



Universidade Federal de Ouro Preto
Escola de Minas
CECAU - Colegiado do Curso de
Engenharia de Controle e Automação



Lucas Sairon

**Estudo e simulação de um conversor bidirecional na estratégia V2G
para mitigação de picos em demandas residenciais**

Monografia de Graduação

Ouro Preto, 2025

Lucas Sairon

**Estudo e simulação de um conversor bidirecional na
estratégia V2G para mitigação de picos em demandas
residenciais**

Trabalho apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenheiro(a) de Controle e Automação.

Universidade Federal de Ouro Preto

Orientador: Prof. João Carlos Vilela de Castro

Ouro Preto

2025



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
REITORIA
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CONTROLE E
AUTOMACAO



FOLHA DE APROVAÇÃO

Lucas Saioron de Castro Souza

Estudo e Simulação de um Conversor Bidirecional na Estratégia V2G para Mitigação de Picos em Demandas Residenciais

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Engenheiro de Controle e Automação

Aprovada em 04 de abril de 2025

Membros da banca

[M.Sc.] - João Carlos Vilela de Castro - Orientador (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Dr.] - Ronilson Rocha - (Universidade Federal de Ouro Preto)

[Dr.] - Caio Meira Amaral da Luz - (Universidade Federal de Ouro Preto)

João Carlos Vilela de Castro, orientador do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/04/2025



Documento assinado eletronicamente por **Joao Carlos Vilela de Castro, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/04/2025, às 11:49, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **0890379** e o código CRC **C80ED9E7**.

Referência: Caso responda este documento, indicar expressamente o Processo nº 23109.004517/2025-21

SEI nº 0890379

R. Diogo de Vasconcelos, 122, - Bairro Pilar Ouro Preto/MG, CEP 35402-163
Telefone: 3135591533 - www.ufop.br

Resumo

Diante da crescente preocupação com os impactos ambientais causados pela atividade humana e do alto índice de emissão de gases poluentes, o uso de veículos elétricos tem crescido significativamente nos últimos anos. Esses automóveis, por não emitirem gás carbônico, apresentam um grande potencial para a redução da poluição no setor de transportes. No Brasil, a maior parte da matriz energética é composta por fontes renováveis, o que favorece a expansão do transporte elétrico. No entanto, o avanço no consumo traz desafios para a rede de distribuição de energia, especialmente devido ao aumento na demanda durante a recarga dos veículos. Além disso, a geração de energia por meio de painéis solares enfrenta uma limitação natural: a produção ocorre apenas durante o dia, enquanto à noite e nos horários de pico a energia disponível se torna limitada. A solução para esse desequilíbrio está no armazenamento eficiente da energia gerada, permitindo uma utilização mais otimizada dos painéis solares e garantindo uma distribuição mais estável ao longo do tempo. Nesse contexto, este trabalho apresenta um estudo sobre a técnica *Vehicle to Grid* (V2G), na qual veículos elétricos podem atuar como geradores de energia por meio de um conversor bidirecional (buck-boost), ajudando a mitigar impactos nos momentos de pico de demanda. Para avaliar essa abordagem, foi realizada uma simulação no software Matlab/Simulink.

Palavras-chaves: veículo elétrico. vehicle to grid. conversor bidirecional. carregamento controlado.

Abstract

Given the growing concern about the environmental impacts caused by human activity and the high level of pollutant gas emissions, the use of electric vehicles has increased significantly in recent years. These vehicles, since they do not emit carbon dioxide, have great potential for reducing pollution in the transportation sector. In Brazil, most of the energy matrix is composed of renewable sources, which favors the expansion of electric transportation. However, the rise in consumption brings challenges to the power distribution grid, especially due to the increased demand during vehicle charging. Furthermore, energy generation through solar panels faces a natural limitation: production occurs only during the day, while at night and during peak hours, the available energy becomes limited. The solution to this imbalance lies in the efficient storage of the generated energy, allowing for a more optimized use of solar panels and ensuring a more stable distribution over time. In this context, this work presents a study on the Vehicle to Grid (V2G) technique, in which electric vehicles can act as energy generators through a bidirectional (buck-boost) converter, helping to mitigate impacts during peak demand periods. To evaluate this approach, a simulation was carried out using Matlab/Simulink software.

