

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS - *CAMPUS* BETIM
BACHARELADO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E AUTOMAÇÃO

André Santos Barros

**UM ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA RECARGA DOMÉSTICA DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS COM ENERGIA FOTOVOLTAICA:
análise técnica, econômica e ambiental por simulação**

Betim

2026

ANDRÉ SANTOS BARROS

**UM ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA RECARGA DOMÉSTICA DE
VEÍCULOS ELÉTRICOS COM ENERGIA FOTOVOLTAICA:
análise técnica, econômica e ambiental por simulação**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado à banca examinadora do curso de Engenharia de Controle e Automação do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais *Campus* Betim, como parte dos requisitos para obtenção do título de Bacharel em Engenharia de Controle e Automação

Orientador: Prof. Me. Welinton La Fontaine
Lopes

Betim

2026

FICHA CATALOGRÁFICA

B277e Barros, André Santos

Um estudo sobre a viabilidade da recarga doméstica de veículos elétricos com energia fotovoltaica: análise técnica, econômica e ambiental por simulação / André Santos Barros – 2026.

75 f. : il.

Trabalho de conclusão de curso (Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais, Câmpus Betim, 2026.

Orientação: Prof. Me. Welinton La Fontaine Lopes

1. Veículos elétricos. 2. Sistemas de energia fotovoltaica. 3. Energias renováveis. 4. Recarga doméstica. 5. Engenharia de Controle e Automação. I. Barros, André Santos. II. Título.

CDU: 629.33



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Betim
Diretoria de Ensino
Docentes Automação Industrial e Tecnologia da Informação
Rua Itamarati - CEP 32677-564 - Betim - MG
3135976360 - www.ifmg.edu.br

ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Aos 14 dias do mês de janeiro do ano de 2026, às dezoito horas e trinta minutos, nas dependências do IFMG – *Campus* Betim, reuniu-se a banca examinadora presidida por mim, Welinton La Fontaine Lopes e demais membros, Deliene Costa Guimarães Barros e Jaqueline das Graças Moura Oliveira. Nesta ocasião o discente **André Santos Barros** do curso de Bacharelado em Engenharia de Controle e Automação, com registro acadêmico de número 0040149 do IFMG – *Campus* Betim, defendeu seu Trabalho de Conclusão de Curso (TCC) intitulado “UM ESTUDO SOBRE A VIABILIDADE DA RECARGA DOMÉSTICA DE VEÍCULOS ELÉTRICOS COM ENERGIA FOTOVOLTAICA: análise técnica, econômica e ambiental por simulação” e foi **APROVADO**, com 80,0 (oitenta) pontos.

Este resultado reflete o cumprimento parcial dos critérios de avaliação estabelecidos pelo curso e reconhece os esforços e a dedicação do discente e seu orientador no desenvolvimento do seu TCC. O lançamento da nota e o consequente encerramento do respectivo processo está condicionado ao cumprimento dos procedimentos pós-defesa conforme previstos nos regulamentos vigentes. Tais procedimentos pós-defesa devem ser finalizados dentro do prazo limite de 20 dias, a contar da data desta ata. O descumprimento destes procedimentos até a data estipulada implicará em atribuição de nota 0 (zero) e consequente reprovação.

A sessão foi encerrada às dezenove horas e dezoito minutos. Para constar, eu, Welinton La Fontaine Lopes, redigi a presente ata que após lida publicamente, foi aprovada e assinada pelo discente e membros da banca examinadora.

Betim, 22 de janeiro de 2026.



Documento assinado eletronicamente por **Welinton La Fontaine Lopes, Professor**, em 22/01/2026, às 15:10, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Jaqueline Das Gracas Moura Oliveira, Professora**, em 22/01/2026, às 19:39, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Deliene Costa Guimaraes Barros, Testemunha**, em 26/01/2026, às 18:56, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **2593073** e o código CRC **342B37BF**.

23792.000400/2024-27	2593073v1
----------------------	-----------

AGRADECIMENTOS

Agradeço, acima de tudo, a Deus, pela força e sabedoria para enfrentar os desafios e concluir esta etapa tão importante da minha vida.

À minha família, por todo o suporte e compreensão ao longo desta jornada. Em especial, ao meu filho Bernardo, agradeço a paciência e por entender as horas dedicadas ao estudo.

Ao meu amigo, Breno, obrigado pelo incentivo e pelas conversas que sempre trouxeram novas perspectivas, fortalecendo minha determinação para seguir adiante.

Ao meu orientador, Welinton La Fontaine, expresso o meu agradecimento pela sua orientação, correção e incentivo. A troca de conhecimentos foi fundamental para o desenvolvimento deste trabalho.

Aos professores e a todos que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste estudo, deixo meu muito obrigado.

RESUMO

A crescente preocupação com as mudanças climáticas e a necessidade de transição para uma matriz energética mais limpa têm impulsionado o debate sobre a mobilidade elétrica. Com isso, esta pesquisa apresenta uma análise de viabilidade da recarga doméstica de veículos elétricos utilizando sistemas fotovoltaicos, fundamentada em revisão sistemática da literatura e em simulações técnico-econômicas. A pesquisa considerou artigos publicados entre 2014 e 2025, que foram utilizados para embasar a modelagem dos cenários e a discussão dos resultados. A análise foi estruturada em três categorias de análise: técnica, econômica e ambiental. Os resultados indicam que, embora o investimento inicial para a instalação do sistema solar ainda represente uma barreira, os ganhos econômicos ao longo do tempo e a significativa redução nas emissões de gases de efeito estufa tornam essa alternativa viável e sustentável. Além disso, a integração entre energia solar e mobilidade elétrica pode promover maior autonomia ao usuário, descentralização energética e estímulo à inovação no setor de transportes. O estudo, ainda, contribui para o entendimento dos benefícios e desafios na adoção de tecnologias limpas aplicadas à mobilidade urbana, com ênfase na realidade brasileira. Dessa maneira, por fim, desenvolveu-se um produto final voltado ao consumidor, concebido para oferecer informações e orientar usuários interessados na adoção da recarga solar domiciliar à veículos elétricos.

Palavras-chave: Veículos elétricos. Recarga doméstica. Energia solar fotovoltaica. Mobilidade sustentável. Viabilidade técnico-econômica.

ABSTRACT

The growing concern about climate change and the need to transition to a cleaner energy matrix have intensified the debate on electric mobility. In this context, this study presents a feasibility analysis of home charging for electric vehicles using photovoltaic systems, based on a systematic literature review and techno-economic simulations. The research considered articles published between 2014 and 2025, which supported the modeling of scenarios and the discussion of results. The analysis was structured into three categories: technical, economic, and environmental. The results indicate that, although the initial investment required for system installation still represents a barrier, the long-term economic gains and the significant reduction in greenhouse gas emissions make this alternative viable and sustainable. Moreover, the integration of solar energy and electric mobility can promote greater user autonomy, energy decentralization, and innovation within the transportation sector. The study also contributes to understanding the benefits and challenges of adopting clean technologies in urban mobility, with an emphasis on the Brazilian context. Finally, a consumer-oriented product was developed to provide information and guidance for users interested in adopting home solar charging for electric vehicles.

Keywords: Electric vehicles. Home recharge. Photovoltaic solar energy. Sustainable mobility. Technical-economic feasibility.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, conforme protocolo PRISMA adaptado (2020)	17
Figura 2 - Fluxo de utilização do simulador fotovoltaico	19
Figura 3 - Tipos de tecnologia de propulsão elétrica e híbrida.....	22
Figura 4 - Tipos de conectores utilizados na recarga de veículos elétricos.....	23
Figura 5 - Tipos de carregamento elétrico e aplicações típicas.....	24
Figura 6 - Sistema Fotovoltaico <i>On-Grid</i>	28
Figura 7 - Sistema Fotovoltaico <i>Off-Grid</i>	28
Figura 8 - Distribuição percentual do horário de início das sessões de recarga residencial de veículos elétricos	29
Figura 9 - Ciclo <i>Well-to-Tank</i> (WTT) e <i>Tank-to-Wheel</i> (TTW) para veículos a combustão e elétricos.....	31
Figura 10 - Participação das fontes energéticas no Brasi.....	33
Figura 11– Tela “Entrada de Dados” do simulador fotovoltaico.....	38
Figura 12 – Tela “Dimensionamento Técnico” do simulador fotovoltaico	39
Figura 13 – Tela “Análise Financeira” do simulador fotovoltaico	40
Figura 14 - Tela “Dashboard de Resultados” do simulador fotovoltaico.....	41
Figura 15 - Geração mensal estimada de energia e estimativa de consumo em kWp	45
Figura 16 - Parâmetros de entrada de coordenadas geográficas, inclinação ideal e perdas	45
Figura 17 - Comparativo de custo acumulado em 25 anos entre recarga convencional (concessionária) e recarga com energia solar fotovoltaica (sistema <i>on-grid</i>)	52
Figura 18 - Economia acumulada ao longo de 25 anos com o sistema fotovoltaico	53
Figura 19 – Comparativo de custo acumulado em 25 anos: concessionária (Tarifa Branca – fora de ponta) vs. sistema fotovoltaico <i>on-grid</i>	55
Figura 20 – Economia acumulada ao longo de 25 anos: sistema fotovoltaico <i>on-grid</i> em relação à concessionária com Tarifa Branca (fora de ponta)	55
Figura 21 - Estimativa comparativa de emissões de CO ₂ em 25 anos: recarga convencional versus recarga com energia solar residencial.....	57

Figura A1 - Tela “Entrada de Dados” do simulador fotovoltaico.....	69
Figura A2 - Tela “Dimensionamento Técnico”	70
Figura A3 - Tela “Análise Financeira”	71
Figura A4 - Tela “Dashboard de Resultados”	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Artigos selecionados para análise.....	34
Tabela 2 - Top 10 veículos elétricos mais vendidos no Brasil e características técnicas (Jan–Out 2025)	42
Tabela 3 - Parâmetros Econômicos da Concessionária (CEMIG MG)	47
Tabela 4 - Percentual de cobrança do componente Fio B no período de transição ...	48
Tabela 5 - Estimativa dos custos adicionais de materiais utilizados em instalações fotovoltaicas residenciais de pequeno porte.....	49
Tabela 6 - Parâmetros econômicos do Sistema Solar Fotovoltaico.....	50
Tabela 7 - Análise de viabilidade econômica anual do cenário 1 vs. cenário 2.....	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
IFMG	Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais
NBR	Normas Técnicas Brasileiras
TCC	Trabalho de Conclusão de Curso
VE	Veículo elétrico
ERVE	Estação de recarga de veículos elétricos
EVs	Veículos elétricos
ICEVs	Veículos a combustão interna
GEE	Gases de Efeito Estufa
ZEV	Zero Emission Vehicle
MHEV	Mild Hybrid Electric Vehicle
PHEV	Plug-In Hybrid Electric Vehicle
BEV	Battery Electric Vehicle
CO ₂	Dióxido de Carbono
ERVE	Estação de Recarga de Veículos Elétrico
WTT	Well-to-Tank
TTW	Tank-to-Wheel
WTW	Well-to-Wheel
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
INMETRO	Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia
ACV	Avaliação do ciclo de vida
PR	Performance Ratio
ICEV	Internal Combustion Engine Vehicles
BEV	Battery Electric Vehicles
TUSD	Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição
IPCA	Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA)

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
1.1	Justificativa.....	12
1.2	Problema de Pesquisa	12
1.3	Objetivos	13
1.3.1	Objetivos específicos.....	13
1.4	Estrutura do trabalho	13
2	METODOLOGIA	15
2.1	Desenvolvimento do produto aplicado	18
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Evolução Histórica dos Veículos Elétricos	20
3.2	Tecnologias e sistemas de propulsão elétrica	21
3.3	Infraestrutura de recarga: panorama global	22
3.4	Políticas públicas, incentivos e barreiras	25
3.5	Viabilidade técnica e econômica da recarga doméstica com energia fotovoltaica	26
3.5.1	Análise de sistemas híbridos (<i>on-grid/off-grid</i>) para recarga de veículos elétricos	27
3.5.2	Perfil de consumo e horários predominantes de recarga de veículos elétricos.....	29
3.6	Aspectos ambientais e sustentáveis da mobilidade elétrica.....	30
3.6.1	Conceitos de <i>Well-to-Tank</i> (WTT) e <i>Tank-to-Wheel</i> (TTW) na avaliação das emissões de ICEV e BEV	31
3.6.1.1	Emissões Well-to-Tank (WTT).....	31
3.6.1.2	Emissões Tank-to-Wheel (TTW)	32
3.6.2	Influência da matriz elétrica brasileira na sustentabilidade da mobilidade elétrica	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	Dimensionamento Técnico	42
4.2	Análise Econômica: viabilidade econômica do sistema fotovoltaico	46
4.2.1	Parâmetros Econômicos da Concessionária (CEMIG-MG).....	46
4.2.2	Parâmetros Econômicos do Sistema Solar Fotovoltaico	49

4.2.3	Comparativo anual: cenário 1 (Concessionária) vs cenário 2 (Sistema Fotovoltaico)	51
4.2.4	Análise de sensibilidade econômica: cenário 1 (Concessionária com Tarifa Branca) e cenário 2 (Sistema Fotovoltaico On-Grid)	54
4.3	Dimensão Ambiental: redução de emissões e sustentabilidade	56
4.4	Discussão Geral	57
4.4.1	Aspectos sociais e equidade no acesso à mobilidade solar	61
5	CONCLUSÃO	62
6	REFERÊNCIAS	65
APÊNDICE A – CARTILHA DE INSTRUÇÕES DO SIMULADOR FOTOVOLTAICO		68

1 INTRODUÇÃO

O desafio da transição energética global impõe profundas mudanças na forma como a sociedade produz, distribui e consome energia. O modelo energético predominante, baseado em combustíveis fósseis, apresenta sinais de esgotamento não apenas pela sua insustentabilidade ambiental, mas também pela crescente escassez desses recursos (Cresesb, 2025). O setor de transportes, um dos maiores consumidores de petróleo do mundo, é particularmente responsável por expressiva parcela das emissões de gases de efeito estufa, agravando os impactos das mudanças climáticas (International Energy Agency, 2024).

No Brasil, embora a matriz elétrica seja composta majoritariamente por fontes renováveis — como a hidrelétrica e, mais recentemente, a solar fotovoltaica, o setor de transportes ainda depende fortemente de combustíveis fósseis. A crescente urbanização, a alta taxa de motorização e a limitação de políticas públicas de eletrificação agravam esse cenário. Iniciativas como o programa Rota 2030 e o recém-lançado Programa Mover buscam impulsionar a inovação na indústria automotiva nacional, fomentando a adoção de veículos elétricos (VEs) como alternativa de mobilidade sustentável (Cieplinski, 2024).

Nesse contexto apresentado, cresce também a necessidade de ferramentas acessíveis que auxiliem consumidores na tomada de decisão quanto à adoção de tecnologias limpas. Por conseguinte, uma das barreiras identificadas na literatura é um aumento significativo quanto aos instrumentos simples que permitam estimar, de forma personalizada, o potencial de geração solar residencial, os custos de instalação, economia obtida, além do retorno sobre o investimento. Em resposta a essa demanda, este trabalho inclui o desenvolvimento de um simulador fotovoltaico residencial, criado como produto aplicado para orientar pessoas interessadas em adotar sistemas de energia solar. A ferramenta integra parâmetros técnicos, econômicos e ambientais, oferecendo ao consumidor uma visualização clara dos benefícios e limitações da recarga sustentável no contexto brasileiro, além de mostrar como foi a projeção e produção deste produto através da literatura utilizada na produção deste trabalho de conclusão de curso, assim como as perspectivas de análise obtidas através dos estudos realizados.

Contudo, a ampliação da frota elétrica brasileira ainda enfrenta obstáculos relevantes, sendo a infraestrutura de recarga um dos principais. As estações públicas

são escassas e concentradas em grandes centros urbanos, enquanto os pontos residenciais de carregamento exigem investimentos e adaptações técnicas consideráveis. Além disso, a sustentabilidade do modelo elétrico depende da origem da energia utilizada: se for oriunda de fontes fósseis, os ganhos ambientais podem ser significativamente reduzidos (Ferreira; Cardoso, 2020).

1.1 Justificativa

Nesse contexto, a integração entre veículos elétricos e sistemas fotovoltaicos residenciais surge como uma alternativa estratégica. Ao permitir a recarga domiciliar a partir da energia solar, o usuário obtém maior independência da rede elétrica convencional, reduz os custos operacionais e contribui para a mitigação das emissões associadas à mobilidade. Essa sinergia entre tecnologias sustentáveis tem despertado interesse tanto na esfera acadêmica quanto no setor produtivo, exigindo estudos que avaliem sua viabilidade sob diferentes perspectivas.

Considerando a crescente demanda por soluções energéticas limpas, autônomas e financeiramente viáveis, investigar a recarga doméstica de veículos elétricos com energia solar fotovoltaica se mostra pertinente e oportuno. Tal investigação pode apoiar o desenvolvimento de políticas públicas mais eficazes, estimular o investimento privado e contribuir para a transição energética no setor de mobilidade urbana.

1.2 Problema de Pesquisa

Apesar do potencial da integração entre energia solar e mobilidade elétrica, ainda são escassos os estudos que analisam de forma conjunta os aspectos técnicos, econômicos e ambientais da recarga domiciliar de veículos elétricos por meio da energia fotovoltaica. Observa-se, portanto, a falta de um mapeamento sistematizado da produção científica sobre o tema, considerando suas particularidades climáticas, regulatórias e de infraestrutura, além da avaliação crítica dos benefícios e limitações dessa estratégia no contexto brasileiro. Nesse sentido, entende-se a necessidade de um estudo que, fundamentado na literatura e em análises técnico-econômicas, examine a viabilidade dessa perspectiva sustentável.

Diante disso, a questão norteadora deste trabalho é: qual é a viabilidade técnica, econômica e ambiental ao utilizar sistemas fotovoltaicos para recarregar veículos elétricos no Brasil?

1.3 Objetivos

- Este trabalho tem como objetivo central desenvolver um simulador fotovoltaico e analisar a viabilidade da recarga doméstica de veículos elétricos utilizando energia solar fotovoltaica, fundamentando-se em revisão da literatura e em simulações técnico-econômicas e ambientais.

1.3.1 Objetivos específicos

- Levantamento e análise dos estudos científicos publicados entre 2014 e 2025 sobre o tema;
- Avaliação do dimensionamento técnico de sistemas fotovoltaicos para uso veicular residencial;
- Comparação dos custos da recarga solar com os da recarga via rede pública de energia elétrica;
- Identificação dos impactos ambientais e das reduções estimadas de emissões de CO₂;
- Mapeamento das barreiras, desafios e perspectivas para a adoção dessa tecnologia em larga escala no Brasil.

1.4 Estrutura do trabalho

Este trabalho está organizado em cinco seções, além desta introdução. No Capítulo 2 descreve os procedimentos metodológicos adotados na elaboração do estudo, incluindo os parâmetros considerados nas simulações comparativas, além da introdução e detalhamento das etapas da revisão sistemática e o processo de desenvolvimento do produto aplicado. O Capítulo 3 apresenta o referencial teórico, abordando os fundamentos da mobilidade elétrica, os princípios da energia solar fotovoltaica e as implicações econômicas da transição energética no setor de transportes. Em seguida, o Capítulo 4 apresenta os resultados obtidos, com destaque

para a análise do *payback* e do Valor Presente Líquido (VPL) da recarga com energia solar em comparação ao modelo convencional. Já o Capítulo 5 reúne as considerações finais, apontando as principais conclusões e possíveis desdobramentos futuros. Por fim, são apresentadas as referências que subsidiaram a elaboração da pesquisa.

2 METODOLOGIA

Este estudo caracteriza-se como uma pesquisa aplicada, de base qualitativa e abordagem descritivo-analítica, fundamentada em revisão da literatura científica recente e simulação de um estudo de caso técnico, econômico e ambiental para o município de Betim-MG.

A revisão da literatura teve como finalidade identificar evidências científicas que subsidiassem a construção do estudo de caso, permitindo a definição de parâmetros técnicos, econômicos e ambientais adotados nas análises comparativas. Essa estratégia metodológica confere ao trabalho consistência teórica e aderência prática, integrando o conhecimento produzido na área às condições reais de aplicação da tecnologia. A formulação da questão norteadora foi orientada pelo método PICO, definido da seguinte forma:

- P (População): veículos elétricos;
- I (Intervenção): recarga por meio de sistema fotovoltaico instalado em ambiente residencial;
- C (Comparação): recarga convencional via rede elétrica fornecida por concessionária;
- O (Desfecho): avaliação da viabilidade técnica, econômica e ambiental dessa integração.

