017. Disponível em: <https://itdpbrasil.org/wp-content/uploads/2017/12/ITDP-Brasil-PP-Metodologia-avalia%C3%A7%C3%A3o-TMA-v1.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change: contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge; New York: Cambridge University Press, 2022. DOI: 10.1017/9781009157926. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/>. Acesso em: 28 jul. 2026.

INTERNATIONAL COUNCIL ON CLEAN TRANSPORTATION (ICCT). **China's zero-emission truck and bus market reaches historic high of 230,000 units sold in 2024**. Washington, DC: ICCT, 2025. Disponível em: <https://theicct.org/pr-chinas-zero-emission-truck-and-bus-market-reaches-historic-high-of-230000-units-sold-in-2024/>. Acesso em: 28 jul. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Energy Efficiency 2024**. Paris: IEA, 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2024>. Acesso em: 28 jul. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2025**. Paris: IEA, 2025. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2025>. Acesso em: 5 ago. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). Electric vehicle batteries. In: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2026**. Paris: IEA, 2026. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2026/electric-vehicle-batteries>. Acesso em: 5 ago. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). **Renewable power generation costs in 2023**. Abu Dhabi: IRENA, 2024. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023>. Acesso em: 28 jul. 2026.

KALTHAUS, Martin; SUN, Jiatang. Determinants of electric vehicle diffusion in China. **Environmental and Resource Economics**, v. 80, p. 473–510, 2021. DOI: 10.1007/s10640-021-00596-4. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10640-021-00596-4>. Acesso em: 5 ago. 2026.

KHALIL, Linta; BHATTI, Kamran Liaquat; AWAN, M. Arslan Iqbal; RIAZ, Mughees; KHALIL, Kiran; ALWAZ, Nashitah. Optimization and designing of hybrid power system using HOMER Pro. **Materials Today: Proceedings**, v. 47, p. S110–S115, 2021. DOI: 10.1016/j.matpr.2020.06.054.

LIU, Xiaohan et al. Optimal location planning of electric bus charging stations with integrated photovoltaic and energy storage system. **Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering**, v. 38, n. 11, p. 1424–1446, 2023. DOI: 10.1111/mice.12935. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/mice.12935>. Acesso em: 5 ago. 2026.

MANZOLLI, Jônatas Augusto; TROVÃO, João Pedro; ANTUNES, Carlos Henggeler. A review of electric bus vehicles research topics: methods and trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 159, art. 112211, 2022. DOI: 10.1016/j.rser.2022.112211. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112211>. Acesso em: 5 ago. 2026.

MAO, Shiyue; RODRÍGUEZ, Felipe. **Race to zero: how manufacturers are positioned for zero-emission commercial trucks and buses in China**. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2021. Disponível em: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/china-race-to-zero-aug2021.pdf>. Acesso em: 5 ago. 2026.

MARCOPOLO. **Ônibus elétrico Attivi Integral Marcopolo é aprovado pela SPTrans para atender operadoras da capital paulista**. Caxias do Sul, 28 jul. 2025. Disponível em: Marcopolo – Attivi Integral. Acesso em: 28 ago. 2026.

MARIANA (MG). Prefeitura Municipal. **Editais de Concorrência Pública n.º 001/2023: concessão do serviço de transporte público coletivo de passageiros**. Mariana, MG: Prefeitura Municipal de Mariana, 2023. Disponível em: <https://www.mariana.mg.gov.br/exibir-licitacao/885>. Acesso em: 25 fev. 2026.

NATIONAL RENEWABLE ENERGY LABORATORY (NREL). **2010 Solar Technologies Market Report**. Golden, CO: National Renewable Energy Laboratory, 2011. Disponível em: NREL – 2010 Solar Technologies Market Report. Acesso em: 26 ago. 2026.

NEW YORK CITY. **PlaNYC: Getting Sustainability Done**. New York: City of New York, 2023. Disponível em: <https://www.nyc.gov/content/climate/pages/planyc-getting-sustainability-done>. Acesso em: 28 jul. 2026.

NWACHUKWU, Sampson E.; FOLLY, Komla A.; AWODELE, Kehinde O.; OMOGOYE, Samuel O.; ADEYEMO, Kunle K. Hybrid Renewable Energy Optimization Using HOMER Pro: A Systematic Literature Review and Future Research Agenda for Emerging Economies. **IEEE Access**, v. 14, p. 10695–10718, 2026. DOI: 10.1109/ACCESS.2026.3654991.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; ABREU, S. L.; TIEPOLO, G. M.; PEREIRA, S. V.; SOUZA, J. G. **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017. 80 p. DOI: 10.34024/978851700089. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 27 jul. 2026.

PHILIPPS, Simon; WARMUTH, Werner. **Photovoltaics Report**. Freiburg: Fraunhofer Institute for Solar Energy Systems ISE, 2026. Atualizado em: 14 jul. 2026. Disponível em: Fraunhofer ISE – Photovoltaics Report. Acesso em: 26 ago. 2026.