Key-words: electric vehicle. vehicle to grid. bidirectional converter. controlled charging.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Estoque global de carros elétricos, 2013-2023	14
Figura 2 – Estoque global de carros elétricos, 2013-2023	15
Figura 3 – Tipos de carregamento	18
Figura 4 – Esquema Microgrid	20
Figura 5 – Esquema de uma Smart Grid	21
Figura 6 – Arranjo do sistema de carregamento de veículos elétricos	22
Figura 7 – Topologia do sistema analisado	24
Figura 8 – Conversor Buck-Boost	27
Figura 9 – Modelo Simulink	28
Figura 10 – Curva de carga residencial	29
Figura 11 – Modelo da residência	30
Figura 12 – Conversor Buck-Boost	32
Figura 13 – Conversor modo Boost - estágio 1	33
Figura 14 – Conversor modo Boost - estágio 2	33
Figura 15 – Conversor modo Buck - estágio 1	35
Figura 16 – Conversor modo Buck - estágio 2	36
Figura 17 – Modulação por Largura de Pulso (PWM)	38
Figura 18 – Esquema do controlador Matlab/Simulink	39
Figura 19 – Controle através da carga da residência	40
Figura 20 – Estado de carga da bateria (SOC)	40
Figura 21 – Curva de potência da residência	42
Figura 22 – Curva de corrente da residência	43
Figura 23 – Estado de carga da bateria	44
Figura 24 – Corrente na bateria (Preto) Corrente de Controle (Azul)	45
Figura 25 – Tensão na bateria	46
Figura 26 – Corrente no transistor 1	47
Figura 27 – Corrente no transistor 2	47
Figura 28 – Comportamento corrente, Residência (Azul), Rede (Vermelho), Con- versor (Amarelo)	48

Lista de tabelas

Tabela 1 – Modos de carregamento de carro elétrico	18
Tabela 2 – Especificações da bateria do Nissan Leaf (40 kWh)	30
Tabela 3 – Parâmetros adotados para a simulação da bateria	31
Tabela 4 – Parâmetros adotados para a simulação da bateria	33
Tabela 5 – Parâmetros utilizados no dimensionamento do conversor Buck	36

Lista de abreviaturas e siglas

VE	Veículo elétrico
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
V2G	Vehicle to Grid
G2V	Grid to vehicle
V2H	Vehicle to Home
CA	Corrente Alternada
CC	Corrente Contínua
IEA	International Energy Agency
Ah	Ampere-hora
Wh	Watts-hora
IEC	International Electrotechnical Commission
TCU	Tribunal de Contas da União

Sumário

1	INTRODUÇÃO	10
1.1	Objetivos	11
2	REVISÃO DE LITERATURA	12
2.1	Veículo Elétrico	12
2.1.1	História do Veículo Elétrico	12
2.1.2	Tipos de Veículos elétricos	14
2.2	Bateria do Veículo Elétrico	15
2.3	Tipos de carregamento veículo elétrico	16
2.4	Microredes	18
2.5	Smart Grids	20
2.6	Integração de Veículos Elétricos à Rede Elétrica	22
2.6.1	<i>Grid to Vehicle (G2V)</i>	22
2.6.2	<i>Vehicle to Grid</i>	23
2.6.3	<i>Vehicle to Home (V2H)</i>	23
2.7	Sistema de Recarga de Veículos Elétricos	24
2.8	Conversor Bidirecional <i>Buck-Boost</i>	25
2.8.1	Funcionamento do modo <i>Buck</i>	25
2.8.2	Funcionamento do modo <i>Boost</i>	25
2.8.3	Funcionamento do modo <i>Buck-boost</i>	26
3	DESENVOLVIMENTO	28
3.1	Residência	29
3.2	Modelo da Bateria	30
3.3	Conversor Bidirecional	31
3.3.1	Modo Boost	32
3.3.2	Modo Buck	35
3.4	Controle de carga e descarga	37
3.4.1	Controle <i>Vehicle to Grid (V2G)</i>	37
3.4.2	Controle através da Carga da residência	39
3.4.3	Controle do Estado de Carga	40
4	RESULTADOS	41
4.1	Residência	41
4.2	Bateria	43
4.3	Conversor	46

4.4	Comportamento da Corrente e Interação com a Rede	47
5	CONCLUSÃO	50
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS	51
	Referências	52

1 Introdução

No contexto da crescente demanda energética, associado aos altos impactos ambientais causados pelo ser humano, o setor de transportes é responsável por uma parcela significativa de emissão de CO₂, cerca de 24% das emissões globais em 2016 (WANG; GE, 2019). Sendo assim, carros elétricos se tornam pauta cada vez mais frequentes, por serem mais eficientes energeticamente, e possuir grande potencial de reduzir as emissões de gás carbonico no setor de transporte (ARAÚJO; SANTOS, 2022).