Com base nesse delineamento, realizou-se uma busca sistemática de estudos publicados entre 2014 e 2025 em bases de dados científicas nacionais e internacionais, tais como *Scopus*, *Web of Science*, *SciELO*, *Google Scholar* e *ScienceDirect*. Foram utilizados descritores combinados em português e inglês, como: *veículo elétrico*, *recarga residencial*, *sistema fotovoltaico*, *energia solar*, *infraestrutura de recarga*, *electric vehicle charging*, *home solar charging system* e *photovoltaic energy*. Os critérios de inclusão abrangeram:

- Artigos publicados entre 2014 e 2025;
- Estudos que tratassem diretamente da relação entre veículos elétricos e recarga via energia solar em ambientes residenciais;
- Pesquisas com abordagem técnica, econômica ou ambiental;

- Textos disponíveis na íntegra e com revisão por pares.

Foram excluídos:

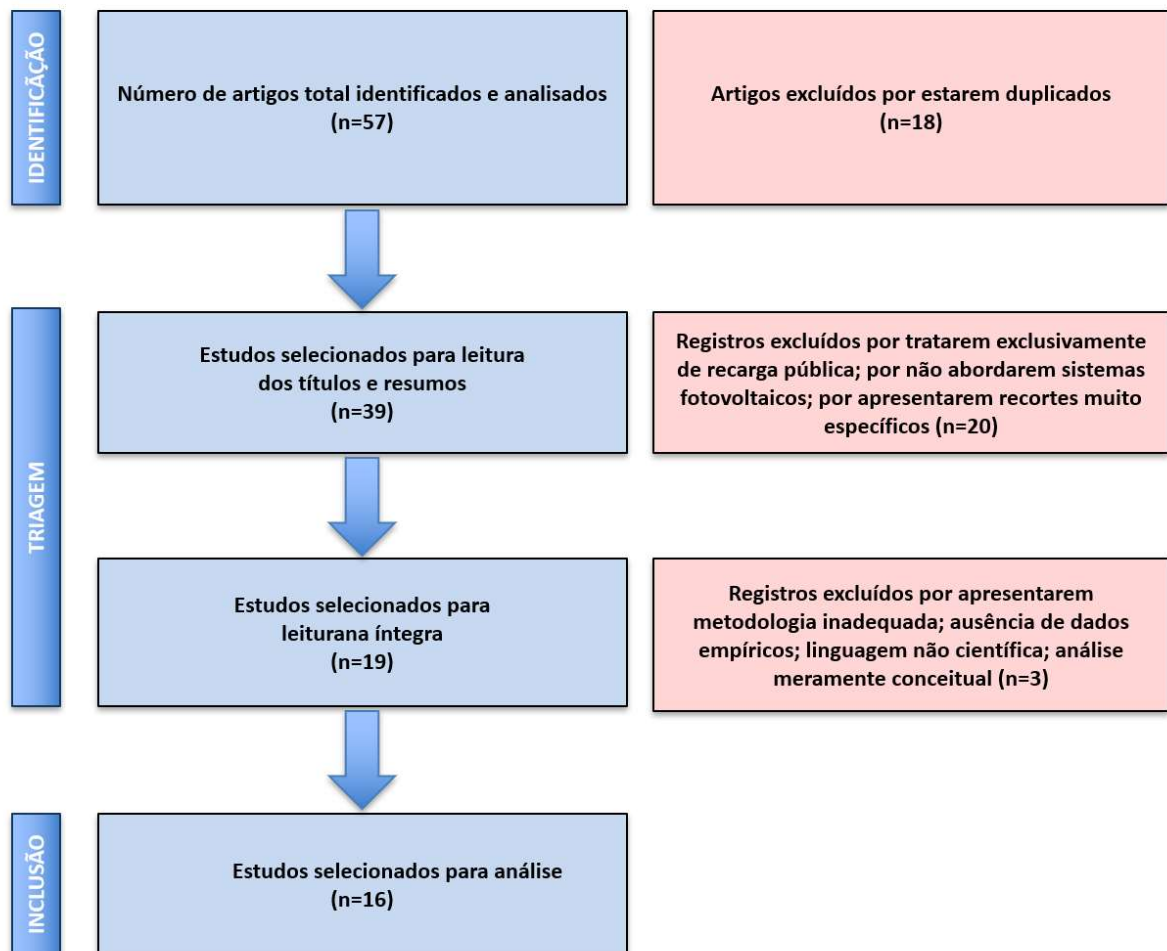
- Trabalhos com foco exclusivo em recarga pública ou comercial;
- Estudos puramente conceituais ou com dados defasados;
- Artigos duplicados ou com metodologia não transparente.

A triagem inicial resultou em 57 estudos localizados. Após exclusão de duplicatas ($n = 18$), restaram 39 artigos submetidos à leitura de títulos e resumos. Nessa etapa, foram excluídos 20 estudos por não atenderem aos critérios de inclusão — por tratarem exclusivamente de recarga pública, por não abordarem sistemas fotovoltaicos ou por apresentarem recortes muito específicos. Permaneceram 19 artigos para leitura integral, dos quais 3 foram descartados por ausência de dados empíricos ou metodologia inconsistente. Ao final, 16 estudos atenderam a todos os critérios de elegibilidade e foram incluídos na revisão.

Os dados extraídos desses artigos foram organizados em uma matriz analítica contendo as seguintes categorias: autor(es), ano, país, objetivo da pesquisa, tipo de estudo, principais resultados e conclusões. Essa sistematização permitiu agrupar as evidências em três eixos de análise:

- (i) Viabilidade técnica dos sistemas fotovoltaicos aplicados à recarga veicular;
- (ii) Viabilidade econômica da solução solar comparada à rede elétrica convencional; e
- (iii) Impactos ambientais, especialmente na redução de emissões de CO_2 .

Figura 1 – Processo de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos, conforme protocolo PRISMA adaptado (2020).



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

O processo de seleção e triagem dos estudos (Figura 1) é apresentado conforme os princípios do protocolo PRISMA (Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses), em versão adaptada para revisões temáticas de base qualitativa, a fim de garantir transparência e rastreabilidade nas etapas de identificação, triagem e inclusão das fontes.

Com base nas evidências obtidas, foi elaborado o estudo de caso simulado, que consistiu em dimensionar e analisar um sistema fotovoltaico residencial voltado à recarga de um veículo elétrico de uso urbano. A cidade de Betim-MG foi adotada como referência por suas condições climáticas e irradiância média representativas do contexto brasileiro. As análises contemplaram três dimensões complementares:

1. Técnica: dimensionamento do sistema fotovoltaico com base em parâmetros médios de consumo veicular e geração solar local;

2. Econômica: cálculo do *Valor Presente Líquido (VPL)* e do *payback* para diferentes cenários de investimento e tarifa energética;
3. Ambiental: estimativa das emissões de gases de efeito estufa evitadas pela substituição parcial da energia da rede por fonte solar.

A integração entre a revisão bibliográfica e a simulação prática permitiu expressar as evidências encontradas na literatura, reproduzindo, em escala local, os parâmetros e tendências observados em estudos nacionais e internacionais.

2.1 Desenvolvimento do produto aplicado

Além do que foi exposto até então, assim como brevemente explicitado no resumo deste trabalho, criou-se e aplicou-se um produto voltado ao consumidor residente, que deseje implementar um sistema fotovoltaico para recarga de veículos elétricos. Esse produto consiste em um simulador em planilha eletrônica através do Software Microsoft Excel, estruturado para integrar o dimensionamento técnico do sistema fotovoltaico, a estimativa de geração de energia e a avaliação técnico-econômica do investimento.

O desenvolvimento da ferramenta partiu da definição dos requisitos funcionais e das variáveis de entrada e saída, com base (i) na revisão bibliográfica utilizada na fundamentação do trabalho e (ii) nos parâmetros adotados nos cenários de simulação. Na sequência, foi estabelecida a arquitetura lógica do simulador, organizada em módulos para facilitar a rastreabilidade dos cálculos e a reprodutibilidade dos resultados:

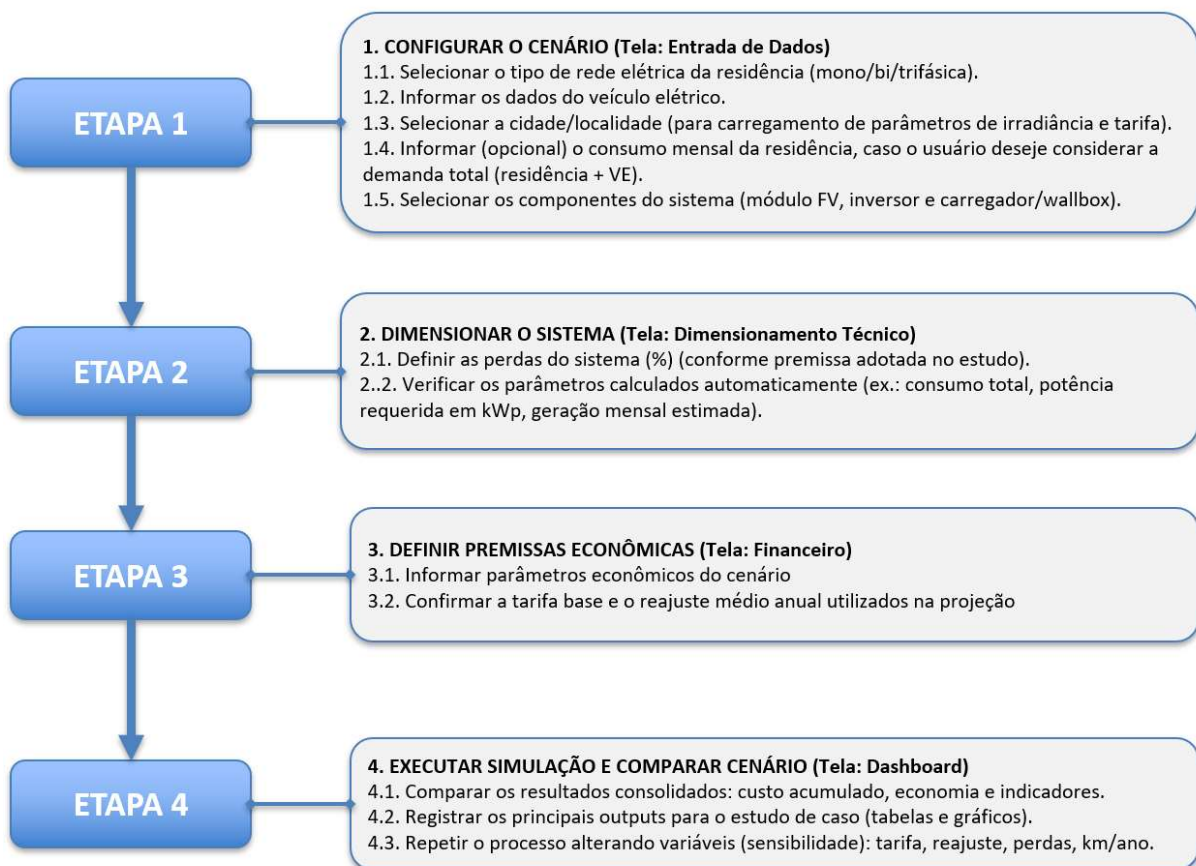
- **Módulo de entrada de dados:** reúne as informações fornecidas pelo usuário, como tipo de rede elétrica do imóvel, seleção do veículo, quilometragem anual, cidade/tarifa de energia e componentes do sistema (módulo fotovoltaico, inversor e carregador).
- **Módulo de dimensionamento técnico:** executa o cálculo da potência requerida do sistema (kWp) a partir do consumo anual/mensal estimado e das premissas técnicas (incluindo perdas do sistema), além de estimar a geração mensal com base na irradiância local.
- **Módulo financeiro:** consolida os custos de investimento e operação e estrutura o fluxo de caixa do horizonte de análise, aplicando os indicadores

econômicos do estudo (por exemplo, custo anual acumulado, *payback* e VPL), conforme parâmetros definidos na pesquisa.

- **Módulo de visualização (dashboard):** apresenta os principais resultados consolidados, permitindo leitura rápida dos indicadores e comparação entre cenários.

Para evidenciar o princípio de funcionamento do simulador e a sequência lógica de processamento dos dados, definiu-se um fluxo de utilização estruturado em etapas sequenciais, abrangendo desde a inserção e validação dos dados de entrada até a consolidação dos resultados e a comparação entre cenários. Conforme ilustrado na Figura 2, esse fluxo assegura padronização do processo de simulação, rastreabilidade dos cálculos e coerência entre as entradas do usuário e os resultados obtidos.

Figura 2 – Fluxo de utilização do simulador fotovoltaico.



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Evolução Histórica dos Veículos Elétricos

Embora a mobilidade elétrica seja frequentemente percebida como uma inovação recente, os primeiros registros de veículos elétricos (VEs) datam do século XIX, com experimentações realizadas por inventores europeus e norte-americanos entre 1828 e 1835. Ao longo da década de 1870, os VEs ganharam certa popularidade em centros urbanos, chegando a representar uma fração relevante da frota no início do século XX, especialmente em cidades como Nova York (Barkenbus, 2020).

Contudo, o desenvolvimento da infraestrutura rodoviária, a invenção do motor de arranque e a disponibilidade de petróleo barato levaram à consolidação do motor de combustão interna como tecnologia dominante por várias décadas. Foi somente a partir das crises energéticas da década de 1970 que o interesse por alternativas energéticas se intensificou, reacendendo as discussões sobre o potencial dos VEs (Akinsooto; Ogunnowo; Ezeanochie, 2024).

No século XXI, o avanço das preocupações ambientais, o esgotamento progressivo dos combustíveis fósseis e o fortalecimento de políticas públicas voltadas para o desenvolvimento sustentável reposicionaram os veículos elétricos como protagonistas da transição energética. O lançamento de modelos com maior autonomia, impulsionado por inovações em baterias e sistemas de propulsão, contribuiu para o aumento da sua aceitação no mercado global (Husain et al., 2021; Debnath et al., 2021).

Além disso, diversos países implementaram subsídios, incentivos fiscais e investimentos em infraestrutura de recarga, com resultados expressivos na taxa de adoção. No Brasil, políticas como o Programa Rota 2030 e o recém-instituído Programa Mover (2023) têm buscado criar um ambiente normativo e econômico mais favorável à eletromobilidade, ainda que desafios estruturais persistam, como o alto custo de aquisição e a limitação de infraestrutura (Martínez-Gómez; Espinoza, 2024; IEA, 2024).

A trajetória histórica dos VEs, portanto, reflete um percurso complexo de avanços e retrocessos, moldado por condicionantes tecnológicos, econômicos e ambientais. Compreender esse percurso permite reconhecer o papel estratégico da mobilidade elétrica nos atuais esforços de descarbonização do setor de transportes e nos debates sobre sustentabilidade urbana (Oluwalana; Grzesik, 2025).

3.2 Tecnologias e sistemas de propulsão elétrica

Os avanços nos sistemas de propulsão elétrica têm sido determinantes para o crescimento da mobilidade sustentável no setor automotivo. A evolução tecnológica nos campos da eficiência energética, da eletrônica embarcada e do armazenamento de energia permitiu a diversificação dos tipos de veículos eletrificados, os quais se distinguem conforme o grau de eletrificação e o modo de operação (Husain *et al.*, 2021; Debnath *et al.*, 2021).

Entre as principais categorias, destacam-se os sistemas micro-híbridos, dotados de tecnologia start-stop, que desliga o motor automaticamente em paradas curtas, reduzindo o consumo de combustível. Os *mild hybrids* (MHEV) vão além, utilizando pequenos motores elétricos auxiliares para apoiar o motor a combustão em momentos de maior exigência, o que pode resultar em até 20% de economia de energia (Huo; Meckl, 2022).

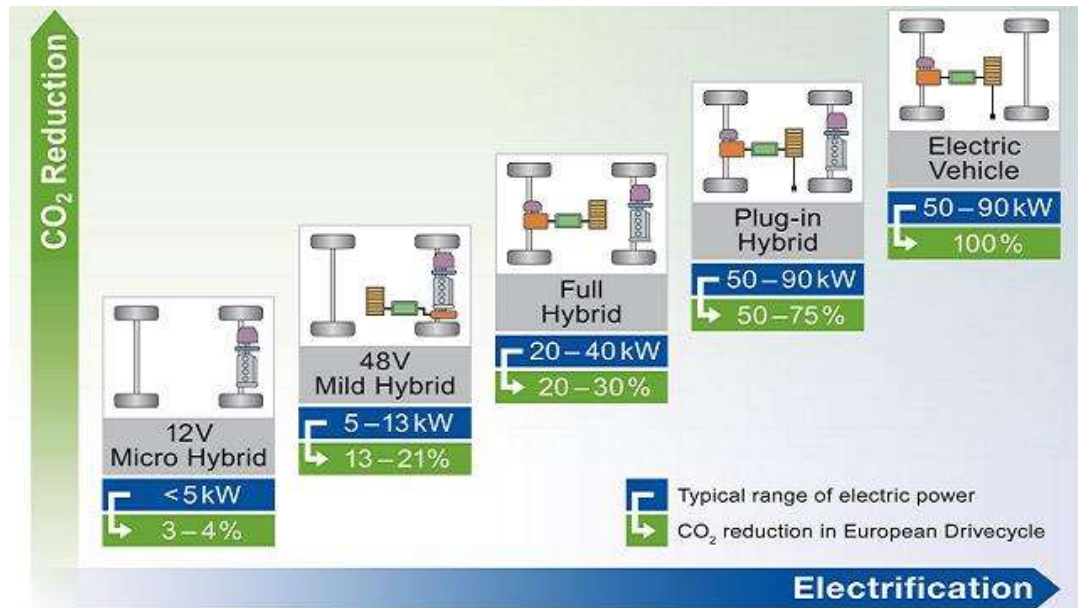
Já os veículos híbridos convencionais (HEV) conjugam motor a combustão e motor elétrico, com recarga das baterias realizada por meio da regeneração energética em frenagens e desacelerações. Embora não requeiram conexão externa para recarga, esses veículos operam de modo elétrico apenas por curtas distâncias e em baixas velocidades (Samarakoon *et al.*, 2024).

Os veículos híbridos plug-in (PHEV), por sua vez, agregam a possibilidade de recarga externa e operam com maior autonomia elétrica, sendo considerados soluções intermediárias entre os sistemas híbridos convencionais e os modelos totalmente elétricos (Akinsooto; Ogunnowo; Ezeanochie, 2025).

Por fim, os veículos elétricos a bateria (BEV) funcionam exclusivamente com energia elétrica, armazenada em baterias de alta capacidade. Eles não emitem poluentes locais e apresentam elevada eficiência energética, representando atualmente o principal vetor da eletromobilidade em nível global (Oluwalana; Grzesik, 2025).

A figura 3 apresenta uma síntese atualizada dos tipos de veículos eletrificados e suas principais características técnicas, com base em dados recentes do CRESESB e da literatura especializada.

Figura 3 - Tipos de tecnologia de propulsão elétrica e híbrida.



Fonte: LA tecnologia mild-hybrid (2024).

Essa classificação fornece um panorama técnico fundamental para embasar a análise das tendências em mobilidade elétrica, com foco especial nas implicações energéticas, econômicas e ambientais da recarga residencial integrada a sistemas fotovoltaicos.

3.3 Infraestrutura de recarga: panorama global

A ampliação da infraestrutura de recarga tem se mostrado fator estratégico para consolidar a mobilidade elétrica em escala global. A segurança, conveniência e compatibilidade dos pontos de recarga influenciam diretamente na decisão de adoção dos veículos elétricos por consumidores e frotistas (IEA, 2024; Martínez-Gómez; Espinoza, 2024). Em termos técnicos, a infraestrutura é classificada em três níveis principais:

- Recarga lenta (nível 1), com corrente alternada em tomadas residenciais comuns (120V–240V), geralmente variando de 1,9 kW a 7,4 kW;
- Recarga semirrápida (nível 2), com maior potência e tensão, presente em pontos públicos e comerciais;

- Recarga rápida (nível 3), operando com corrente contínua e potências superiores a 150 kW, capaz de completar uma carga em menos de 30 minutos, dependendo da bateria (CRESESB, 2025).

Conforme a figura 4, os conectores variam de acordo com o padrão adotado em cada região, como *SAE J1772*, *Mennekes*, *CHAdeMO*, *CCS* e *GB/T*, sendo necessária a padronização para garantir interoperabilidade e eficiência da rede de abastecimento (IEA, 2024).

Internacionalmente, observa-se uma correlação direta entre densidade de pontos de recarga e taxa de adoção de veículos elétricos. Países como Noruega, Alemanha, Estados Unidos e China têm investido na instalação de pontos integrados a estacionamentos públicos, rodovias e residências, criando redes de recarga robustas e interoperáveis (IEA, 2024).

Figura 4 - Tipos de conectores utilizados na recarga de veículos elétricos.



Fonte: GreenV (2024).