RENOVATO, Matheus. Tarifas de ônibus entre Mariana e Ouro Preto têm reajuste de 8% a partir desta quarta (10). **Itatiaia**, 10 set. 2025. Disponível em: <https://www.itatiaia.com.br/ouropreto/tarifas-de-onibus-entre-mariana-e-ouro-preto-tem-reajuste-de-8-a-partir-desta-quarta-10/>. Acesso em: 27 ago. 2026.

RODRIGUES, Hermes; CIEPLINSKI, André; LOGIODICE, Pedro; HAYTZMANN, Guido; REBOUÇAS, Ana Beatriz. **Latin America e-bus market monitor, 2024**. Washington, DC: International Council on Clean Transportation, 2025. Disponível em: <https://theicct.org/publication/latin-america-ebus-market-monitor-2024-may25/>. Acesso em: 5 ago. 2026.

SÃO JOSÉ DOS CAMPOS. **Prefeitura Municipal**. Transporte público ganha nova estação de carregamento elétrico. São José dos Campos, 14 ago. 2026. Disponível em: <https://www.sjc.sp.gov.br/noticias/2026/agosto/14/transporte-publico-ganha-nova-estacao-de-carregamento-eletrico/>. Acesso em: 27 ago. 2026.

SÃO PAULO (Município). **Plano de Ação Climática do Município de São Paulo – PlanClima SP: revisão 2025: versão inicial**. São Paulo: Prefeitura do Município de São Paulo, 2025. Disponível em: <https://participemais.prefeitura.sp.gov.br/system/documents/attachments/000/004/150/original/a6f49c8b4e056678ece8843bc23c70c0be2ac04d.pdf>. Acesso em: 28 jul. 2026.

SILVA, Jefferson Hishiyama da; RODRIGUES, Hermes; LOGIODICE, Pedro. **Características da oferta de ônibus elétricos no Brasil**. [S. l.]: Conselho Internacional de Transporte Limpo (ICCT), 2026. Disponível em: theicct.org/publication/caracteristicas-de-oferta-de-onibus-eletricos-no-brasil-feb26/. Acesso em: 4 ago. 2026.

SILVA, Marcos Vinicius Miranda da; BERMANN, Célio. O planejamento energético como ferramenta de auxílio às tomadas de decisão sobre a oferta de energia na zona rural. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL, 4., 2002, Campinas. **Anais [...]**.

Campinas: UNICAMP/NIPE, 2002. Disponível em: https://www.proceedings.scielo.br/scielo.php?pid=MSC0000000022002000200034&script=sci_arttext. Acesso em: 28 jul. 2026.

SILVA, Sandra Sereide Ferreira da; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. Matriz energética limpa e renovável: um desafio para o planejamento energético nacional e uma oportunidade para a região Nordeste do Brasil. **Revista Espacios**, v. 36, n. 15, p. 13, 2015. Disponível em: <https://www.revistaespacios.com/a15v36n15/15361514.html>. Acesso em: 28 jul. 2026.

TAVARES, Virginia; SIQUEIRA, Eduardo; CORRÊA, Fernando. Ônibus elétricos: testes operacionais e escuta de clientes facilitam transição e evidenciam benefícios. **WRI Brasil**, 19 jan. 2024. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/onibus-eletricos-testes-operacionais-escuta-clientes-facilitam-transicao-evidenciam-beneficios>. Acesso em: 28 jul. 2026.

UNITED STATES. Department of Energy. **Crystalline Silicon Photovoltaics Research**. Washington, DC: U.S. Department of Energy, [s. d.]. Disponível em: U.S. Department of Energy – Crystalline Silicon Photovoltaics Research. Acesso em: 26 ago. 2026.

USINAS DE INVESTIMENTO BRASIL. **Usina 1MW – 1,35 MWp – RGE-RS – GD1**. [S. l.], [s. d.]. Disponível em: <https://www.usinasdeinvestimentobrasil.com.br/produto/usina-1mw-135-mwp-rge-rs-gd1/1842236>. Acesso em: 28 ago. 2026.

VILLEN, Felipe Borim; PIMENTEL, Rafael Coutinho Quaresma; SOUZA, Filipe de Oliveira; MAHER JUNIOR, James Patrick. Impulso à adoção de ônibus elétricos no Brasil. **BNDES Setorial**, Rio de Janeiro, v. 30, n. 58, p. 57–96, set. 2024. Disponível em: <http://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/26107>. Acesso em: 25 fev. 2026.

WRI BRASIL. **Descarbonização do transporte**. São Paulo: WRI Brasil, [s.d.]. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/projetos/descarbonizacao-do-transporte>. Acesso em: 5 ago. 2026.

WRI BRASIL. **ImpactAr: ferramenta de valoração dos impactos da qualidade do ar na saúde para mudanças de frota no Brasil**. [S. l.]: WRI Brasil, 2022. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/publicacoes/impactar-ferramenta-valoracao-impactos-qualidade-ar-saude-onibus-eletrico>. Acesso em: 28 ago. 2026.

ZHOU, Yu; WANG, Hua; WANG, Yun; YU, Bin; TANG, Tianpei. Charging facility planning and scheduling problems for battery electric bus systems: a comprehensive

review. **Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review**, v. 183, art. 103463, 2024. DOI: 10.1016/j.tre.2024.103463. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.tre.2024.103463>. Acesso em: 5 ago. 2026.