Cresce a cada ano as vendas e investimento das montadoras nesse setor. Em 2018 carros elétricos foram a pauta principal do salão do Automóvel. Investimento atrativo, favorecido pela produção energética brasileira 84,25% da matriz energética é composta por fontes renováveis (ANEEL, 2024).

Com o aumento da demanda por energia na rede, novas tecnologias surgem como alternativas para garantir qualidade e segurança. Fontes não convencionais de energia, utilizadas na geração distribuída, tornam-se cada vez mais competitivas, além de oferecerem vantagens de outras naturezas (FALCAO, 2009). Além disso, o Brasil possui um dos maiores sistemas interligados do mundo para produção e transmissão de energia (VIEIRA, 2019).

Considerando fontes de energia alternativa como geração distribuída, o conceito *Vehicle to Grid* (V2G) surge como uma alternativa promissora para o fornecimento de energia à rede elétrica (TOYOSHIMA, 2020). Em um cenário habitual, os veículos são utilizados para transporte durante um intervalo de tempo reduzido, permanecendo estacionados por longos períodos em locais específicos, como garagens e estacionamentos. Nesses momentos, a energia armazenada nas baterias dos veículos elétricos pode ser aproveitada para outros usos sem comprometer sua função principal, que é o transporte (GONÇALVES, 2015a).

A autonomia média de um carro elétrico varia entre 100 e 500 quilômetros com uma única recarga, dependendo do modelo e das condições de uso (EDP, 2023). Por outro lado, pesquisas indicam que a distância média percorrida por trabalhadores brasileiros no trajeto casa-trabalho é de aproximadamente 16 quilômetros por trecho, totalizando cerca de 32 quilômetros diários (TERRA, 2023). Esse contraste evidencia que, mesmo considerando os modelos de veículos elétricos com menor autonomia, a capacidade das baterias é significativamente superior às necessidades diárias da maioria dos usuários. Dessa forma, a energia excedente poderia ser utilizada na rede elétrica por meio da tecnologia V2G, contribuindo para a estabilidade e eficiência do sistema energético.

O aumento da demanda energética, impulsionado pelo crescente número de veículos elétricos em circulação, levanta preocupações sobre a sobrecarga da rede elétrica,

especialmente nos horários de pico, entre 18 e 20 horas (BRASIL, 2024). Esse cenário pode resultar em impactos negativos, como oscilações de tensão e sobrecarga dos sistemas de distribuição. No entanto, o uso de um conversor bidirecional possibilita um gerenciamento mais eficiente do fluxo de energia, permitindo tanto o carregamento da bateria do veículo a partir da rede (*Grid to Vehicle* – G2V) quanto a devolução de energia para o sistema elétrico, fazendo com que o veículo atue como um gerador (*Vehicle to Grid* – V2G) (KASHIMA, 2018).

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo apresentar uma alternativa para mitigar a alta demanda nos horários de pico, contribuir para a estabilidade da rede elétrica e suprir energia em casos de falha no abastecimento local. Para isso, é proposta uma estratégia de controle de carga e descarga das baterias dos veículos elétricos, explorando seu potencial como fonte de energia distribuída. A análise é realizada por meio de uma simulação no software Matlab/Simulink, com foco no comportamento do link CC do sistema, sendo que o inversor CA não faz parte do escopo deste estudo.

1.1 Objetivos

Geral

Este trabalho tem como objetivo analisar as técnicas de controle de carregamento de veículos elétricos utilizando a tecnologia *Vehicle to Grid* (V2G), com foco na mitigação dos impactos causados na rede de distribuição elétrica durante os horários de pico, que apresentam desafios relacionados à estabilidade do sistema, variações de tensão e sobrecarga da infraestrutura.

Específicos

- Realizar um levantamento bibliográfico sobre as principais estratégias de controle de carregamento de veículos elétricos, destacando suas vantagens e desafios;
- Propor uma simulação computacional utilizando o software *Matlab*, aplicando uma estratégia de controle baseada no consumo residencial;
- Analisar o potencial de fornecimento de energia da bateria do veículo elétrico para a residência em momentos de alto consumo, otimizando o uso da energia armazenada.

2 Revisão de literatura

Este capítulo aborda os principais aspectos relacionados ao tema *Vehicle to Grid* (V2G), apresentando uma revisão bibliográfica para conceituar os pontos fundamentais que embasam este estudo.