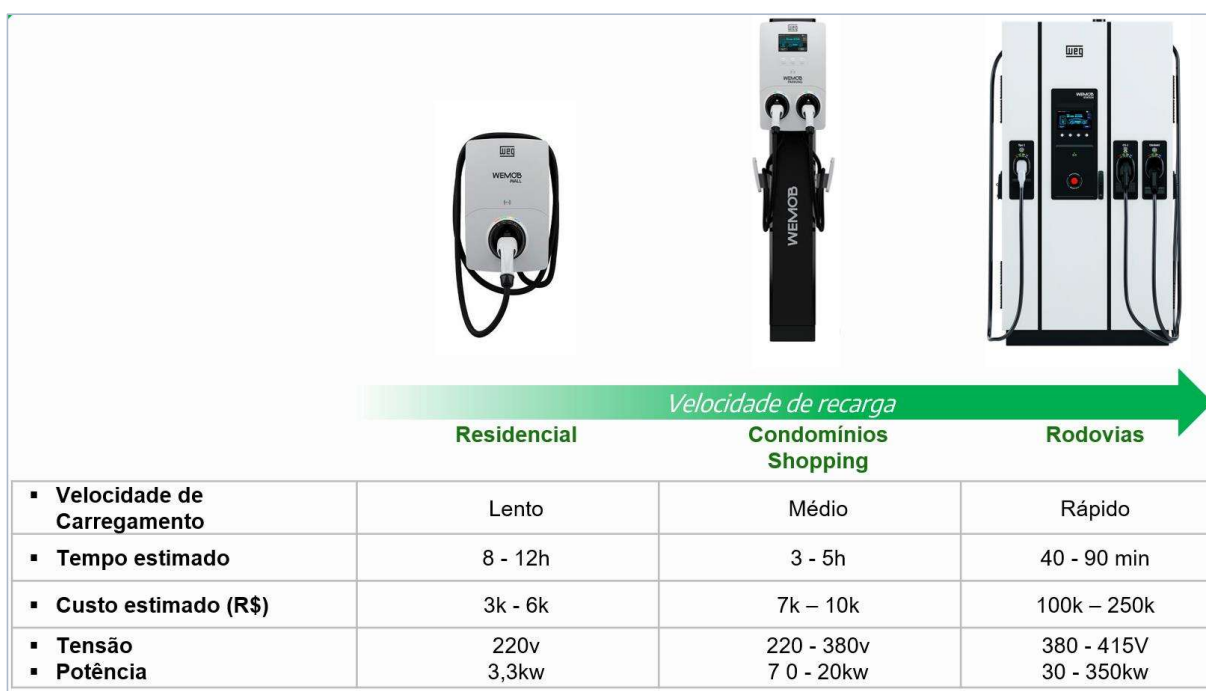
No Brasil, a rede de recarga pública ainda é incipiente e concentrada nos grandes centros urbanos. Segundo Martínez-Gómez e Espinoza (2024), há cerca de um ponto público para cada 20 veículos elétricos em circulação, quantidade considerada insuficiente para garantir confiabilidade e adesão em larga escala. A expansão enfrenta obstáculos como custos elevados de instalação, ausência de incentivos federais robustos, baixa padronização de conectores e limitações de infraestrutura elétrica em áreas urbanas densas (Debnath *et al.*, 2021).

Outro entrave relevante é a diversidade de padrões técnicos entre os veículos disponíveis no mercado brasileiro. Modelos que utilizam conectores CCS, CHAdeMO

ou GB/T nem sempre são compatíveis com as estações instaladas, exigindo a adoção de soluções multifuncionais ou adaptadores específicos, o que eleva os custos de implantação e manutenção (IEA, 2024).

Conforme a figura 5, a infraestrutura de recarga de veículos elétricos pode ser classificada em três modalidades principais: recarga residencial (lenta), recarga semirrápida e recarga rápida, as quais se diferenciam em termos de potência instalada, tempo de recarga e ambiente de aplicação.

Figura 5 – Tipos de carregamento elétrico e aplicações típicas.



Fonte: WEG (Catálogo, 2025), adaptado pelo autor.

A recarga residencial, realizada em corrente alternada (AC) por meio de wallboxes, opera com tensão 220V e potências entre 3,3 kW e 7,4 kW, resultando em tempos de recarga de 8 a 12 horas e menor custo de implantação. A recarga semirrápida, empregada em condomínios, estacionamentos corporativos e centros comerciais, utiliza tensões de 220 – 380V e potências intermediárias, reduzindo o tempo de recarga para a faixa de 3 a 5 horas. Já a recarga rápida, típica de rodovias e estações públicas de alta potência, opera em corrente contínua (DC), com tensões da ordem de 380 - 415 V e potências superiores a 150 kW, permitindo recargas em 40 a 90 minutos, porém com elevado custo de instalação e maior impacto sobre a rede elétrica (WEG, 2024; IEA, 2024).

3.4 Políticas públicas, incentivos e barreiras

A expansão da mobilidade elétrica está fortemente condicionada às políticas públicas adotadas por cada país. Conforme apontam diversos estudos recentes (Debnath *et al.*, 2021; Akinsooto; Ogunnowo; Ezeanochie, 2025), a presença de subsídios financeiros diretos, benefícios fiscais e investimentos estruturais tem sido determinante para elevar a adoção dos veículos elétricos (VEs), especialmente em países líderes como Noruega, China e Alemanha.

Incentivos econômicos aplicados no momento da compra exercem impacto direto na viabilidade de aquisição dos VEs. Segundo Akinsooto, Ogunnowo e Ezeanochie (2024), em algumas nações os valores dos subsídios ultrapassam US\$ 15 mil por unidade, além de incluir isenções fiscais, licenciamento facilitado e acesso a infraestrutura urbana privilegiada, como faixas exclusivas e vagas preferenciais.

No Brasil, a trajetória da mobilidade elétrica ainda é marcada por avanços pontuais e lacunas estruturais. O programa Rota 2030 (2020) foi um marco inicial, ao fomentar pesquisa e desenvolvimento de tecnologias automotivas sustentáveis. Já o Programa Mover, instituído em 2023, estabelece metas progressivas de redução de emissões e oferece incentivos a montadoras comprometidas com veículos de baixa emissão, incluindo híbridos e elétricos.

Apesar desses avanços institucionais, ainda persistem obstáculos importantes: a ausência de subsídios diretos ao consumidor final, a elevada carga tributária incidente sobre veículos eletrificados, a escassez de infraestrutura de recarga e a instabilidade regulatória quanto à compensação de energia no sistema *on-grid* (IEA, 2024; Martínez-Gómez; Espinoza, 2024).

Entre os artigos analisados na revisão sistemática, destaca-se a menção recorrente à necessidade de políticas coordenadas entre Estado, indústria e distribuidoras de energia como condição essencial para viabilizar a mobilidade elétrica em larga escala (Ferreira; Cardoso, 2020). Em particular, o estímulo à recarga doméstica por fontes renováveis, como os sistemas fotovoltaicos, tem sido apontado como estratégia eficaz para descentralizar a rede, reduzir custos de longo prazo e acelerar a adoção de VEs em países com matriz energética limpa.

Por fim, para o encerramento desta seção, cabe ressaltar que, no contexto brasileiro, o marco regulatório da geração distribuída tem passado por transformações significativas, especialmente com a promulgação da Lei nº 14.300/2022, que instituiu

o Marco Legal da Geração Distribuída. A nova legislação estabelece regras para a compensação de energia elétrica, define prazos de transição para novos sistemas e atribui maior segurança jurídica aos consumidores que optam pela energia fotovoltaica. Para sistemas *on-grid*, as alterações impactam diretamente o retorno financeiro, uma vez que definem as tarifas que incidem sobre a energia compensada e regulam o acesso à rede. Essas mudanças evidenciam o papel estratégico da integração entre mobilidade elétrica e políticas de geração distribuída no Brasil.

Esses achados evidenciam a importância de associar incentivos regulatórios e econômicos a soluções técnicas viáveis, como a recarga solar residencial — tema central deste estudo.

3.5 Viabilidade técnica e econômica da recarga doméstica com energia fotovoltaica

A recarga doméstica de veículos elétricos (VEs) por meio de sistemas fotovoltaicos tem sido apontada por diversos autores como uma alternativa técnica e economicamente promissora à dependência da infraestrutura pública de recarga (Ferreira; Cardoso, 2020). Essa modalidade se torna especialmente relevante em países como o Brasil, cuja rede pública de estações ainda é limitada e concentrada em grandes centros urbanos.

A viabilidade técnica está diretamente relacionada ao correto dimensionamento da potência instalada (em kWp), ao número de módulos fotovoltaicos e à escolha de inversores compatíveis com o perfil de carga. Artigos como os de Oluwalana e Grzesik (2025) e Samarakoon *et al.* (2024) apontam que, mesmo em regiões com menor insolação média, como o Sul e o Sudeste do Brasil, é possível suprir a demanda energética de um veículo elétrico urbano com um sistema solar residencial de porte médio (cerca de 2 a 4 kWp).

Quanto à viabilidade econômica, a maioria dos estudos consultados utilizou dois indicadores principais: o Valor Presente Líquido (VPL) e o *Payback* Simples. As análises demonstram que, embora o investimento inicial em equipamentos e instalação possa ser elevado, o retorno financeiro ao longo do tempo é positivo, sobretudo em função da economia mensal com energia elétrica e da durabilidade dos sistemas fotovoltaicos, que ultrapassam 20 anos com baixa manutenção (Cintra *et al.*, 2025). Dois cenários são frequentemente modelados nos artigos:

- Cenário 1: recarga realizada exclusivamente com energia da concessionária;
- Cenário 2: recarga com sistema fotovoltaico residencial integrado à rede (*on-grid*).

A comparação entre esses cenários evidencia que a recarga solar doméstica pode proporcionar uma economia acumulada significativa ao longo de 25 anos, além de oferecer maior autonomia energética ao usuário e reduzir a sobrecarga da rede pública (IEA, 2024; Chocholac *et al.*, 2021).

Adicionalmente, os estudos destacam o potencial ambiental dessa solução, com redução expressiva nas emissões de dióxido de carbono (CO₂) associadas ao transporte, principalmente quando a matriz energética utilizada é predominantemente limpa, como ocorre no Brasil (Husain *et al.*, 2021; IEA, 2024). A integração entre mobilidade elétrica e geração distribuída com fontes renováveis representa, portanto, uma estratégia sinérgica de descarbonização e descentralização da matriz energética.

3.5.1 Análise de sistemas híbridos (*on-grid/off-grid*) para recarga de veículos elétricos

Os estudos analisados convergem ao destacar que a instalação de sistemas fotovoltaicos *on-grid* em residências representado na figura 6, permite não apenas suprir o consumo do domicílio, mas também atender à demanda energética necessária para abastecer um veículo elétrico de uso urbano médio, com autonomia de cerca de 250 a 300 km por carga (Chocholac *et al.*, 2021; Al-Amayreh; Alamyreh; Amer, 2025). Nesse contexto, o dimensionamento do sistema solar deve considerar a autonomia da bateria, a frequência de uso do veículo, a irradiação solar média da localidade e a eficiência global do sistema, que costuma oscilar entre 70% e 80% (Brito *et al.*, 2022).

Figura 6 – Sistema Fotovoltaico *On-Grid*.

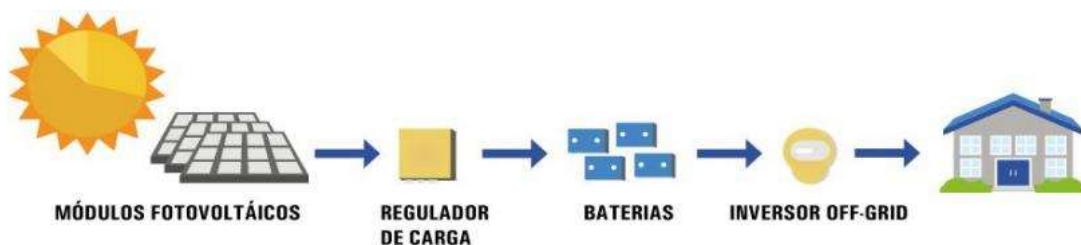


Fonte: Rio Control (2025).

Estudos técnicos apontam que os sistemas *on-grid* apresentam elevada eficiência devido à ausência de baterias e menores perdas internas, com Performance Ratio (PR) tipicamente entre 74% e 80% em condições brasileiras (CRESESB, 2025). Além disso, o Atlas Brasileiro de Energia Solar destaca que regiões do Sudeste, como Minas Gerais, possuem irradiância média anual superior a 5,5 kWh/m².dia, o que amplia o rendimento energético desses sistemas (Pereira *et al.*, 2020). Assim, para recarga de veículos elétricos, o sistema *on-grid* mostra-se vantajoso por apresentar menor custo inicial, operação simples e suporte contínuo da rede, embora não funcione durante interrupções no fornecimento.

Além dos sistemas fotovoltaicos conectados, estudos recentes destacam o potencial dos sistemas *off-grid* como uma alternativa promissora para regiões remotas ou em locais onde há instabilidade no fornecimento de energia como apresentado na figura 7. Esses arranjos operam de forma totalmente independente da rede, utilizando bancos de baterias para armazenar o excedente energético produzido.

Figura 7 – Sistema Fotovoltaico *Off-Grid*.



Fonte: Rio Control (2025).

Nos sistemas híbridos (*Off-Grid*), o excedente energético gerado durante o dia é armazenado em baterias de suporte, podendo ser utilizado durante a noite para abastecimento no VE ou para suprir o consumo de residência. A literatura aponta que,

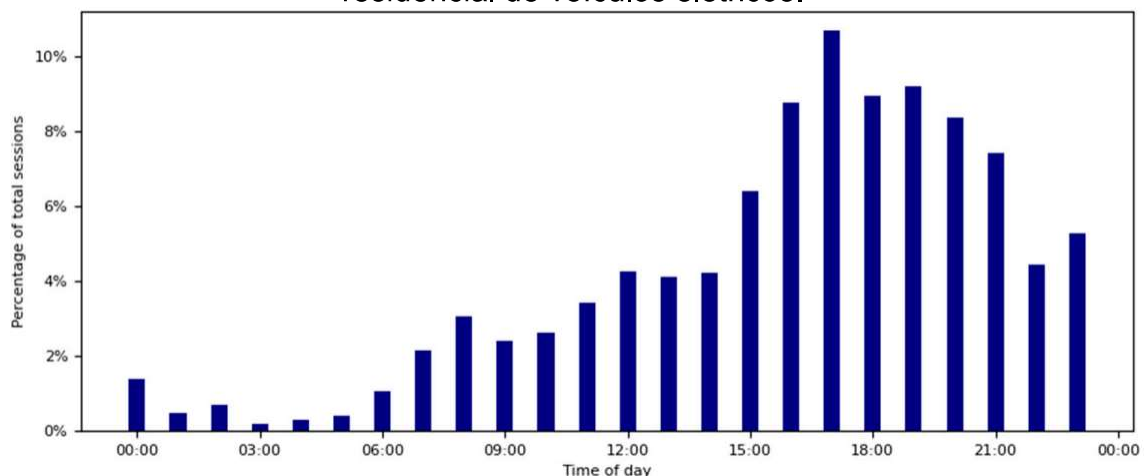
em regiões com menor irradiância solar ou maior variabilidade climática, esse sistema pode elevar a eficiência global do sistema, reduzir a dependência da rede e proporcionar economia adicional ao consumidor (Oluwalana; Grzesik, 2025; Samarakoon *et al.*, 2024).

3.5.2 Perfil de consumo e horários predominantes de recarga de veículos elétricos

O perfil e consumo e horário de recarga de veículos elétricos em ambiente residencial exerce influência direta sobre a avaliação técnica e econômica de sistemas fotovoltaicos *on-grid*. Estudos baseados em dados reais indicam que a recarga ocorre predominantemente no final da tarde e no período noturno, caracterizando um desalinhamento temporal entre a geração fotovoltaica e o consumo energético.

Almaghrebi *et al.* (2024) analisaram o comportamento real de recarga residencial a partir de uma pesquisa com base de dados composta por 265.340 sessões de recarga, das quais 228.988 foram consideradas válidas, coletadas entre 2019 e 2022, em 576 estações residenciais de recarga de nível 2 (240 V, 40 A), localizadas em Omaha, Nebraska (EUA). Conforme apresentado na Figura 8, observa-se que o início das sessões de recarga residencial concentra-se no final da tarde e início do período noturno, com pico em torno das 17h, coincidindo com o retorno dos usuários ao domicílio após a jornada de trabalho.

Figura 8 - Distribuição percentual do horário de início das sessões de recarga residencial de veículos elétricos.



Fonte: adaptado de Almaghrebi *et al.* (2024).

O estudo indica que os veículos permanecem conectados por longos períodos, com duração média de aproximadamente 8,8 horas. Entretanto, o tempo efetivo de carregamento é significativamente menor, cerca de 2,1 horas, evidenciando que a recarga residencial ocorre majoritariamente durante o período noturno. (Almaghrebi *et al.*, 2024).

De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), mais de 80% das recargas no Brasil ocorrem em ambiente residencial, fora do horário comercial. No contexto brasileiro de sistemas fotovoltaicos *on-grid* com compensação de crédito, tal característica intensifica o uso da rede de distribuição, tornando relevante a aplicação das regras estabelecidas pela Lei nº 14.300/2022, que prevê a incidência da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD), especialmente do componente Fio B, responsável pela remuneração da infraestrutura de distribuição. Dessa forma, o horário de recarga assume papel determinante na estimativa do retorno financeiro e do tempo de *payback* de sistemas fotovoltaicos aplicados à recarga veicular.

3.6 Aspectos ambientais e sustentáveis da mobilidade elétrica

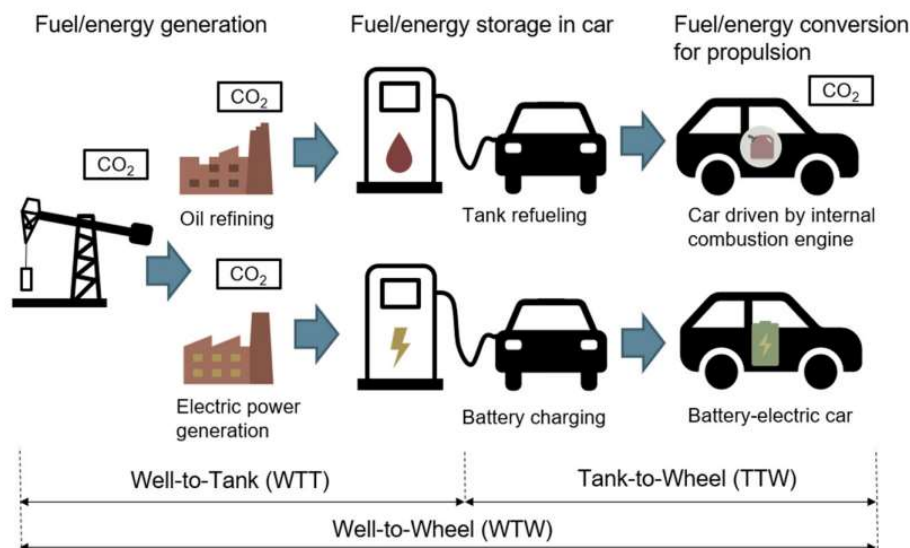
A mobilidade elétrica figura entre as principais estratégias globais de mitigação dos impactos ambientais associados ao setor de transportes, o qual responde por parcela expressiva das emissões de gases de efeito estufa (GEE) em contextos urbanos e industriais (IEA, 2024). Diferentemente dos veículos equipados com motores de combustão interna, os veículos elétricos (VEs) não geram emissões diretas durante sua operação, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e para a redução da pegada de carbono dos indivíduos e das cidades (Akinsooto; Ogunnowo; Ezeanochie, 2025).

Entretanto, para que o seu desempenho ambiental seja avaliado de maneira adequada, torna-se necessária a adoção de uma abordagem baseada na Análise do Ciclo de Vida (ACV). A literatura aponta que a produção de veículos elétricos, especialmente no que se refere às baterias de íons de lítio, pode apresentar emissões iniciais de CO₂ superiores às observadas em veículos convencionais (Cintra *et al.*, 2025). Ainda assim, estudos demonstram que, ao longo da vida útil, os VEs superam os veículos a combustão em termos de sustentabilidade, sobretudo quando a eletricidade empregada na recarga provém de fontes renováveis (Chocholac *et al.*, 2021).

3.6.1 Conceitos de *Well-to-Tank* (WTT) e *Tank-to-Wheel* (TTW) na avaliação das emissões de ICEV e BEV

A análise ambiental da mobilidade elétrica requer a compreensão das emissões associadas às etapas de provisão, transformação e utilização da energia ao longo do ciclo operacional do veículo. Nesse contexto, o modelo *Well-to-Wheel* (WTW) destaca-se como uma das metodologias mais utilizadas para comparar o desempenho ambiental de veículos a combustão interna (Internal Combustion Engine Vehicles – ICEV) e veículos elétricos a bateria (Battery Electric Vehicles – BEV). Esse modelo é estruturado em duas fases principais: *Well-to-Tank* (WTT) e *Tank-to-Wheel* (TTW), conforme ilustrado na Figura 9.

Figura 9 – Ciclo *Well-to-Tank* (WTT) e *Tank-to-Wheel* (TTW) para veículos a combustão e elétricos.



Fonte: adaptado de Hirz e Nguyen (2022).

3.6.1.1 Emissões *Well-to-Tank* (WTT)

O estágio *Well-to-Tank* corresponde às emissões originadas durante a produção, processamento e disponibilização da energia utilizada pelo veículo. No caso de combustíveis fósseis, o WTT engloba a extração do petróleo, os processos de refino e o transporte e distribuição do combustível até os pontos de abastecimento. Essas etapas representam parcela relevante do impacto ambiental e podem corresponder a aproximadamente 10% a 20% das emissões TTW dos veículos

convencionais, variando conforme o tipo de combustível e as tecnologias empregadas no processo *upstream* (Hirz; Nguyen, 2022).

Para os BEVs, o WTT abrange as emissões associadas à geração da energia elétrica, à transmissão e transformação na rede e às perdas inerentes ao processo de carregamento das baterias. Em redes modernas, as perdas médias podem alcançar cerca de 5%, enquanto carregamentos em alta potência podem elevar as perdas energéticas para mais de 30%, influenciando diretamente o volume total de emissões da etapa WTT (Hirz; Nguyen, 2022).

3.6.1.2 Emissões *Tank-to-Wheel* (TTW)

O estágio *Tank-to-Wheel* compreende as emissões produzidas durante a conversão da energia armazenada em propulsão, ou seja, no uso direto do veículo. Nos ICEVs, o TTW inclui as emissões resultantes da combustão do combustível, tais como CO₂, óxidos de nitrogênio (NOx), monóxido de carbono (CO), hidrocarbonetos e material particulado. Essas emissões podem ser calculadas a partir do consumo de combustível, por meio de fatores lineares específicos para gasolina e diesel (Hirz; Nguyen, 2022).

Por sua vez, os veículos elétricos não apresentam emissões diretas na operação, uma vez que não há processo de combustão. Dessa forma, o TTW dos BEVs é considerado igual a zero, constituindo uma das principais vantagens ambientais da eletromobilidade, especialmente em áreas urbanas onde a qualidade do ar é um aspecto crítico.

Diante destes dois ciclos, existe uma diferença estrutural entre ICEV e BEV no ciclo energético, visto que nos ICEV, há emissões tanto no WTT quanto no TTW, sendo este último responsável pela maior parcela do impacto ambiental devido à combustão. Já nos BEVs, apesar das emissões associadas ao WTT dependerem significativamente da geração elétrica e das perdas no carregamento, a eliminação completa das emissões no TTW reduz substancialmente o impacto total do ciclo WTW.

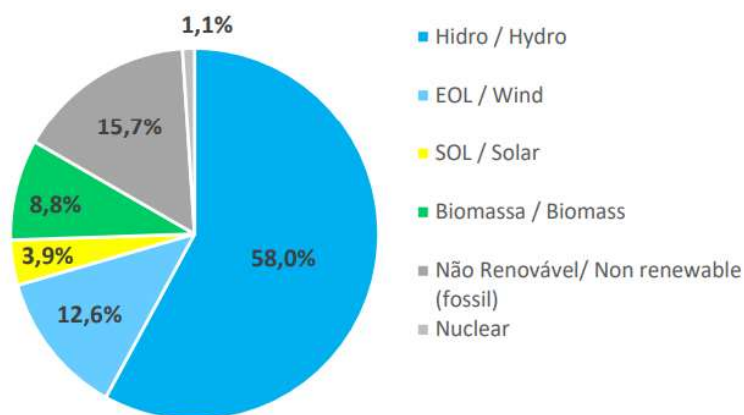
Desse modo, as emissões totais dos BEVs tendem a ser significativamente inferiores às dos veículos a combustão, especialmente em regiões com matriz elétrica predominantemente renovável, como no contexto brasileiro.

3.6.2 Influência da matriz elétrica brasileira na sustentabilidade da mobilidade elétrica

A avaliação dos impactos ambientais associados à mobilidade elétrica não depende apenas das características tecnológicas dos veículos, mas também do perfil energético utilizado para sua recarga, pois países cuja geração de eletricidade provém majoritariamente de fontes limpas tendem a potencializar as vantagens ambientais dos BEVs, reduzindo significativamente as emissões de CO₂ no ciclo *Well-to-Wheel*. Assim, compreender a composição da matriz elétrica nacional é fundamental para analisar, de maneira abrangente, os benefícios ambientais proporcionados pelos veículos elétricos no contexto brasileiro

No Brasil, essa condição é especialmente favorável. Brito *et al.* (2022) destacam que cerca de 85% da eletricidade brasileira é proveniente de fontes renováveis, com predominância de usinas hidrelétricas, mas também com participação crescente de parques eólicos e sistemas fotovoltaicos. Essa configuração representada na figura 10, confere ao país um dos sistemas elétricos mais limpos do mundo, fato que amplia substancialmente o potencial de descarbonização da frota elétrica nacional.

Figura 10 - Participação das fontes energéticas no Brasil.



Fonte: Portal Solar (2024).

A expressiva participação de fontes renováveis faz com que a recarga de veículos elétricos no Brasil apresente, mesmo na rede convencional, um impacto ambiental reduzido quando comparado a países cuja matriz é fortemente baseada em combustíveis fósseis. Além da eliminação de poluentes locais, os VEs também

demonstram maior eficiência energética: em média, consomem cerca de três vezes menos energia por quilômetro rodado do que veículos equipados com motores de combustão interna (Husain *et al.*, 2021). Esse desempenho é ampliado quando a recarga é realizada por meio de sistemas fotovoltaicos residenciais, que viabilizam um abastecimento limpo, descentralizado e de baixo impacto.

A tabela 1 sintetiza os principais estudos nacionais e internacionais selecionados para fundamentar este trabalho. Foram analisados 16 artigos publicados entre 2020 e 2025, que abordam temas como dimensionamento de sistemas fotovoltaicos, viabilidade econômica da recarga veicular residencial, impactos ambientais da mobilidade elétrica e estratégias de transição energética. Essa sistematização permite uma visão comparativa das abordagens metodológicas, dos resultados e das conclusões apresentadas pela literatura recente, evidenciando convergências, lacunas e tendências relevantes para o contexto brasileiro. A tabela consolida, portanto, a base teórica que sustenta as análises técnicas, econômicas e ambientais desenvolvidas nos capítulos subsequentes.

Tabela 1 - Artigos selecionados para análise.

Autores, data	Objetivo do estudo	Metodologia	Principais resultados	Conclusão
AkinsOoto; Ogunnowo; Ezeanochie (2024)	Revisar a evolução dos veículos elétricos nos EUA e no mundo	Revisão bibliográfica sistemática	Identificou avanços tecnológicos, políticas de incentivo e barreiras de mercado	A evolução dos EVs está ligada a políticas públicas e à maturidade tecnológica
AkinsOoto; Ogunnowo; Ezeanochie (2025)	Analisar inovações tecnológicas e tendências de mercado em EVs	Revisão de literatura recente + análise de tendências	Destacou baterias de alta densidade, IA embarcada e integração com redes inteligentes	O futuro dos EVs depende de inovação contínua e de suporte regulatório
Al-Amayreh; AlAmayreh; Amer (2025)	Avaliar estratégias de carregamento solar (unidirecional vs bidirecional)	Simulações com software Polysun em residências	O carregamento bidirecional reduziu custos e emissões, aumentando a eficiência energética	A recarga bidirecional é mais sustentável e economicamente vantajosa
Barkenbus (2020)	Examinar as perspectivas globais para EVs	Revisão narrativa de literatura	Incentivos governamentais e papel da China/Tesla aceleraram a adoção; desafios permanecem	EVs têm grande potencial, mas ainda dependem de políticas consistentes
Brito et al. (2022)	Avaliar viabilidade econômica de	Estudo de caso + indicadores financeiros	Projeto mostrou-se financeiramente viável, com retorno	A energia solar é alternativa economicamente

	instalar sistemas solares no IFPB	(VPL, TIR, <i>payback</i>)	em menos de 6 anos	sustentável para apoiar EVs
Pereira, E. B. et al. (2020)	Mapear o potencial de energia solar no Brasil e disponibilizar uma base confiável de irradiância solar.	Uso de 17 anos de dados do satélite GOES, validados com medições das redes INMET e SONDA	Brasil apresenta alta disponibilidade de energia solar e baixa variabilidade interanual; são fornecidos cenários de irradiância e de aplicações solares.	O Atlas confirma o elevado potencial solar brasileiro e oferece dados essenciais para a implantação de sistemas fotovoltaicos
Hirz, M.; Nguyen, A. (2022)	Comparar emissões e eficiência de ICEVs e BEVs usando o modelo Well-to-Wheel (WTW).	Aplicação da análise WTT e TTW, com fatores de emissão e avaliação de perdas energéticas.	BEVs têm TTW zero e menor WTW; ICEVs concentram emissões no uso. Em matrizes renováveis, BEVs reduzem mais de 50% das emissões.	BEVs emite menos emissão de CO ₂ , sobretudo quando recarregados com energia renovável, compensando emissões iniciais de fabricação.
Chocholac et al. (2021)	Propor framework de cálculo de emissões em transporte rodoviário	Estudo metodológico aplicado à indústria automotiva	Framework aumentou precisão na quantificação de emissões	Ferramenta contribui para mensurar impactos dos EVs no ciclo logístico
Cintra et al. (2025)	Revisar literatura sobre ciclo de vida de baterias de EVs	Revisão sistemática (método PRISMA)	Identificou aumento de estudos sobre reciclagem e segunda vida de baterias	Pesquisas avançam para mitigar impactos ambientais das baterias
Debnath et al. (2021)	Avaliar dimensões políticas, sociais e ambientais da adoção de EVs nos EUA	Análise de big data em mídias sociais + PESTLE	Questões políticas e legais têm grande peso na percepção social dos EVs	A aceitação dos EVs vai além da tecnologia: depende de contexto político-social
Ferreira; Cardoso (2020)	Estudar impacto de postos de recarga solar no Brasil	Estudo de caso em estações fotovoltaicas	Redução de custos e emissões em cenários de recarga solar	Postos fotovoltaicos são alternativa viável para ampliar rede de EVs no Brasil
Huo; Meckl (2022)	Comparar uso de redes neurais no gerenciamento de potência de PHEVs	Modelagem e simulações em Matlab	Rede neural superou métodos convencionais em eficiência energética	IA pode otimizar o gerenciamento de energia em veículos híbridos
Husain et al. (2021)	Revisar tendências e desafios em propulsão elétrica	Revisão técnica em <i>Proceedings of IEEE</i>	Apontou evolução de motores, conversores e sistemas de controle	Avanços em propulsão elétrica são fundamentais para expansão dos EVs
Martínez-Gómez; Espinoza (2024)	Analisar desafios e oportunidades da infraestrutura de recarga na América Latina	Revisão de políticas e estudos regionais	Baixa infraestrutura e desigualdade de acesso limitam crescimento dos EVs	Políticas integradas são essenciais para expandir infraestrutura na região
Oluwalana; Grzesik (2025)	Revisar avanços e perspectivas de veículos movidos a energia solar	Revisão abrangente da literatura	Destacou desafios técnicos de eficiência dos painéis e integração veicular	EVs solares são promissores, mas ainda em fase inicial de viabilidade

Samarakoon <i>et al.</i> (2024)	Revisar panorama global dos veículos elétricos	Revisão bibliográfica	Identificou barreiras econômicas e oportunidades de expansão	EVs são peça-chave da transição energética global
--	---	--------------------------	---	---

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Este capítulo apresenta e discute os principais resultados do estudo, organizados em blocos temáticos que dialogam diretamente com os objetivos propostos e com o problema central da pesquisa: a viabilidade técnica, econômica e ambiental da recarga doméstica de veículos elétricos com energia proveniente de sistemas fotovoltaicos.

Como principal entrega aplicada deste estudo, foi desenvolvido um simulador fotovoltaico em planilha eletrônica, implementado no software Microsoft Excel, com o objetivo de apoiar o dimensionamento e a avaliação da viabilidade da recarga residencial de veículos elétricos utilizando energia solar. A ferramenta foi concebida para integrar, de forma estruturada, os parâmetros técnicos e econômicos adotados no estudo, permitindo ao usuário configurar cenários e obter resultados consolidados de geração, custos e indicadores de viabilidade.

O simulador organiza suas funcionalidades em módulos interligados, que refletem a lógica metodológica do trabalho: inserção dos dados de entrada, dimensionamento técnico do sistema fotovoltaico, definição das premissas econômicas, execução da simulação e consolidação dos resultados em painéis de visualização. O fluxo de utilização e a arquitetura da ferramenta foram apresentados na Seção 2.1, evidenciando o princípio de funcionamento do simulador e a estrutura lógica adotado para garantir a rastreabilidade dos cálculos e resultado da simulação comparativa. A ferramenta desenvolvida neste trabalho está disponível para consulta e execução no link a seguir: [TCC IFMG - Simulador Fotovoltaico.xlsx](#).

Na sequência, são apresentadas as telas principais do simulador, com o objetivo de evidenciar seu funcionamento e orientar a leitura dos resultados do estudo de caso.

Figura 11 – Tela “Entrada de Dados” do simulador fotovoltaico.

INSTITUTO FEDERAL
Minas Gerais
Campus Betim

DADOS DE ENTRADA | CONSUMO

Instruções: Preencha os dados de consumo do sistema e componetes nos campos em "Azul"

1) Insira a rede da residencia encontrada na conta de energia do Local de Instalação do sistema.

Rede
Monofásica

2) Selecione o Veículo e adicionar a média de KM rodados em 1 ano

Selecione o Veículo	KM rodado em um ano	Capacidade da Bateria [kWh]	Consumo Médio Mensal [kWh]
BYD Dolphin	13000	44,90 kWh	167,15 kWh

3) Insira a Cidade e o Custo Médio do KMh (Informação disponível na fatura de Energia)

Selecione a Cidade	Tarifa (R\$/kWh)	Consumo Médio Mensal [kWh]	Consumo Médio Anual [kWh]
BETIM - MG	R\$ 0,83	0,00 kWh	0 kWh

4) Insira Detalhe o consumo da Residência mensal - Informação disponível na fatura de Energia

INSIRA CONSUMO MENSAL DETALHADO (kWh)

< >

1. ENTRADA 2. Dimensionamento Técnico 3. Financeiro 4. Dashboard +

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Na tela de Entrada de Dados da figura 11, concentram-se as variáveis que caracterizam o cenário de simulação: configuração elétrica da residência, informações do veículo elétrico e quilometragem anual e seleção de localidade, além da escolha de componentes do sistema. Essa etapa define a base de consumo considerada e assegura a padronização das entradas para as etapas seguintes do modelo.

Figura 12 – Tela “Dimensionamento Técnico” do simulador fotovoltaico.

INSTITUTO FEDERAL
Minas Gerais
Campus Betim

ENTRADA

DIMENSIONAMENTO

FINANCEIRO

DASHBOARD

DIMENSIONAMENTO TÉCNICO

Instruções: Cálculo Automático. Preencha apenas os dados de perdas no campo em "Azul"

IMÓVEL - DADOS DA UNIDADE CONSUMIDORA		VEÍCULO - DADOS DE CONSUMO MENSAL (kWh)	
Cidade	BETIM - MG	Veículo	BYD Dolphin
Consumo Mensal (KWh)	0 kWh	Consumo Mensal (KWh)	167 kWh

INFORMAÇÃO TÉCNICA (Coordenadas geográficas, inclinação e Perdas)

Latitude (°)	Longitude (°)	Inclinação Ideal (°)	Perdas (%)
-19,96	-44,19	20	25%

DIMENSIONAMENTO | Potência do Sistema Escolhida (kWh)

Consumo Médio Mensal (kWh)	Consumo Médio Diário (kWh)	Potência do Sistema Calculada (kWp)	Potência do Sistema Escolhida (kWp)
167,15 kWh	5,57 kWh	1,45 kWp	1,52 kWp

DIMENSIONAMENTO | Geração Mensal e Irradiação

Mês	Geração Mensal (kWh)	Irradiação (kWh/m².dia)	Consumo Mensal Imóvel + Veículo (kWh)
JAN	198	5,8	167
FEV	205	6,0	167
MAR	176	5,2	167
ABR	165	4,8	167
MAI	145	4,2	167
JUN	139	4,1	167
JUL	148	4,3	167
AGO	177	5,2	167
SET	189	5,5	167
OUT	192	5,6	167
NOV	181	5,3	167

< >

1. ENTRADA

2. Dimensionamento Técnico

3. Financeiro

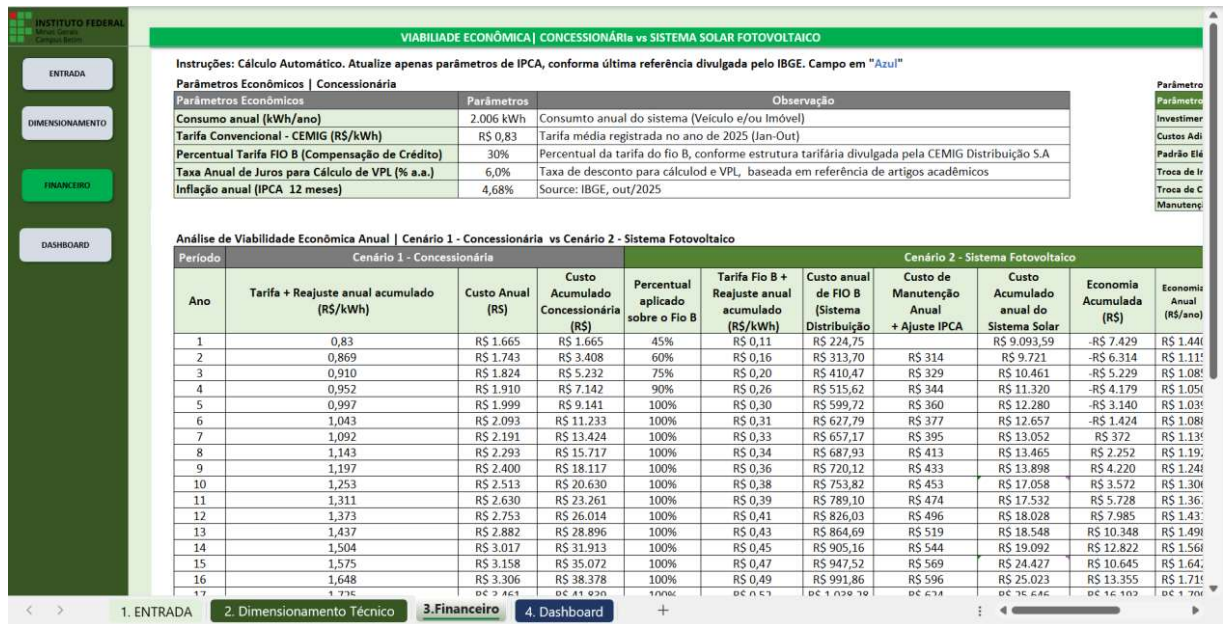
4. Dashboard

+

Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Na tela de Dimensionamento Técnico representada na figura 12, o simulador executa o cálculo da potência requerida do sistema fotovoltaico (kWp) e a estimativa de geração mensal e anual, a partir do consumo definido e das premissas técnicas adotadas (como perdas do sistema). O leitor deve observar os resultados intermediários que suportam o dimensionamento, pois eles explicam como a potência final foi obtida e servem de base para a etapa financeira.

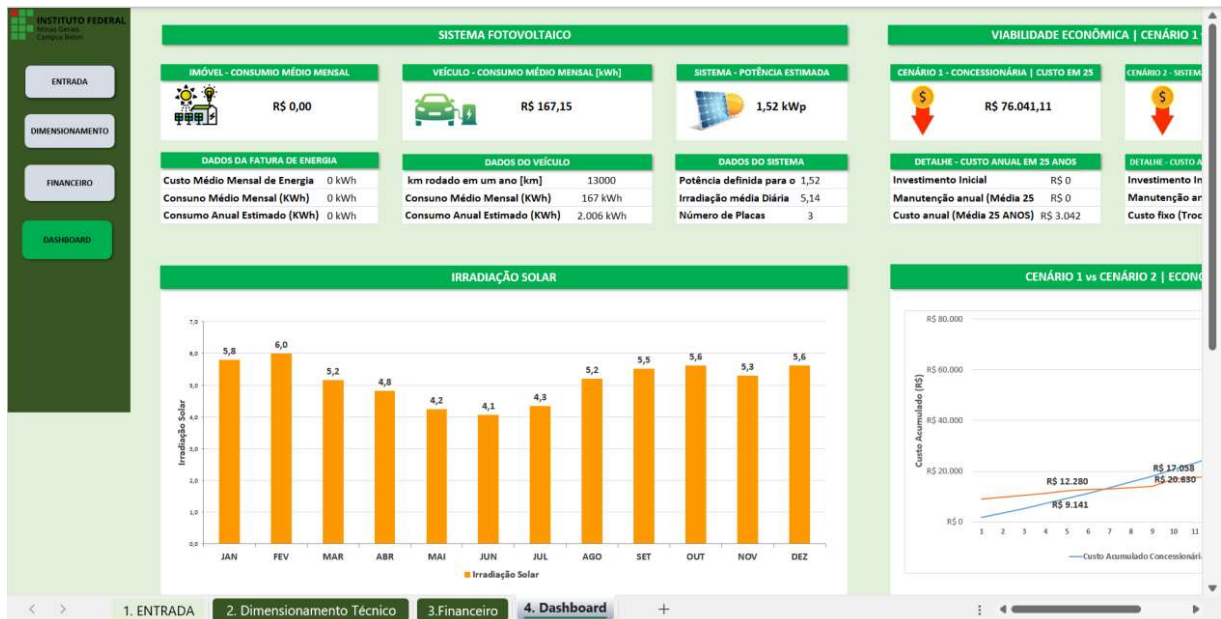
Figura 13 – Tela “Análise Financeira” do simulador fotovoltaico.



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

Na tela de Análise Financeira ilustrada na figura 13, são estruturadas as premissas econômicas do estudo (tarifa base, reajuste anual, custos de investimento e demais parâmetros) e calculado o comportamento dos custos ao longo do horizonte de análise. Essa etapa consolida o fluxo econômico que alimenta os indicadores de viabilidade e viabiliza a comparação entre os cenários de recarga pela rede convencional e de recarga com energia solar.

Figura 14 – Tela “Dashboard de Resultados” do simulador fotovoltaico.



Fonte: elaborado pelo autor (2026).

No Dashboard de Resultados representada na figura 14, os *outputs* são apresentados de forma consolidada para facilitar a interpretação: custos acumulados, economia estimada e indicadores de viabilidade (como *payback* e VPL), além da comparação direta entre os cenários analisados. Essa tela sintetiza o impacto das premissas adotadas no estudo de caso e serve como referência para as discussões apresentadas nas seções seguintes.

Os resultados do estudo de caso aplicado no simulador fotovoltaico foram estruturados em três categorias analíticas, de modo a refletir as principais dimensões de avaliação da viabilidade da recarga residencial de veículos elétricos com energia solar:

- 4.1 Dimensão Técnica: engloba o dimensionamento do sistema fotovoltaico necessário para atender ao consumo energético de um veículo elétrico no contexto residencial urbano, com base em dados reais de consumo e irradiação solar;
- 4.2 Dimensão Econômica: discute os custos envolvidos, as simulações financeiras realizadas (incluindo VPL e *Payback*) e a comparação entre os cenários de recarga com energia da concessionária e com energia solar;

- 4.3 Dimensão Ambiental: avalia o impacto ambiental da substituição da matriz energética convencional por energia solar, especialmente no que se refere à redução das emissões de CO₂ ao longo de um ciclo de 25 anos.

Cada uma dessas categorias será acompanhada de gráficos e tabelas que sintetizam os dados obtidos e facilitam a visualização dos impactos da proposta analisada. A abordagem adotada busca não apenas demonstrar a viabilidade da solução proposta, mas também fomentar reflexões sobre seu potencial de replicabilidade em larga escala no cenário urbano brasileiro.

4.1 Dimensionamento Técnico

Com o intuito de ampliar a abrangência técnica, além de garantir que o estudo contemple diferentes perfis de usuários de veículos elétricos, foram analisadas inicialmente as características dos modelos mais representativos do mercado brasileiro. Essa avaliação comparativa permite compreender como variam fatores essenciais para o dimensionamento da estação de recarga, tais como: capacidade da bateria, autonomia, potência máxima de recarga e tipo de conector utilizado. A tabela 2, reúne os dez modelos BEV com maior volume de vendas no período, possibilitando uma visão ampla do comportamento do mercado e das demandas energéticas típicas entre diferentes categorias de veículos elétricos.

Tabela 2 – Top 10 veículos elétricos mais vendidos no Brasil e caraterísticas técnicas (Jan–Out 2025).

Participação do mercado BEV (Jan-Out/25)				Características Técnias					
Rank	Modelo	Volume Jan–Out/25	MS%	Bateria (kWh)	Autonomi a (km)	Potência (cv)	Torque (Nm)	Vel. Máx (km/h)	Conector
1	BYD Dolphin Mini	25.712	42%	38	280	75	135	130	Tipo 2 / CCS2
2	BYD Dolphin GS	12.085	20%	44,9	291	95	180	160	Tipo 2 / CCS2
3	BYD Yuan Pro	4.057	7%	45,1	250	177	290	160	Tipo 2 / CCS2
4	Volvo EX30	2.945	5%	51	318	272	343	180	Tipo 2 / CCS2
5	GWM Ora 03	2.651	4%	48	232	171	250	160	Tipo 2 / CCS2
6	BYD Seal (AWD)	2.547	4%	82,56	372	531	590	180	Tipo 2 / CCS2
7	Renault Kwid E-	1.201	2%	26,8	185	65	113	130	Tipo 2 / CCS2
8	BYD Yuan Plus	1.051	2%	60,5	294	204	310	160	Tipo 2 / CCS2
9	Chevrolet Spark	1.026	2%	42	258	102	180	150	Tipo 2 / CCS2
10	JAC E-JS1 (EX5)	604	1%	30,2	161	62	150	105	Tipo 2 / CCS2

Fonte: dados de Emplacamento Anfavea (2025).

A média da capacidade das baterias dos dez veículos elétricos mais vendidos no Brasil em 2025 apresentou valor de aproximadamente 46,9 kWh, enquanto a autonomia média, considerando os dados homologados pelo Programa Brasileiro de Etiquetagem Veicular (PBEV/Inmetro), ficou em torno de 264 km. Observa-se que esses valores médios são bastante próximos do desempenho apresentado pelo BYD Dolphin, que possui bateria de 44,9 kWh e autonomia de 291 km. Essa proximidade técnica, associada ao fato de o modelo ser um dos veículos elétricos mais acessíveis, populares e amplamente comercializados no mercado brasileiro de BEVs, justificou sua escolha como referência para as simulações econômicas e energéticas desenvolvidas neste estudo. A adoção desse parâmetro garante maior representatividade dos resultados e alinhamento com a realidade predominante no mercado nacional de veículos elétricos.

Para efeito de simulação, adotou-se um padrão de uso urbano, com quilometragem anual estimada em 13.000 km, considerando o comportamento médio de condução do usuário em áreas metropolitanas (KBB Brasil, 2024). O cálculo do consumo energético anual do veículo é determinado pela seguinte equação abaixo:

$$Ckm = \frac{K_{total} \times P_{bateria}}{Ave} \quad (4.1)$$

No qual:

- Ckm é o consumo por quilômetro em um ano [kWh/ano];
- Ktotal representa a quilometragem total rodada no período [km];
- Pbateria corresponde à capacidade total da bateria do veículo [kWh];
- Ave é a autonomia média do veículo elétrico [km].

Aplicando-se os valores do BYD Dolphin:

$$Ckm = \frac{13.000 \times 44,9}{291} = 2.006 kWh/ano \quad (4.2)$$

Assim, o consumo médio anual estimado é de 2.005 kWh/ano, o que equivale a um consumo mensal aproximado de 167,15 kWh/mês.

$$C_{km} \text{ (mês)} = \frac{2006}{12} = 167,15 \text{ kWh/mês} \quad (4.3)$$

O sistema fotovoltaico foi dimensionado para suprir essa demanda energética utilizando energia solar em regime *on-grid*. A cidade escolhida para a simulação foi Betim (MG), que apresenta irradiação solar média de 5,14 kWh/m².dia. Considerando uma eficiência global de 75% para o sistema (com 25% de perdas padrão), obteve-se um fator de desempenho médio compatível com as condições locais. A equação de dimensionamento empregada para o cálculo da potência necessária foi:

$$\text{Potência necessária (kWp)} = \frac{\text{Consumo mensal (kWp)}}{\text{Irradiação diária } \left(\frac{\text{kWp}}{\text{m}^2} \cdot \text{dia}\right) \times 30 \times \text{Eficiência}} \quad (4.4)$$

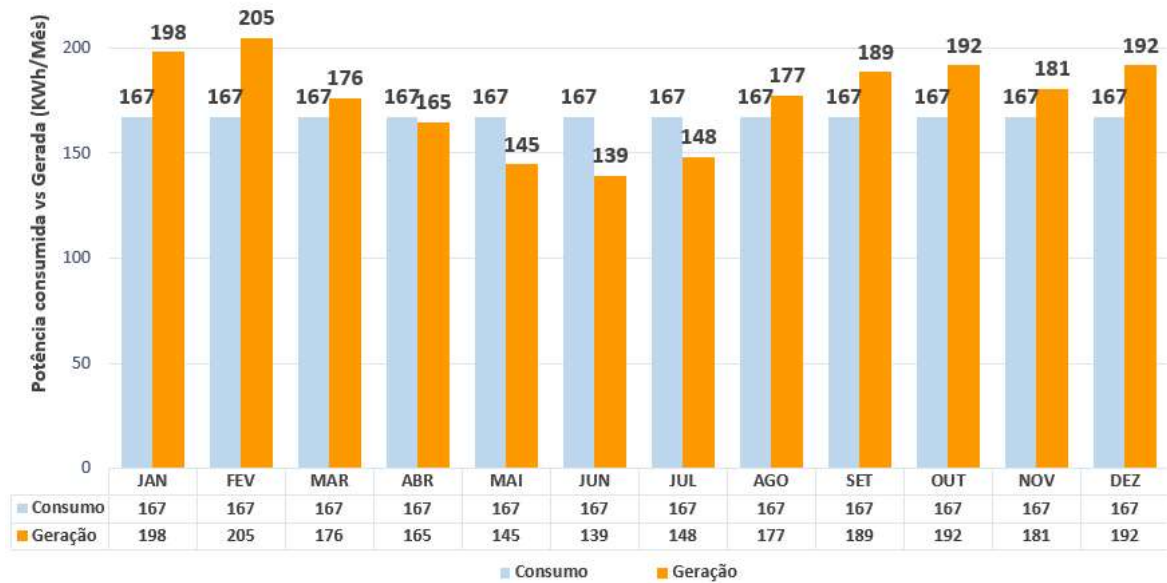
Substituindo os valores:

$$\text{Potência necessária} = \frac{166,11}{5,14 \times 30 \times 0,75} \approx 1,45 \text{ kWp} \quad (4.5)$$

Para garantir folga operacional, optou-se por um sistema com capacidade nominal de 1,52kWp, correspondente a um acréscimo de 5% em relação à potência calculada, composto por três módulos Canadian Solar (550 Wp cada), um inversor WEG - CFW300 220V 7,3A com potência de 1,5Kw e uma estação de recarga Wallbox Evowatt de 7,4 kW. Esse conjunto é suficiente para realizar uma recarga completa do veículo a cada dois ou três dias, de acordo com a rotina do usuário.

A seguir, na figura 15, apresenta-se o gráfico de geração mensal estimada de energia pela ferramenta do sistema fotovoltaico ao longo de um ano, com base na média histórica de irradiação solar mensal para a região de Betim.

Figura 15 – Geração mensal estimada de energia e estimativa de consumo em kWp.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A estimativa mensal de geração de energia elétrica foi obtida por meio do simulador de geração fotovoltaica, no qual foram considerado os dados climáticos da cidade de Betim/MG, a potência instalada de 1,5 kWp, a orientação ideal dos módulos (azimute 0° e inclinação de 20°), módulos fixados diretamente no telhado e perdas estimadas do sistema de 25%, conforme os parâmetros definidos na Figura 16. As bases de latitude e longitude indicadas na imagem abaixo foram retiradas do CRESESB/CEPEL e incluídas na ferramenta de simulação.

Figura 16 – Parâmetros de entrada de coordenadas geográficas, inclinação ideal e perdas.

INFORMAÇÃO TÉCNICA (Coordenadas geográficas, inclinação e Perdas)			
Latitude (°)	Longitude (°)	Inclinação Ideal (°)	Perdas (%)
-19,96	-44,19	20	25%

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

De acordo com estudos do Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB/CEPEL), sistemas conectados à rede no contexto climático brasileiro tipicamente apresentam Performance Ratio (PR) entre 74% e 80%, refletindo perdas associadas a temperatura, sombreamento eventual, sujeira sobre os

módulos, degradação dos componentes, conversão no inversor e demais fatores intrínsecos ao funcionamento da tecnologia (CRESESB, 2025). Nesse sentido, um PR de aproximadamente 75% — equivalente a perdas de 25% — encontra respaldo técnico sólido e é amplamente utilizado em estudos que buscam projeções conservadoras e aderentes à realidade operacional.

4.2 Análise Econômica: viabilidade econômica do sistema fotovoltaico

A análise de viabilidade econômica da recarga doméstica utilizando energia solar fotovoltaica foi desenvolvida com base em parâmetros econômicos atualizados para o ano de 2025, contemplando dados oficiais do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e o histórico tarifário da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG). O objetivo central consiste em comparar os custos acumulados da recarga convencional, fornecida pela concessionária, com os custos associados a um sistema fotovoltaico residencial ao longo de um horizonte temporal de 25 anos.

- Cenário 1 – Recarga convencional: energia fornecida exclusivamente pela concessionária, com base na tarifa residencial média praticada em Minas Gerais no ano de 2025, conforme dados da Cemig Distribuição S.A., que apresentaram valor médio anual de R\$ 0,83/kWh.
- Cenário 2 – Recarga solar: energia gerada por um sistema fotovoltaico residencial *on-grid*, com investimento inicial em equipamentos e instalação, dimensionado para atender à demanda anual estimada do veículo elétrico.

4.2.1 Parâmetros Econômicos da Concessionária (CEMIG-MG)

Para a análise do cenário de recarga convencional por meio da concessionária, foram definidos parâmetros econômicos que representam o comportamento tarifário da Companhia Energética de Minas Gerais (CEMIG) e os efeitos inflacionários do período-base de 2025. O primeiro parâmetro considerado é o consumo anual, estimado em 2.001 kWh/ano, correspondente à demanda energética anual necessária para a recarga do veículo elétrico.

A tarifa média do kWh registrada pela CEMIG no período de janeiro a outubro de 2025, equivalente a R\$ 0,83/kWh, foi utilizada como referência para o ano base da simulação. Esse valor foi obtido a partir das informações homologadas pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) para a classe residencial B1, o que garante aderência ao preço praticado oficialmente para consumidores residenciais em Minas Gerais. Além disso, aplicou-se uma taxa anual de reajuste de 4,68% como premissa de projeção para os anos subsequentes, definida com base na inflação medida pelo Índice Nacional de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA), considerando o valor acumulado em 12 meses (nov./2024 - out./2025). Esse índice foi utilizado como referência para atualização de custos operacionais e de reinvestimento ao longo do horizonte de análise, conforme a tabela 3:

Tabela 3 – Parâmetros Econômicos da Concessionária (CEMIG MG).

Parâmetros Econômicos	Parâmetros	Observação
Consumo anual (kWh/ano)	2.006 kWh	Consumo anual do sistema (Veículo e/ou Imóvel)
Tarifa Convencional - CEMIG (R\$/kWh)	R\$ 0,83	Tarifa média registrada no ano de 2025 (Jan-Out)
Percentual Tarifa FIO B (Compensação de Crédito)	30%	Percentual da tarifa do fio B, conforme estrutura tarifária divulgada pela CEMIG Distribuição S.A
Taxa Anual de Juros para Cálculo de VPL (% a.a.)	6,0%	Taxa de desconto para cálculo e VPL, baseada em referência de artigos acadêmicos
Inflação anual (IPCA 12 meses)	4,68%	Source: IBGE, out/2025

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Ressalta-se que os valores tarifários apresentados na tabela 3 constituem uma série tarifária ajustada, construída a partir da dinâmica histórica de reajustes da concessionária no período de janeiro a outubro de 2025, com o objetivo de manter coerência temporal e permitir a obtenção de uma taxa média representativa para a simulação do estudo de caso.

Para descontar os fluxos futuros de caixa e calcular o Valor Presente Líquido (VPL), adotou-se a taxa anual de juros de 6,0%, definida com base em estudos acadêmicos de viabilidade econômica e alinhada ao custo de oportunidade do capital para consumidores residenciais. O VPL foi calculado com base na fórmula utilizada em análises de viabilidade econômica de investimentos de longo prazo, dada por:

$$VPL = \sum \left[\frac{Ft}{(1+i)^t} \right] - I_0$$

Ao passo que:

- F_t representa o fluxo de caixa no período t (neste caso, a economia anual com energia elétrica),
- i é a taxa de desconto adotada (6% ao ano),
- t é o número do período (de 1 até 25 anos),
- I_0 é o valor do investimento inicial.

Como premissa adotada na simulação, considerou-se que a recarga residencial de veículos elétricos ocorre predominantemente no período noturno, em conformidade com o perfil de consumo descrito por Almaghrebi *et al.* (2024). Tal característica justifica a inclusão do custo associado ao componente Fio B da Tarifa de Uso do Sistema de Distribuição (TUSD) no modelo de análise. Para a avaliação da viabilidade econômica, assumiu-se que esse componente corresponde a aproximadamente 30% da tarifa total de energia elétrica, conforme a estrutura tarifária vigente divulgada pela CEMIG Distribuição S.A.

A Lei nº 14.300/2022 estabelece a aplicação progressiva dessa parcela sobre a energia compensada, com percentuais crescentes entre 2023 e 2029, conforme apresentado na tabela 4.

Tabela 4 - Percentual de cobrança do componente Fio B no período de transição.

Ano	Percentual de transição Fio B
2023	15%
2024	30%
2025	45%
2026	60%
2027	75%
2028	90%
2029 em diante	100%

Fonte: elaborado pelo autor com base na Lei nº 14.300/2022 (2025).

Como a simulação do sistema fotovoltaico foi realizada em 2025, adota-se a cobrança inicial de 45% do Fio B, com progressão até 100% a partir de 2029, incidindo exclusivamente sobre a parcela Fio B da TUSD e impactando diretamente o retorno financeiro do investimento.

4.2.2 Parâmetros Econômicos do Sistema Solar Fotovoltaico

Para o cenário de recarga por meio de energia solar fotovoltaica, foram determinados parâmetros econômicos relacionados ao investimento inicial, custos de operação e substituição de componentes, com o objetivo de representar o comportamento real do sistema ao longo de 25 anos.

O investimento inicial, que contempla a aquisição dos módulos fotovoltaicos, inversor, carregador doméstico e estrutura de instalação, totalizou R\$ 5.868,84. Além desse valor, foram considerados R\$ 1.000,00 referentes aos custos adicionais de instalação, abrangendo cabos, conectores, dispositivos de proteção e suportes de fixação das placas. Esses custos foram definidos a partir de consultas realizadas junto a fornecedores especializados e distribuidores nacionais de equipamentos fotovoltaicos. Os valores apresentados na tabela 5 sintetizam os materiais utilizados instalações residenciais de pequeno porte, compatíveis com arranjos monofásicos, bifásicos ou trifásicos.

Tabela 5 – Estimativa dos custos adicionais de materiais utilizados em instalações fotovoltaicas residenciais de pequeno porte.

Componente	Descrição técnica	Custo estimado (R\$)
Cabos solares (10 a 20 metros)	Cabos flexíveis isolados para corrente contínua (padrão 1 kV / 90°C)	250
Conectores MC4	Conectores padrão internacional para interligação dos módulos	120
Dispositivos de proteção	Disjuntores CC/CA, DPS e chaves seccionadoras	280
Kit de fixação para telhado	Trilhos, suportes, parafusos e presilhas de fixação	250
Materiais diversos	Abraçadeiras, terminações, eletrodutos e acessórios complementares	100
Custo Total Estimado		R\$ 1.000,00

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A simulação também incluiu os custos de reinvestimento necessários durante o ciclo de vida do sistema. A troca do inversor de frequência, cuja vida útil é estimada em aproximadamente dez anos, foi prevista para ocorrer no 10º e no 20º ano, com custo de R\$ 6.985,78 em cada ocorrência, valor corrigido pelo IPCA acumulado. Adicionalmente, a troca do carregador veicular doméstico foi considerada para o 15º ano, ao custo corrigido de R\$ 4.766,14, correspondente à sua vida útil média.

O custo de manutenção anual foi estimado em R\$ 300,00, valor que contempla limpezas preventivas dos módulos, inspeção dos componentes elétricos, verificação de dispositivos de proteção e pequenos ajustes estruturais. Segundo Pereira *et al.*

(2020), sistemas fotovoltaicos residenciais caracterizam-se por baixa necessidade de intervenções corretivas, sendo a limpeza e a inspeção visual as práticas mais comuns, o que reforça a adequação do valor adotado neste estudo. Para assegurar a atualização monetária do modelo, o custo anual foi reajustado pelo IPCA de 4,68%, garantindo coerência entre as projeções financeiras e a evolução real dos custos operacionais ao longo do período analisado.

A adoção de um carregador veicular do tipo Wallbox, com potência nominal de 7,4 kW, associado a um sistema fotovoltaico de 1,5 kWp, pode demandar a adequação do padrão de entrada de energia elétrica da residência, em função da elevada corrente requerida em 220 V. Em conformidade com as diretrizes da CEMIG Distribuição S.A. e com os critérios de dimensionamento estabelecidos pela ABNT NBR 5410:2004, considerou-se um custo adicional de R\$ 2.000,00 para essa adequação, valor compatível com referências de fornecedores do mercado. Para fins de análise de sensibilidade, esse custo foi avaliado no intervalo entre R\$ 1.000,00 e R\$ 3.000,00, impactando o investimento inicial do sistema.

Os principais parâmetros econômicos considerados na simulação do cenário do sistema fotovoltaico, encontram-se sintetizados na tabela 6, que apresenta o resumo consolidado das premissas adotadas neste estudo:

Tabela 6 – Parâmetros econômicos do Sistema Solar Fotovoltaico.

Parâmetros Econômicos	Custos	Observação
Investimento Inicial (R\$)	R\$ 5.868,84	Considerado placas, Inversor e Carregador Doméstico.
Custos Adicionais de Instalação	R\$ 1.000,00	Materiais Elétricos (Cabos, Conectores, proteção, Suporte para fixação de Placas etc).
Padrão Elétrico 220v	R\$ 2.000,00	Custo de Padrão Elétrico 220v caso na entrada seja declarado a rede "Monofásica".
Troca de Inversor de Frequência (10° ano e 20° ano)	R\$ 6.985,78	Custo de Inversor de frequência corrigido Inflação no 10° e 20° ano.
Troca de Carregador Elétrico (15° ano)	R\$ 4.766,14	Custo do Carregador corrigido, considerando Inflação atual, acumulado em 15 anos.
Manutenção anual - Solar (R\$/ano)	R\$ 300,00	Custo de manutenção anual, baseada em referência de artigos acadêmicos.

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Como premissa metodológica, a simulação adota o padrão de fornecimento em 220V, uma vez que a configuração monofásica, predominante no mercado residencial, pode não suportar o aumento de carga e de corrente associado à recarga veicular, exigindo a reformulação do padrão de entrada. O simulador desenvolvido neste estudo incorpora automaticamente o custo adicional dessa adequação sempre que o usuário informa possuir instalação elétrica monofásica e seleciona um carregador veicular do tipo Wallbox com potência nominal de 7,4 kW.

4.2.3 Comparativo anual: cenário 1 (Concessionária) vs cenário 2 (Sistema Fotovoltaico)

A análise comparativa entre os dois cenários foi estruturada a partir da projeção anual dos custos, considerando a evolução tarifária da concessionária e os custos operacionais e de reinvestimento do sistema solar fotovoltaico. A tarifa da CEMIG, os custos de manutenção e substituição de componentes do sistema solar foram atualizados anualmente pelo IPCA acumulado de 4,68%. Dessa forma, ambas as alternativas foram avaliadas sob condições econômicas equivalentes e realistas, refletindo fatores inflacionários e tarifários que impactam o consumidor ao longo do tempo.

O resultado consolidado demonstra que o sistema fotovoltaico apresentou desempenho econômico significativamente superior ao da concessionária. O custo acumulado da recarga convencional alcançou R\$ 76.041,11, enquanto o custo acumulado do sistema solar totalizou R\$ 36.087,38, resultando em uma economia de R\$ 39.953,73 ao longo de vinte e cinco anos. Além disso, observou-se que o sistema fotovoltaico se torna financeiramente vantajoso já nos primeiros anos, apresentando saldo anual positivo logo após a amortização dos custos iniciais, com *payback* inferior a seis anos.

Essa diferença significativa evidencia a viabilidade econômica do sistema solar, que se destaca por reduzir os impactos dos reajustes tarifários e proporcionar autonomia energética ao usuário. A economia acumulada e a estabilidade operacional tornam o sistema fotovoltaico economicamente viável a longo prazo, conforme a tabela 7.

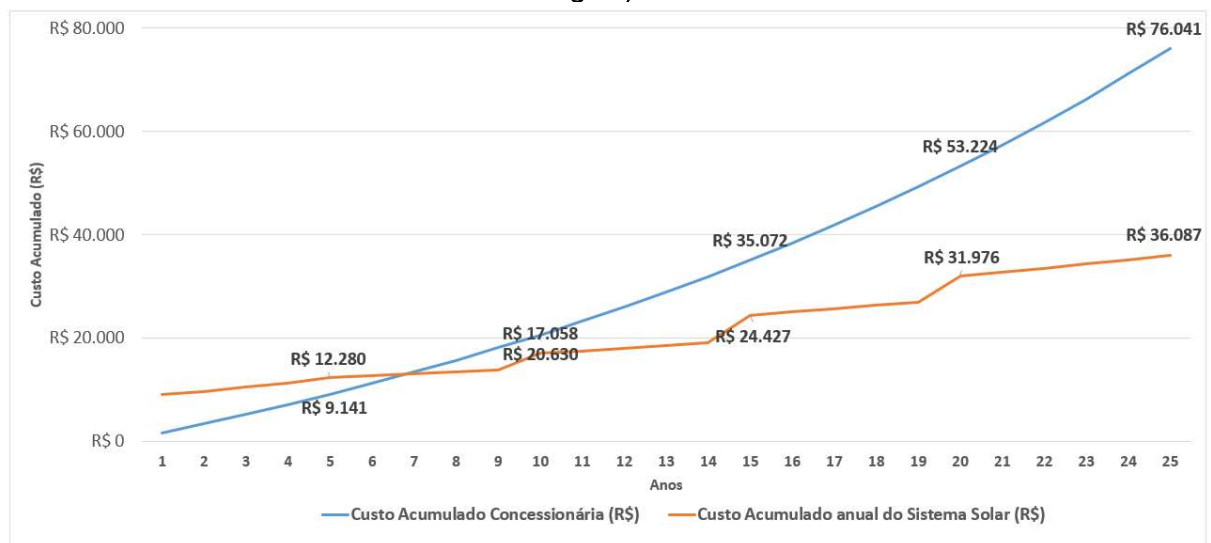
Tabela 7 - Análise de viabilidade econômica anual do cenário 1 vs. cenário 2.

Período	Cenário 1 - Concessionária			Cenário 2 - Sistema Fotovoltaico							
Ano	Tarifa + Reajuste anual acumulado (R\$/kWh)	Custo Anual (R\$)	Custo Acumulado Concessionária (R\$)	Percentual aplicado sobre o Fio B	Tarifa Fio B + Reajuste anual acumulado (R\$/kWh)	Custo anual de FIO B (Sistema Distribuição)	Custo de Manutenção Anual + Ajuste IPCA	Custo Acumulado anual do Sistema Solar (R\$)	Economia Acumulada (R\$)	Economia Anual (R\$/ano)	Balanco de Caixa
1	0,83	R\$ 1.665	R\$ 1.665	45%	R\$ 0,11	R\$ 225		R\$ 9.094	-R\$ 7.429	R\$ 1.440	NEGATIVO
2	0,869	R\$ 1.743	R\$ 3.408	60%	R\$ 0,16	R\$ 314	R\$ 314	R\$ 9.721	-R\$ 6.314	R\$ 1.115	NEGATIVO
3	0,910	R\$ 1.824	R\$ 5.232	75%	R\$ 0,20	R\$ 410	R\$ 329	R\$ 10.461	-R\$ 5.229	R\$ 1.085	NEGATIVO
4	0,952	R\$ 1.910	R\$ 7.142	90%	R\$ 0,26	R\$ 516	R\$ 344	R\$ 11.320	-R\$ 4.179	R\$ 1.050	NEGATIVO
5	0,997	R\$ 1.999	R\$ 9.141	100%	R\$ 0,30	R\$ 600	R\$ 360	R\$ 12.280	-R\$ 3.140	R\$ 1.039	NEGATIVO
6	1,043	R\$ 2.093	R\$ 11.233	100%	R\$ 0,31	R\$ 628	R\$ 377	R\$ 12.657	-R\$ 1.424	R\$ 1.088	NEGATIVO
7	1,092	R\$ 2.191	R\$ 13.424	100%	R\$ 0,33	R\$ 657	R\$ 395	R\$ 13.052	R\$ 372	R\$ 1.139	POSITIVO
8	1,143	R\$ 2.293	R\$ 15.717	100%	R\$ 0,34	R\$ 688	R\$ 413	R\$ 13.465	R\$ 2.252	R\$ 1.192	POSITIVO
9	1,197	R\$ 2.400	R\$ 18.117	100%	R\$ 0,36	R\$ 720	R\$ 433	R\$ 13.898	R\$ 4.220	R\$ 1.248	POSITIVO
10	1,253	R\$ 2.513	R\$ 20.630	100%	R\$ 0,38	R\$ 754	R\$ 453	R\$ 17.058	R\$ 3.572	R\$ 1.306	POSITIVO
11	1,311	R\$ 2.630	R\$ 23.261	100%	R\$ 0,39	R\$ 789	R\$ 474	R\$ 17.532	R\$ 5.728	R\$ 1.367	POSITIVO
12	1,373	R\$ 2.753	R\$ 26.014	100%	R\$ 0,41	R\$ 826	R\$ 496	R\$ 18.028	R\$ 7.985	R\$ 1.431	POSITIVO
13	1,437	R\$ 2.882	R\$ 28.896	100%	R\$ 0,43	R\$ 865	R\$ 519	R\$ 18.548	R\$ 10.348	R\$ 1.498	POSITIVO
14	1,504	R\$ 3.017	R\$ 31.913	100%	R\$ 0,45	R\$ 905	R\$ 544	R\$ 19.092	R\$ 12.822	R\$ 1.568	POSITIVO
15	1,575	R\$ 3.158	R\$ 35.072	100%	R\$ 0,47	R\$ 948	R\$ 569	R\$ 24.427	R\$ 10.645	R\$ 1.642	POSITIVO
16	1,648	R\$ 3.306	R\$ 38.378	100%	R\$ 0,49	R\$ 992	R\$ 596	R\$ 25.023	R\$ 13.355	R\$ 1.719	POSITIVO
17	1,725	R\$ 3.461	R\$ 41.839	100%	R\$ 0,52	R\$ 1.038	R\$ 624	R\$ 25.646	R\$ 16.193	R\$ 1.799	POSITIVO
18	1,806	R\$ 3.623	R\$ 45.462	100%	R\$ 0,54	R\$ 1.087	R\$ 653	R\$ 26.299	R\$ 19.163	R\$ 1.883	POSITIVO
19	1,891	R\$ 3.792	R\$ 49.254	100%	R\$ 0,57	R\$ 1.138	R\$ 683	R\$ 26.982	R\$ 22.272	R\$ 1.971	POSITIVO
20	1,979	R\$ 3.970	R\$ 53.224	100%	R\$ 0,59	R\$ 1.191	R\$ 715	R\$ 31.976	R\$ 21.248	R\$ 2.064	POSITIVO
21	2,072	R\$ 4.156	R\$ 57.380	100%	R\$ 0,62	R\$ 1.247	R\$ 749	R\$ 32.725	R\$ 24.655	R\$ 2.160	POSITIVO
22	2,169	R\$ 4.350	R\$ 61.730	100%	R\$ 0,65	R\$ 1.305	R\$ 784	R\$ 33.509	R\$ 28.222	R\$ 2.261	POSITIVO
23	2,270	R\$ 4.554	R\$ 66.284	100%	R\$ 0,68	R\$ 1.366	R\$ 821	R\$ 34.329	R\$ 31.955	R\$ 2.367	POSITIVO
24	2,377	R\$ 4.767	R\$ 71.051	100%	R\$ 0,71	R\$ 1.430	R\$ 859	R\$ 35.188	R\$ 35.863	R\$ 2.478	POSITIVO
25	2,488	R\$ 4.990	R\$ 76.041	100%	R\$ 0,75	R\$ 1.497	R\$ 899	R\$ 36.087	R\$ 39.954	R\$ 2.594	POSITIVO
CUSTO & ECONOMIA ACUMULADA			R\$ 76.041					R\$ 36.087	R\$ 39.954	R\$ 1.620	

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

O Gráfico da figura 17 apresenta o comportamento do custo acumulado dos dois cenários ao longo dos 25 anos. Observa-se que a curva referente ao cenário da concessionária cresce de forma acentuada em decorrência dos reajustes tarifários anuais, refletindo a crescente despesa associada ao consumo contínuo de energia elétrica da rede.

Figura 17 - Comparativo de custo acumulado em 25 anos entre recarga convencional (concessionária) e recarga com energia solar fotovoltaica (sistema *on-grid*).

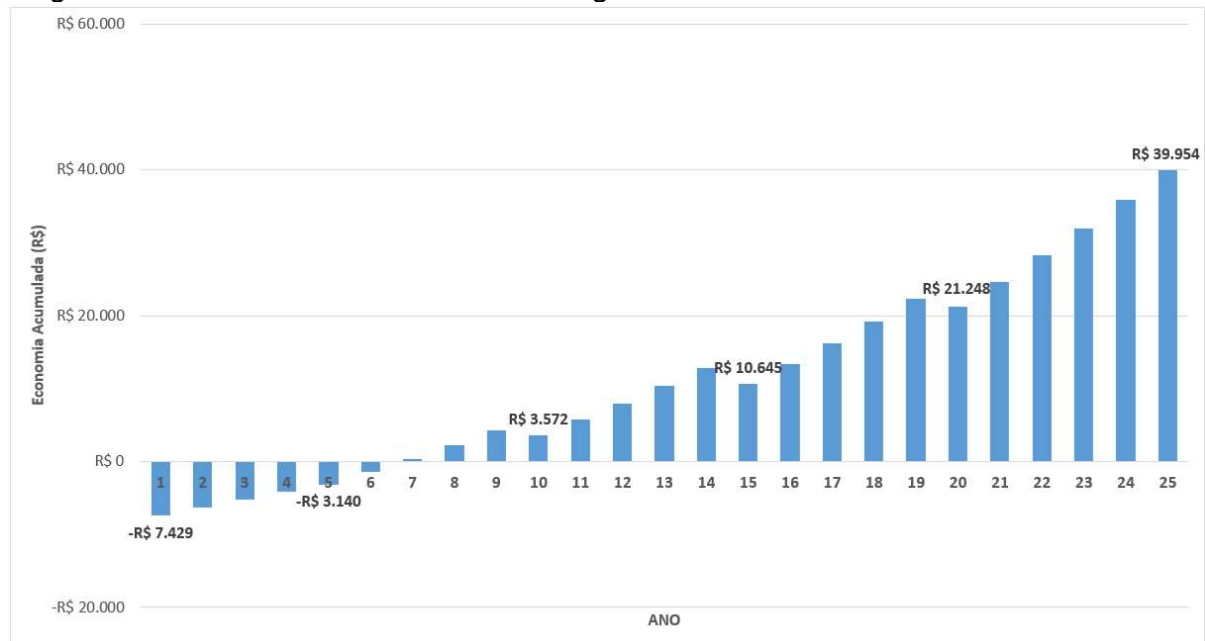


Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Em contrapartida, a curva do cenário fotovoltaico mantém-se significativamente mais estável, com aumentos graduais decorrentes apenas dos custos de manutenção e de reinvestimento. A diferença entre as curvas amplia-se de forma progressiva ao longo dos anos, evidenciando a forte vantagem financeira do sistema solar diante do modelo convencional.

A economia acumulada ao longo de 25 anos é apresentada na figura 18, no qual mostra que o investimento inicial é amortizado nos primeiros anos e a economia aumenta de forma contínua e acelerada. Ao final do período, a economia total supera R\$ 39.954,00, comprovando que o sistema fotovoltaico não apenas reduz custos anuais, mas também gera um ganho financeiro significativo no longo prazo.

Figura 18 - Economia acumulada ao longo de 25 anos com o sistema fotovoltaico.



Fonte: elaborado pelo autor com base nos dados da CRESESB (2025) e ANEEL (2024).

Considerando os custos de equipamentos fotovoltaicos, tarifas de energia e políticas de incentivo estão sujeitos a variações ao longo do tempo, realizou-se uma análise qualitativa, avaliando o impacto dessas oscilações na viabilidade financeira da recarga solar. Observou-se que os aumentos tarifários acima da inflação tendem a reduzir significativamente o tempo de retorno do investimento, aumentando o VPL ao longo dos anos. Por outro lado, elevações no curso dos módulos e inversores, embora influenciem o investimento inicial, apresentam efeito menos expressivo quando comparadas às economias acumuladas ao longo da vida útil do sistema.

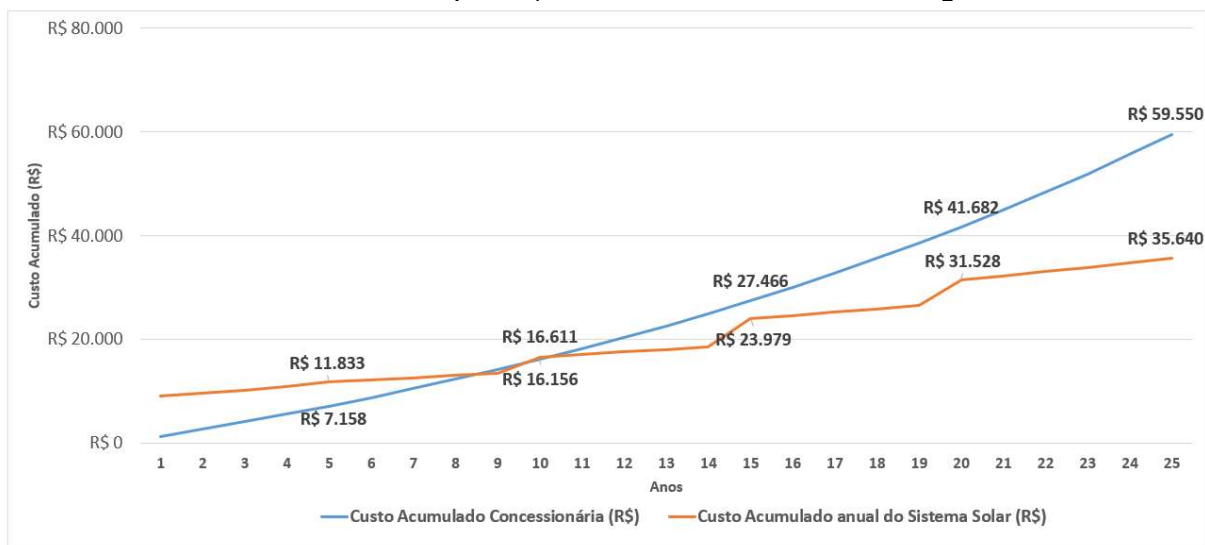
Essa análise, evidencia que, embora o investimento inicial em energia solar seja significativo, os benefícios financeiros acumulados ao longo do tempo compensam o aporte inicial, tornando a recarga doméstica por meio de sistema fotovoltaico uma solução economicamente vantajosa, especialmente em regiões com alta incidência solar.

4.2.4 Análise de sensibilidade econômica: cenário 1 (Concessionária com Tarifa Branca) e cenário 2 (Sistema Fotovoltaico On-Grid)

Com o objetivo de validar a viabilidade econômica do sistema fotovoltaico, realizou-se uma análise de sensibilidade no cenário 1, considerando a Tarifa Branca (Grupo B), estruturada em três postos tarifários: ponta, intermediário e fora de ponta. O posto fora de ponta corresponde aos períodos de menor demanda de energia elétrica na rede, motivo pelo qual apresenta menor valor tarifário por kWh, enquanto os postos intermediário e de ponta refletem níveis crescentes de carregamento do sistema elétrico. Para representar um perfil de recarga predominantemente noturno de baixa demanda, compatível com cargas deslocáveis como a recarga residencial de veículos elétricos, adotou-se como referência o valor de R\$ 0,65/kWh para o posto fora de ponta, parâmetro utilizado exclusivamente para fins de análise de sensibilidade e compatível, em ordem de grandeza, com as tarifas publicadas pela CEMIG para a Tarifa Branca residencial (B1), as quais variam conforme a bandeira tarifária vigente (CEMIG, 2026).

Conforme a figura 19, mesmo sob essa condição mais favorável à recarga pela rede elétrica, o sistema fotovoltaico *on-grid* manteve vantagem econômica ao longo de 25 anos. O custo acumulado do cenário 1 atingiu R\$ 59.550,00, enquanto o cenário 2 totalizou R\$ 35.640,00, resultando em economia acumulada de R\$ 23.911,00.

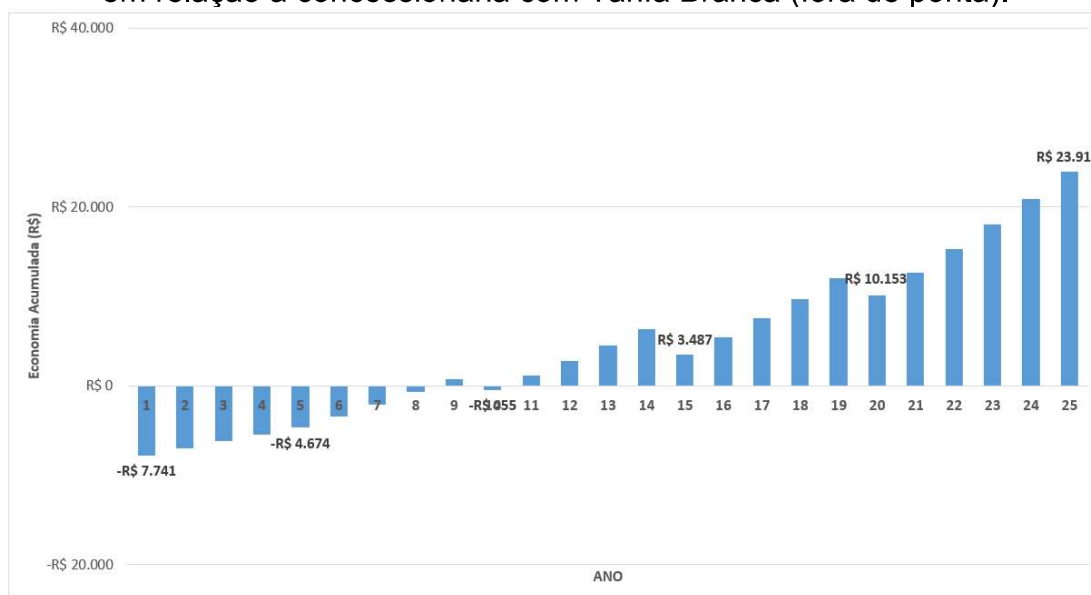
Figura 19 – Comparativo de custo acumulado em 25 anos: concessionária (Tarifa Branca – fora de ponta) vs. sistema fotovoltaico *on-grid*.



Fonte: elaborado pelo autor (2025)

Observou-se no gráfico da figura 20 que a redução do custo da energia no cenário 1 diminui o diferencial econômico entre as alternativas e posterga o retorno do investimento, resultando em um *payback* aproximado de 11 anos, momento a partir do qual a economia acumulada passa a assumir valores positivos.

Figura 20 – Economia acumulada ao longo de 25 anos: sistema fotovoltaico *on-grid* em relação à concessionária com Tarifa Branca (fora de ponta).



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

Dessa forma, a análise de sensibilidade confirma que, mesmo considerando uma tarifa mais competitiva para a recarga em baixa demanda por meio da rede elétrica, o sistema fotovoltaico mantém economia no longo prazo, reforçando a viabilidade econômica do sistema fotovoltaico na comparação principal.

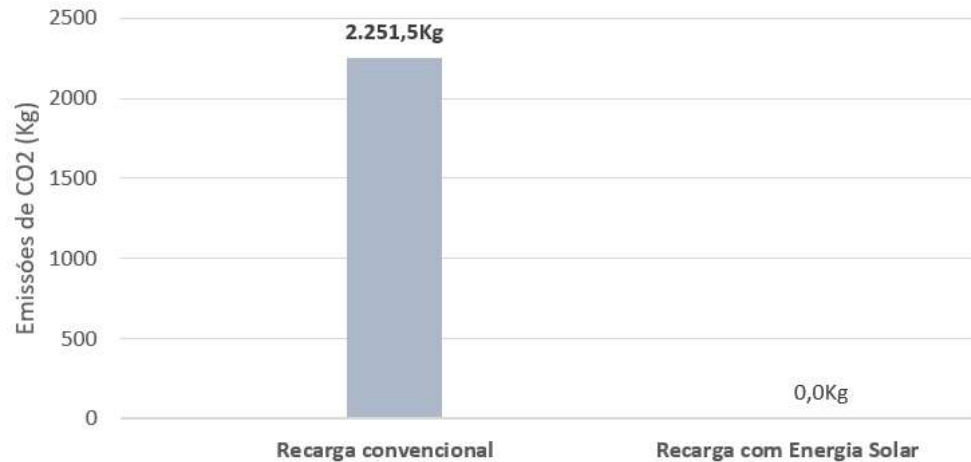
4.3 Dimensão Ambiental: redução de emissões e sustentabilidade

A análise ambiental proposta neste estudo visa estimar os impactos positivos da recarga doméstica de veículos elétricos (VEs) com energia solar em comparação com a recarga convencional por meio da rede elétrica pública. Considerando o ciclo de vida útil de um sistema fotovoltaico residencial e média de operação estimada em 25 anos, calcula-se a quantidade de dióxido de carbono (CO₂) que deixaria de ser emitida ao adotar um modelo de abastecimento baseado em energia renovável.

O veículo elétrico analisado, modelo BYD Dolphin, consome aproximadamente 44,9 kWh por carga completa, com autonomia de 291 km. Supondo uma quilometragem anual de 13.000 km, estima-se um consumo médio anual de 2.001 kWh. Considerando o período de vida útil de 25 anos do sistema, o consumo acumulado do veículo nesse intervalo seria de aproximadamente 50.034 kWh.

Segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), a matriz elétrica brasileira apresenta intensidade média de emissões entre 40 e 50 gCO₂ por kWh, reflexo da elevada participação de fontes renováveis na geração de energia elétrica. Tomando-se o valor médio de 45 gCO₂/kWh, tem-se que a recarga do veículo exclusivamente pela rede elétrica resultaria em emissões da ordem de 2.251,5 kg de CO₂ ao longo de 25 anos. Em contrapartida, conforme apresentado na figura 21, a recarga realizada integralmente por sistema fotovoltaico eliminaria essa emissão, constituindo uma redução direta de gases de efeito estufa equivalente. Resultados semelhantes são apresentados por Brito *et al.* (2022), que destacam o potencial da energia solar na mitigação de emissões associadas à mobilidade elétrica.

Figura 21 - Estimativa comparativa de emissões de CO₂ em 25 anos: recarga convencional versus recarga com energia solar residencial.



Fonte: elaborado pelo autor com base nos dados da EPE (2023).

Essa diferença é particularmente relevante no contexto brasileiro, cuja matriz elétrica já é predominantemente renovável, mas que ainda possui participação de fontes térmicas em horários de pico e em regiões com menor cobertura hidrelétrica. Ao transferir a demanda energética para sistemas fotovoltaicos autônomos, promove-se não apenas a redução da emissão de GEE, como também a desconcentração do consumo nos momentos de maior demanda da rede. Quando essa solução é replicada em escala urbana, os impactos positivos são amplificados, contribuindo para a melhoria da qualidade do ar e para o cumprimento das metas climáticas e transição energética.

4.4 Discussão Geral

A presente seção aprofunda a análise dos resultados obtidos a partir do uso do simulador fotovoltaico, por meio do diálogo com a literatura especializada selecionada, composta por 16 artigos científicos publicados entre 2020 e 2025. Mais do que apenas interpretar um estudo de caso específico, esta discussão busca avaliar em que medida a ferramenta desenvolvida é capaz de reproduzir comportamentos técnicos, econômicos e ambientais consistentes com as tendências observadas na pesquisa científica recente, reforçando sua utilidade como instrumento de apoio à decisão no contexto da recarga residencial de veículos elétricos.

O eixo técnico da literatura científica sobre mobilidade elétrica e energia fotovoltaica destaca-se por investigar o desempenho, a eficiência e a viabilidade estrutural da integração entre veículos elétricos e sistemas de geração distribuída. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, publicado pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), regiões do Sudeste, como Minas Gerais, apresentam níveis elevados de irradiação solar anual, podendo superar 5,5 kWh/m².dia, o que favorece altos rendimentos globais do sistema (Pereira *et al.*, 2020). Além disso, estudos indicam que, para sistemas conectados à rede (*on-grid*) em condições climáticas brasileiras típicas, o PR costuma variar entre 74% e 80% (CRESESB, 2025). Esse dado corrobora os resultados obtidos neste trabalho, no qual se utilizou valor médio de eficiência de 75% no dimensionamento do sistema para a cidade de Betim-MG, com irradiação semelhante.

De forma complementar, Cintra *et al.* (2025) analisaram o impacto da recarga noturna de veículos elétricos na rede, considerando cenários de integração com sistemas fotovoltaicos residenciais. Os autores identificaram que a descentralização proporcionada pela recarga solar reduz picos de demanda e melhora a estabilidade do sistema elétrico. Essa constatação se aproxima do presente estudo, que propõe o uso de sistemas *on-grid* como forma de reduzir a sobrecarga da rede em horários de maior consumo.

No trabalho de Al-Amayreh; Alamyreh; Amer (2025), foi avaliado o desempenho de inversores em aplicações residenciais, com ênfase na compatibilidade com carregadores de veículos elétricos. Os resultados indicaram que a escolha do inversor adequado é determinante para evitar perdas de eficiência no processo de carregamento. Essa preocupação também foi considerada neste estudo ao selecionar equipamentos compatíveis com a demanda do veículo analisado.

Além disso, Brito *et al.* (2022) examinaram casos de integração de energia solar e recarga veicular em ambientes urbanos, destacando fatores como sombreamento, arquitetura das edificações e manutenção dos módulos. Esses aspectos podem explicar variações de desempenho e reforçam a necessidade de adequar o dimensionamento às condições específicas de cada instalação. Embora este trabalho se baseie em simulações padronizadas, as premissas adotadas estão alinhadas às recomendações observadas por esses autores.

O eixo econômico da literatura evidencia a crescente relevância das análises de custo-benefício na transição para uma mobilidade mais sustentável. No estudo de

Debnath *et al.* (2021), foi realizada uma análise comparativa dos custos operacionais entre veículos a combustão e veículos elétricos integrados a sistemas solares. Os resultados mostraram que, a economia ao longo do ciclo de vida torna os VEs competitivos, especialmente quando associados à geração fotovoltaica. Esse achado é compatível com os resultados obtidos neste trabalho, nos quais os indicadores de Valor Presente Líquido (VPL) e *Payback* simples demonstraram viabilidade do investimento. Além disso, a simulação considerando a Tarifa Branca reforçou que, mesmo sob condições tarifárias mais favoráveis à recarga pela rede elétrica, o sistema fotovoltaico permanece economicamente viável, evidenciando a robustez dos resultados obtidos.

Já o artigo de Martínez-Gómez e Espiniza (2024) destacou a influência das variações tarifárias e da irradiação solar sobre a atratividade econômica da recarga fotovoltaica. Os autores concluíram que o modelo é mais vantajoso em localidades com tarifas de energia elevadas e alta insolação, condição semelhante à de Betim - MG, onde a simulação do estudo foi realizada.

Complementando esse eixo, Samarakoon *et al.* (2024) compararam os custos de diferentes soluções de mobilidade elétrica urbana, incluindo automóveis, ônibus e bicicletas integrados a sistemas solares. Os resultados evidenciaram que a maior economia ocorre em veículos leves de uso diário, como o modelo BYD Dolphin utilizado na simulação deste trabalho. Isso reforça a escolha do perfil veicular adotado como base do estudo.

No âmbito institucional, Akisooto; Ogunnowo; Ezeanochie (2024, 2025) analisaram a influência de políticas públicas e incentivos governamentais na viabilidade da mobilidade elétrica. Os resultados indicaram que subsídios fiscais e programas de estímulo — como o Mover, no Brasil — são fundamentais para viabilizar a recarga solar em larga escala. Essa evidência dialoga diretamente com a discussão feita no Capítulo 3 acerca das lacunas e oportunidades regulatórias no contexto nacional.

O eixo ambiental da literatura traz contribuições significativas para avaliar os impactos da recarga de veículos elétricos com energia renovável. No estudo de Husain *et al.* (2021), foi conduzida uma análise de ciclo de vida (ACV) comparando veículos elétricos recarregados por fontes solares e pela rede convencional. Os autores demonstraram que a recarga solar reduz em mais de 60% as emissões totais

de CO₂ ao longo de 20 anos, resultado compatível com a simulação apresentada neste trabalho.

De forma semelhante, Oluwalana e Grzesik (2025) investigaram o papel da mobilidade elétrica na redução de emissões urbanas e ressaltaram que, mesmo em cenários com emissões iniciais mais altas devido à fabricação das baterias, o uso de energia solar acelera o ponto de equilíbrio ambiental (break-even). Esse argumento reforça a relevância de priorizar a recarga fotovoltaica residencial.

O estudo de Ferreira e Cardoso (2020) também contribui ao destacar os benefícios ambientais e sociais da mobilidade elétrica integrada a sistemas solares, com foco em ganhos de qualidade do ar e percepção positiva por parte dos usuários. Esses fatores subjetivos ampliam o valor da recarga fotovoltaica além dos aspectos técnicos e econômicos.

Embora o presente estudo considere explicitamente a substituição do inversor e do carregador veicular ao longo do horizonte de análise, assume-se que a bateria do veículo elétrico mantém comportamento estável, não sendo modelada sua degradação no fluxo de caixa. Estudos indicam que recargas realizadas predominantemente em corrente alternada, com potências moderadas, como no carregamento residencial por meio de Wallbox de 7,4 kW, resultam em menores taxas de degradação, em função da redução do estresse térmico e eletroquímico imposto às células (Peters *et al.*, 2017). Em contrapartida, o uso frequente de recargas rápidas em corrente contínua está associado ao aumento da resistência interna e à aceleração da perda de capacidade ao longo dos ciclos de carga (Vetter *et al.*, 2005). Dessa forma, o perfil de recarga considerado neste estudo é compatível com práticas que favorecem a durabilidade da bateria, contribuindo indiretamente para a redução do custo total de posse do veículo elétrico e reforçando a viabilidade técnica e econômica do sistema analisado.

Por fim, Barkenbus (2020) reforça a perspectiva de que a mobilidade elétrica não deve ser tratada apenas como inovação tecnológica, mas como vetor de transformação urbana sustentável. Essa abordagem sistêmica, que associa transporte limpo, geração renovável e descentralização energética, está alinhada à proposta deste trabalho, que enxerga a recarga solar como elemento estratégico para a descarbonização no Brasil.

4.4.1 Aspectos sociais e equidade no acesso à mobilidade solar

Como contribuição para a discussão advinda até aqui, é necessário abordar a expansão da recarga solar domiciliar para veículos elétricos e seus benefícios e divergências. Por mais que haja convergências quanto às questões ambientais e econômicas, evidencia-se, também, desafios relacionados à equidade no acesso à tecnologia. Em um país marcado por desigualdades regionais e socioeconômicas, a adoção dessas soluções concentra-se majoritariamente em grupos com maior poder aquisitivo, que possuem acesso tanto à aquisição do VE quanto ao investimento inicial em sistemas fotovoltaicos. Além disso, regiões com menor irradiância ou infraestrutura menos desenvolvida enfrentam dificuldades adicionais para implementação de projetos solares residenciais.

A literatura, até então, no que foi analisado até aqui, aponta que políticas de incentivo, linhas de financiamento específicas e programas públicos de democratização da energia renovável são fundamentais para ampliar o acesso a essas tecnologias (Ferreira; Cardoso, 2020). Nesse sentido, o avanço da mobilidade elétrica sustentável depende não apenas de soluções técnicas, mas de estratégias que garantam inclusão, justiça energética e participação social no processo de transição energética.

5 CONCLUSÃO

Este trabalho teve como principal entrega o desenvolvimento de um simulador fotovoltaico aplicado à análise da viabilidade técnica, econômica e ambiental da recarga residencial de veículos elétricos a partir de energia solar fotovoltaica. A ferramenta foi concebida com base em uma revisão da literatura científica recente e aplicada por meio da simulação de um estudo de caso no município de Betim–MG, permitindo a integração consistente entre os fundamentos teóricos e sua aplicação prática de forma estruturada e fundamentada.

Os resultados obtidos no estudo de caso demonstraram que a recarga de veículo elétrico alimentada por um sistema fotovoltaico é tecnicamente viável e apresenta ganhos econômicos expressivos a médio e longo prazo, em comparação à recarga convencional fornecida pela rede elétrica. A análise econômica evidenciou *payback* a partir do sétimo ano de operação, com Valor Presente Líquido positivo a partir deste período. Do ponto de vista ambiental, verificou-se redução significativa das emissões de CO₂, reforçando o potencial dessa alternativa para mitigar impactos associados ao uso de combustíveis fósseis.

A análise de sensibilidade considerou um cenário conservador, baseado em um perfil de consumo predominantemente noturno para a incorporação dos custos do Fio B, além de uma simulação adicional com a aplicação da Tarifa Branca no cálculo do custo da concessionária. Mesmo com variações de $\pm 10\%$ nas tarifas de energia e nos custos de instalação, os resultados confirmaram a robustez e a viabilidade econômica do sistema fotovoltaico.

Além dos aspectos técnicos e econômicos, a pesquisa ressalta a importância do marco regulatório recente, representado pela Lei nº 14.300/2022, que consolidou as regras do micro e minigeração distribuída e fortaleceu o papel do consumidor-gerador no sistema elétrico nacional. Esse arcabouço normativo amplia a segurança jurídica e incentiva a expansão dos sistemas solares residenciais, contribuindo para a democratização do acesso à energia limpa.

Apesar dos resultados positivos, reconhece-se que a adoção da tecnologia ainda enfrenta barreiras socioeconômicas associadas ao custo inicial de instalação e à limitação de linhas de crédito específicas. A ampliação de políticas públicas de incentivo e programas de financiamento acessível é fundamental para promover a

equidade no acesso à mobilidade elétrica e à energia solar, de modo a incluir diferentes perfis de consumidores nesse processo de transição sustentável.

Como perspectiva de continuidade, estudos futuros poderão explorar cenários híbridos *on-grid/off-grid* com armazenamento em baterias, capazes de ampliar a autonomia do sistema e reduzir a dependência da rede pública em períodos de baixa irradiação solar. Essa integração poderá ser associada a tecnologias emergentes de carregamento bidirecional e redes inteligentes, promovendo novos modelos de gestão energética e contribuindo para a consolidação das chamadas *smart grids* no contexto urbano brasileiro.

Nesse sentido, como contribuição aplicada, o simulador desenvolvido neste estudo relata a importância de disponibilizar, ao consumidor, uma ferramenta técnica para apoio quanto a tomada de decisão para a adoção de sistemas fotovoltaicos. Ao integrar, de forma simples e intuitiva, o dimensionamento técnico, a análise econômica e a estimativa dos benefícios ambientais, o produto permite que o usuário compreenda não apenas a viabilidade financeira, mas também sua relevância para a redução de emissões e para a promoção de uma mobilidade mais sustentável. Assim, o simulador contribui para democratizar o acesso à informação qualificada, reduzir barreiras de entrada para novos usuários e incentivar a expansão de soluções energéticas limpas no Brasil, principalmente.

Como desdobramento natural deste trabalho, estudos futuros poderão ampliar as funcionalidades do simulador por meio da incorporação de técnicas de Inteligência Artificial, visando aprimorar a previsão de geração fotovoltaica, a estimativa de consumo veicular e a personalização automática de cenários para diferentes perfis de usuários. Adicionalmente, o desenvolvimento de uma versão em aplicativo móvel ou plataforma web poderá aumentar a acessibilidade da ferramenta e permitir integração com bases de dados em tempo real, como tarifas atualizadas, dados meteorológicos e histórico de consumo.

Outras extensões relevantes incluem a modelagem de sistemas híbridos *on-grid/off-grid* com armazenamento em baterias, a simulação de carregamento bidirecional (V2G e V2H) e a integração com conceitos de redes inteligentes (*smart grids*). Tais evoluções permitiriam que o simulador deixasse de ser apenas uma ferramenta de análise estática, tornando-se um ambiente dinâmico de gestão energética residencial, alinhado às tendências emergentes da transição energética e da mobilidade elétrica.

Conclui-se, portanto, que a recarga veicular a partir de energia solar representa uma alternativa ambientalmente sustentável, economicamente viável e tecnologicamente consolidada, apta a contribuir para a descarbonização da matriz de transportes. A integração entre inovação tecnológica, políticas públicas e consciência ambiental é o caminho para que a mobilidade elétrica se consolide como vetor de desenvolvimento sustentável e de transformação energética no Brasil.

6 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). **Tarifas de Energia Elétrica**. Brasília: ANEEL, 2024.

AKINSOOTO, Oluwadayomi; OGUNNOWO, Enoch Oluwadunmininu; EZEANOCHIE, Chukwuemeka Chukwuka. The future of electric vehicles: Technological innovations and market trends. **Engineering and Technology Journal**, v. 10, n. 4, p. 4392-4405, 2025.

AKINSOOTO, Oluwadayomi; OGUNNOWO, Enoch Oluwadunmininu; EZEANOCHIE, Chukwuemeka Chukwuka. The Evolution of Electric Vehicles: A Review of USA and Global Trends. **World Scientific News**, v.202, p.145-159. 2024.

AL-AMAYREH, Malik; ALAMAYREH, Ahmad I.; AMER, Amal A. Impact of EV charging strategies on solar-powered residential buildings: unidirectional vs. bidirectional charging in Jordan. **Discover Sustainability**, v. 6, n. 1, p. 1-16, 2025.

ALMAGHREBI, Ahmad; JAMES, Kevin; AL JUHESHI, Fares; ALAHMAD, Mahmoud. Insights into household electric vehicle charging behavior: analysis and predictive modeling. **Energies**, Basel, v. 17, n. 4, p. 925, 2024.

BARKENBUS, Jack N. Prospects for electric vehicles. **Sustainability**, v. 12, n. 14, p. 5813, 2020.

BRASIL. Ministério de Minas e Energia; Empresa de Pesquisa Energética (EPE). *Plano Nacional de Energia 2050: Relatório Final do PNE 2050*. Brasília: MME / EPE, 2023. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-227/topico-563/Relatorio%20Final%20do%20PNE%202050.pdf>> Acesso em 08 dez. 2025.

BRITO, Tiago Henrique Azevedo et al. Estudo da viabilidade econômica da instalação de energia solar fotovoltaica ligada à rede no IFPB-Campus Princesa Isabel. **Revista Principia**, v. 59, n. 2, p. 581-596, 2022.

Catálogo de soluções para recarga de veículos elétricos – Linha WEMOB. Jaraguá do Sul: WEG, 2025. Disponível em: <https://www.weg.net/>. Acesso em: 26 jan. 2026.

CHOCHOLAC, J.; HRUSKA, R.; MACHALIK, S.; SOMMERAUEROVA, D.; SOHAJEK, P. **Framework for Greenhouse Gas Emissions Calculations in the Context of Road Freight Transport for the Automotive Industry**. Sustainability 2021, 13, 4068.

CIEPLINSKI, André. O potencial de descarbonização do programa MOVER: explorando variações nas vendas de veículos de diferentes tecnologias até 2027. **International Council on Clean Transportation**, 2024.

CINTRA, Rodrigo Sampaio et al. Revisão sistemática da literatura sobre a evolução e tendências dos estudos sobre o ciclo de vida das baterias de veículos elétricos. **Revista de Gestão e Secretariado**, v. 16, n. 2, p. e4637-e4637, 2025.

CRESESB - CENTRO DE REFERÊNCIA PARA AS ENERGIAS SOLAR E EÓLICA
SÉRGIO DE S. BRITO. **Centro de Referência para as Energias Solar e Eólica**
Sérgio de S. Brito. Disponível em: <<http://www.cresesb.cepel.br/>>. Acesso em: 26 ago. 2025.

DEBNATH, Ramit et al. Political, economic, social, technological, legal and environmental dimensions of electric vehicle adoption in the United States: A social-media interaction analysis. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 152, p. 111707, 2021.

FERREIRA, Mariana Araújo Mendes; CARDOSO, Rafael Balbino. Impactos energéticos e ambientais do uso de sistemas solares fotovoltaicos para carregamento de carros elétricos em postos de abastecimento no Brasil. **Research, Society and Development**, v. 9, n. 9, p. e767997749-e767997749, 2020.

GREENV. **Tomada para carregar carro elétrico**. Disponível em: <<https://www.greenv.com.br/blog/tomada-para-carregar-carro-eletrico/>>. Acesso em: 29 out., 2025.

HIRZ, M.; NGUYEN, A. Life Cycle Assessment of Electrified Vehicles in Comparison with Conventional Vehicles: A Case Study. *World Electric Vehicle Journal*, v. 13, n. 61, p. 1–21, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.3390/wevj13040061>>. Acesso em: 01 dez. 2025.

HUO, Da; MECKL, Peter. Power Management of a Plug-in Hybrid Electric Vehicle Using Neural Networks with Comparison to Other Approaches. *Energies*, v. 15, n. 15, p. 5735, 2022.

HUSAIN, Iqbal et al. Electric Drive Technology Trends, Challenges, and Opportunities for Future Electric Vehicles. **Proceedings of the IEEE**, v. 109, n. 6, 2021.

INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (Brasil). **Atlas brasileiro de energia solar**. 2. Ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). **Global EV Outlook 2024**. Paris: IEA, 2024.

KBB BRASIL. **Custo de manutenção e uso médio anual de veículos no Brasil**. São Paulo: Kelley Blue Book Brasil, 2024. Disponível em: <https://www.kbb.com.br>. Acesso em: 13 out. 2025.

LA TECNOLOGIA MILD-HYBRID. **Parte I: introduzione ai sistemi a 12V e 48V**. *GiornaleMotori*, 20 abr. 2020. Disponível em: <<https://www.giornalemotori.com/2020/04/20/la-tecnologia-mild-hybrid-parte-i-introduzione-ai-sistemi-a-12v-e-48v/>>. Acesso em: 09 dez. 2025.

MARTÍNEZ-GÓMEZ, Javier; ESPINOZA, Vicente Sebastian. Challenges and Opportunities for Electric Vehicle Charging Stations in Latin America. **World Electric Vehicle Journal**, v. 15, n. 12, p. 583, 2024.

NREL – National Renewable Energy Laboratory. **PVWatts® Calculator: Estimate the Energy Production and Cost of Energy of Grid-Connected Photovoltaic (PV) Energy Systems throughout the World**. Golden, CO: NREL, 2024. Disponível em: <https://pvwatts.nrel.gov/>. Acesso em: 30 set. 2025.

OLUWALANA, Oluwapelumi John; GRZESIK, Katarzyna. Solar-Powered Electric Vehicles: Comprehensive Review of Technology Advancements, Challenges, and Future Prospects. **Energies**, v. 18, n. 14, p. 3650, 2025.

PORTAL SOLAR. **Matriz energética brasileira e matriz elétrica brasileira**. Disponível em: <https://www.portalsolar.com.br/matriz-energetica-brasileira-matriz-eletrica-brasileira>. Acesso em: 11 set. 2024.

PEREIRA, E. B. et al. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2017. Disponível em: https://labren.ccst.inpe.br/atlas_2017.html. Acesso em: 29 nov. 2025.

PETERS, J. F.; BAUMANN, M.; ZIMMER, S.; BRAUN, J.; WEIL, M. The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 67, p. 491–506, 2017.

RIO CONTROL. **Energia fotovoltaica**. Disponível em: <https://riocontrol.com.br/energia-fotovoltaica/>. Acesso em: 29 out., 2025.

SAMARAKOON, N. G. N. B. et al. A comprehensive review of electric vehicles. **J. Res. Technol. Eng**, v. 5, n. 03, p. 111-142, 2024.

VETTER, J.; NOVÁK, P.; WAGNER, M. R.; VEIT, C.; MÖLLER, K.-C.; et al. Ageing mechanisms in lithium-ion batteries. **Journal of Power Sources**, v. 147, n. 1–2, p. 269–281, 2005.

APÊNDICE A – Cartilha de instruções do simulador fotovoltaico

Este apêndice apresenta de forma objetiva as etapas de uso do simulador fotovoltaico desenvolvido neste Trabalho de Conclusão de Curso. A ferramenta foi estruturada em quatro telas principais: (1) Entrada, (2) Dimensionamento Técnico, (3) Financeiro e (4) *Dashboard*, cada uma responsável por uma parte do processo de cálculo e análise da viabilidade da recarga doméstica de veículos elétricos.

Em todas as etapas, o usuário deve preencher apenas os campos em azul, pois as demais células contêm fórmulas que garantem o funcionamento correto do simulador.

Etapa 1 – Entrada de dados

Esta etapa reúne as informações básicas necessárias para iniciar o cálculo do sistema fotovoltaico. O usuário deve:

1. Selecionar o tipo de rede elétrica da residência (monofásica, bifásica ou trifásica);
2. Inserir os dados do veículo elétrico, incluindo o modelo e a quilometragem rodadas por ano;
3. Selecionar a cidade e verificar a tarifa média de energia local;
4. Inserir o consumo mensal da residência, caso deseje incluir essa variável no dimensionamento;
5. Selecionar os componentes do sistema fotovoltaico, incluindo:
 - Placa solar;
 - Inversor de frequência;
 - Carregador elétrico (*Wallbox*).

Veja abaixo (Figura A1),

Figura A1 – Tela “Entrada de Dados” do simulador fotovoltaico.

INSTITUTO FEDERAL
Minas Gerais
Campus Betim

ENTRADA

DIMENSIONAMENTO

FINANCEIRO

DASHBOARD

DADOS DE ENTRADA | CONSUMO

Instruções: Preencha os dados de consumo do sistema e componetes nos campos em "Azul"

1) Insira a rede da residencia encontrada na conta de energia do Local de Instalação do sistema.



Rede
Monofásica

2) Selecione o Veículo e adicionar a média de KM rodados em 1 ano



Selecione o Veículo	KM rodado em um ano	Capacidade da Bateria [kWh]	Consumo Médio Mensal [kWh]
BYD Dolphin	13000	44,90 kWh	167,15 kWh

3) Insira a Cidade e o Custo Médio do KmH (Informação disponível na fatura de Energia)



Selecione a Cidade	Tarifa (R\$/kWh)	Consumo Médio Mensal [kWh]	Consumo Médio Anual [kWh]
BETIM - MG	R\$ 0,83	0,00 kWh	0 kWh

4) Insira Detalhe o consumo da Residência mensal - Informação disponível na fatura de Energia

INSIRA CONSUMO MENSAL DETALHADO (kWh)

1. ENTRADA 2. Dimensionamento Técnico 3. Financeiro 4. Dashboard

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

As informações não editáveis da tela são calculadas automaticamente pelo simulador.

Etapa 2 – Dimensionamento Técnico

Esta etapa apresenta o cálculo automatizado da potência necessária do sistema fotovoltaico. O usuário deve preencher apenas o campo:

- Perdas do sistema (%) – valor entre 20% e 30%, conforme recomendado pela literatura.

Confira a seguir (Figura A.2),

Figura A2 – Tela “Dimensionamento Técnico”.

INSTITUTO FEDERAL
Minas Gerais
Campus Betim

ENTRADA

DIMENSIONAMENTO

FINANCEIRO

DASHBOARD

DIMENSIONAMENTO TÉCNICO

Instruções: Cálculo Automático. Preencha apenas os dados de perdas no campo em "Azul"

IMÓVEL - DADOS DA UNIDADE CONSUMIDORA		VEÍCULO - DADOS DE CONSUMO MENSAL (kWh)	
Cidade	BETIM - MG	Veículo	BYD Dolphin
Consumo Mensal (KWh)	0 kWh	Consumo Mensal (KWh)	167 kWh

INFORMAÇÃO TÉCNICA (Coordenadas geográficas, inclinação e Perdas)			
Latitude (°)	Longitude (°)	Inclinação Ideal (°)	Perdas (%)
-19,96	-44,19	20	25%

DIMENSIONAMENTO Potência do Sistema Escolhida (kWh)			
Consumo Médio Mensal (kWh)	Consumo Médio Diário (kWh)	Potência do Sistema Calculada (kWp)	Potência do Sistema Escolhida (kWp)
167,15 kWh	5,57 kWh	1,45 kWp	1,52 kWp

DIMENSIONAMENTO Geração Mensal e Irradiação			
Mês	Geração Mensal (kWh)	Irradiação (kWh/m².dia)	Consumo Mensal Imóvel + Veículo (kWh)
JAN	198	5,8	167
FEV	205	6,0	167
MAR	176	5,2	167
ABR	165	4,8	167
MAI	145	4,2	167
JUN	139	4,1	167
JUL	148	4,3	167
AGO	177	5,2	167
SET	189	5,5	167
OUT	192	5,6	167
NOV	181	5,2	167

< >

1. ENTRADA **2. Dimensionamento Técnico** 3. Financeiro 4. Dashboard +

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A tela exibe automaticamente:

- Latitude e longitude da cidade;
- Inclinação ideal;
- Consumo mensal total (residência + veículo);
- Potência calculada do sistema (kWp);
- Geração mensal estimada com base na irradiância local.

Etapa 3 – Financeiro

Nesta etapa, o simulador compara o custo acumulado da recarga convencional com a recarga utilizando o sistema fotovoltaico ao longo de 25 anos. O usuário deve preencher apenas:

- IPCA (%) – índice anual divulgado pelo IBGE. Veja abaixo (Figura A3):

Figura A3 – Tela “Análise Financeira”.

INSTITUTO FEDERAL

Ministério da Educação

Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suck D'Araújo

ENTRADA

DIMENSIONAMENTO

FINANCEIRO

DASHBOARD

VIABILIDADE ECONÔMICA | CONCESSIONÁRIA vs SISTEMA SOLAR FOTOVOLTAICO

Instruções: Cálculo Automático. Atualize apenas parâmetros de IPCA, conforme última referência divulgada pelo IBGE. Campo em "Azul"

Parâmetros Econômicos | Concessionária

Parâmetros Econômicos	Parâmetros	Observação
Consumo anual (kWh/ano)	2.006 kWh	Consumo anual do sistema (Veículo e/ou Imóvel)
Tarifa Convencional - CEMIG (R\$/kWh)	R\$ 0,83	Tarifa média registrada no ano de 2025 (Jan-Out)
Percentual Tarifa FIO B (Compensação de Crédito)	30%	Percentual da tarifa do fio B, conforme estrutura tarifária divulgada pela CEMIG Distribuição S.A
Taxa Anual de Juros para Cálculo de VPL (% a.a.)	6,0%	Taxa de desconto para cálculo de VPL, baseada em referência de artigos acadêmicos
Inflação anual (IPCA 12 meses)	4,68%	Source: IBGE, out/2025

Análise de Viabilidade Econômica Anual | Cenário 1 - Concessionária vs Cenário 2 - Sistema Fotovoltaico

Período	Cenário 1 - Concessionária				Cenário 2 - Sistema Fotovoltaico						
Ano	Tarifa + Reajuste anual acumulado (R\$/kWh)	Custo Anual (R\$)	Custo Acumulado Concessionária (R\$)	Percentual aplicado sobre o Fio B	Tarifa Fio B + Reajuste anual acumulado (R\$/kWh)	Custo anual de FIO B (Sistema Distribuição)	Custo de Manutenção Anual + Ajuste IPCA	Custo Acumulado anual do Sistema Solar	Economia Acumulada (R\$)	Economia Anual (R\$/ano)	
1	0,83	R\$ 1.665	R\$ 1.665	45%	R\$ 0,11	R\$ 224,75		R\$ 9.093,59	-R\$ 7.429	R\$ 1.440	
2	0,869	R\$ 1.743	R\$ 3.408	60%	R\$ 0,16	R\$ 313,70	R\$ 314	R\$ 9.721	-R\$ 6.314	R\$ 1.111	
3	0,910	R\$ 1.824	R\$ 5.232	75%	R\$ 0,20	R\$ 410,47	R\$ 329	R\$ 10.461	-R\$ 5.229	R\$ 1.081	
4	0,952	R\$ 1.910	R\$ 7.142	90%	R\$ 0,26	R\$ 515,62	R\$ 344	R\$ 11.320	-R\$ 4.179	R\$ 1.050	
5	0,997	R\$ 1.999	R\$ 9.141	100%	R\$ 0,30	R\$ 599,72	R\$ 360	R\$ 12.280	-R\$ 3.140	R\$ 1.030	
6	1,043	R\$ 2.093	R\$ 11.233	100%	R\$ 0,31	R\$ 627,79	R\$ 377	R\$ 12.657	-R\$ 1.424	R\$ 1.081	
7	1,092	R\$ 2.191	R\$ 13.424	100%	R\$ 0,33	R\$ 657,17	R\$ 395	R\$ 13.052	R\$ 372	R\$ 1.130	
8	1,143	R\$ 2.293	R\$ 15.717	100%	R\$ 0,34	R\$ 687,93	R\$ 413	R\$ 13.465	R\$ 2.252	R\$ 1.191	
9	1,197	R\$ 2.400	R\$ 18.117	100%	R\$ 0,36	R\$ 720,12	R\$ 433	R\$ 13.898	R\$ 4.220	R\$ 1.241	
10	1,253	R\$ 2.513	R\$ 20.630	100%	R\$ 0,38	R\$ 753,82	R\$ 453	R\$ 17.058	R\$ 5.722	R\$ 1.301	
11	1,311	R\$ 2.630	R\$ 23.261	100%	R\$ 0,39	R\$ 789,10	R\$ 474	R\$ 17.532	R\$ 5.728	R\$ 1.361	
12	1,373	R\$ 2.753	R\$ 26.014	100%	R\$ 0,41	R\$ 826,03	R\$ 496	R\$ 18.028	R\$ 7.985	R\$ 1.431	
13	1,437	R\$ 2.882	R\$ 28.896	100%	R\$ 0,43	R\$ 864,69	R\$ 519	R\$ 18.548	R\$ 10.348	R\$ 1.491	
14	1,504	R\$ 3.017	R\$ 31.913	100%	R\$ 0,45	R\$ 905,16	R\$ 544	R\$ 19.092	R\$ 12.822	R\$ 1.561	
15	1,575	R\$ 3.158	R\$ 35.072	100%	R\$ 0,47	R\$ 947,52	R\$ 569	R\$ 24.427	R\$ 10.645	R\$ 1.641	
16	1,648	R\$ 3.306	R\$ 38.378	100%	R\$ 0,49	R\$ 991,86	R\$ 596	R\$ 25.023	R\$ 13.355	R\$ 1.711	
17	1,735	R\$ 3.463	R\$ 41.841	100%	R\$ 0,51	R\$ 1.039,10	R\$ 624	R\$ 25.646	R\$ 16.102	R\$ 1.791	

1. ENTRADA

2. Dimensionamento Técnico

3. Financeiro

4. Dashboard

+

Parâmetro

Parâmetro

Investidor

Custos Adm

Pedro Elói

Troco de Ir

Troco de C

Manutenção

Fonte: elaborado pelo autor (2025).

A tela apresenta automaticamente:

- Tarifas anuais projetadas da concessionária;
- Custo anual e acumulado dos dois cenários;
- economia acumulada ao longo do período;
- Substituição do inversor e do carregador em ciclos de vida específicos;
- Cálculo do *payback* e fluxo de caixa do sistema.

Etapa 4 – *Dashboard* de Resultados

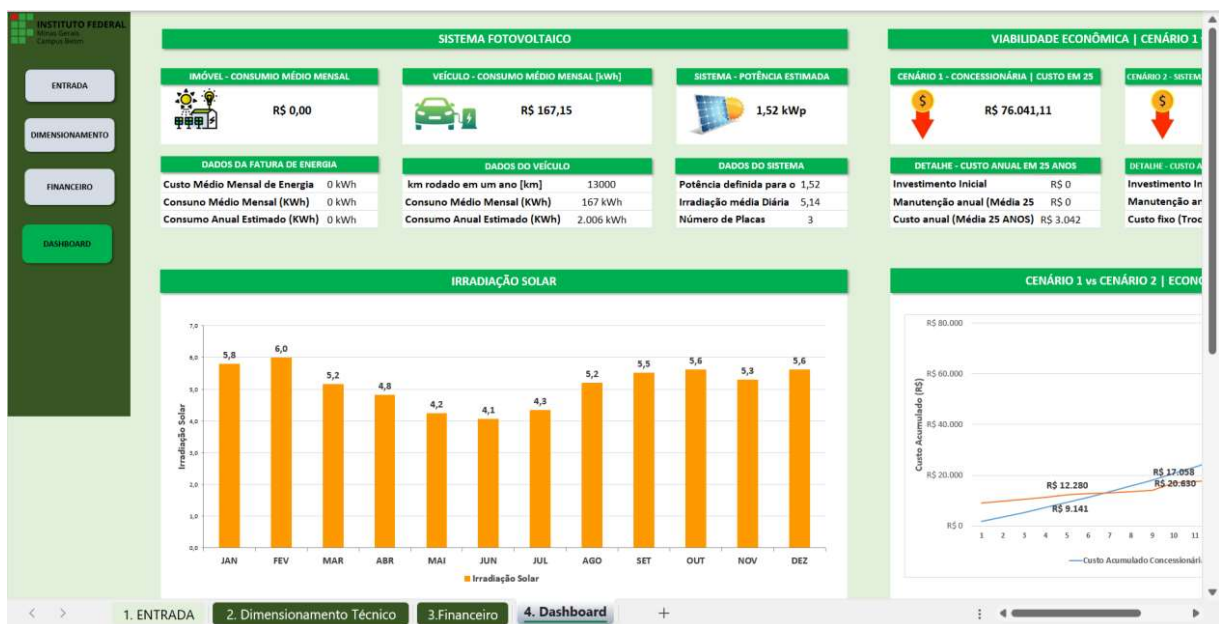
Esta etapa consolida os principais resultados da simulação em formato visual. O usuário não precisa inserir nenhum dado nesta tela. São apresentados:

- Consumo médio do veículo e da residência;
- Potência final dimensionada do sistema;
- Irradiância solar mensal;

- Geração mensal prevista;
- Comparação entre custo acumulado da concessionária e do sistema solar;
- Economia acumulada em 25 anos;
- Retorno do investimento (*payback*).

Veja na figura a seguir (A4),

Figura A4 – Tela “*Dashboard de Resultados*”.



Fonte: elaborado pelo autor (2025).

O *dashboard* permite uma visualização clara e rápida da viabilidade técnica e econômica do sistema.

Etapa final - Considerações finais sobre o uso da ferramenta

A ferramenta foi projetada para permitir o preenchimento simples e intuitivo, exigindo intervenção somente nos campos destacados em cor azul. Os demais elementos contêm fórmulas e rotinas essenciais para o correto funcionamento do simulador e não devem ser alterados.

O uso da planilha destina-se exclusivamente a fins acadêmicos, visando à análise da viabilidade da recarga de veículos elétricos por meio de sistemas fotovoltaicos, conforme metodologia descrita no corpo deste trabalho.