2.1 Veículo Elétrico

2.1.1 História do Veículo Elétrico

A história do carro elétrico remonta ao início do século XIX, marcada por diversas inovações tecnológicas que impulsionaram seu desenvolvimento. Em 1828, o húngaro Ányos Jedlik criou um dos primeiros motores elétricos funcionais, aplicando-o a um pequeno protótipo de veículo (OLIVEIRA, 2012). Posteriormente, em 1835, o ferreiro norte-americano Thomas Davenport construiu um veículo elétrico que operava em uma pista circular eletrificada, semelhante a um autorama (IBERDROLA, 2025).

Em 1859, o físico francês Gaston Planté inventou a primeira bateria de chumbo-ácido recarregável, tecnologia que viria a ser aprimorada em 1881 por Camille Alphonse Faure, permitindo a produção em escala industrial e contribuindo para a viabilidade dos veículos elétricos (LUIZ FERNANDO LOUREIRO LEGEY, 2011). Além disso, inovações como a frenagem regenerativa, que recupera a energia cinética durante a desaceleração, e o desenvolvimento de sistemas híbridos, combinando motores a gasolina e elétricos, desempenharam papéis significativos na evolução dos veículos elétricos e híbridos (BARAN; LEGEY, 2010).

No início do século XX, os carros elétricos desfrutaram de grande sucesso (GUARNIERI, 2012). De acordo com Karl Georg Høyer, em 1903, o mercado automobilístico de Nova York era dividido entre carros a vapor (53%), carros a gasolina (27%) e carros elétricos (20%) (HØYER, 2008).

Cada tipo de veículo apresentava vantagens e limitações. Os carros elétricos eram silenciosos, fáceis de operar e considerados confiáveis, porém tinham custo elevado, velocidade limitada e autonomia reduzida, variando entre 30 e 60 km. No entanto, com a expansão das estradas pavimentadas e a descoberta de grandes reservas de petróleo, os veículos a gasolina se tornaram mais competitivos e acessíveis (GUARNIERI, 2012). Além disso, a introdução da linha de montagem por Henry Ford reduziu significativamente o custo dos automóveis movidos a combustão, impulsionando ainda mais sua popularização. Como resultado, a partir da década de 1920, os carros elétricos foram gradualmente substituídos pelos veículos a gasolina (HØYER, 2008).

A partir de meados do século XX até os dias atuais, a preocupação com a redução dos impactos ambientais tem ganhado cada vez mais destaque. Em 1972, o Clube de Roma publicou o livro *Limites para o Crescimento*, ressaltando a necessidade de impor restrições à exploração de recursos naturais não renováveis. Nesse contexto, o elevado número de veículos movidos a combustão tornou o setor de transportes um dos principais responsáveis pela emissão de poluentes na atmosfera (SCHVARTZ et al., 2024).

Como alternativa para competir com os veículos a combustão interna, as montadoras voltaram sua atenção para a produção de veículos elétricos na década de 1990, lançando modelos como o GM EV1, o Honda EV Plus e o Toyota RAV4 EV. Entretanto, esses automóveis não obtiveram grande aceitação devido a limitações na autonomia e ao alto custo (GONÇALVES, 2015b). Entre 1999 e 2000, a Toyota lançou o Prius, um carro híbrido que continua sendo comercializado até os dias atuais. Em 2004, a Tesla Motors iniciou o desenvolvimento do Roadster, lançado em 2008, seguido pelo Model S em 2012. Outras fabricantes, como Mitsubishi, Peugeot, Citroën e Nissan, também investiram em veículos elétricos, lançando modelos como o i-MiEV, iOn, C-Zero e Leaf.

Atualmente, as vendas de carros elétricos aumentaram cerca de 25% no primeiro trimestre de 2024 em relação ao mesmo período de 2023 (IEA, 2024). O gráfico da Figura 1, ilustra o crescimento da participação de mercado dos veículos elétricos ao redor do mundo (IEA, 2024).

Com base nas políticas atuais de energia, clima e indústria, estima-se que os veículos elétricos representarão 50% das vendas globais de automóveis até 2030 (ASSOCIATED PRESS, 2024). Além disso, países como China, Estados Unidos e membros da União Europeia vêm observando um crescimento exponencial na adoção desses veículos nos últimos anos (IEA, 2024).

A IEA também projeta que a expansão do uso de veículos elétricos de todos os tipos poderá reduzir a demanda por petróleo em até 6 milhões de barris por dia até 2030 (IEA, 2024). Esse avanço reforça a importância de políticas públicas e incentivos para viabilizar a transição energética e consolidar o papel dos veículos elétricos na matriz de transporte global.

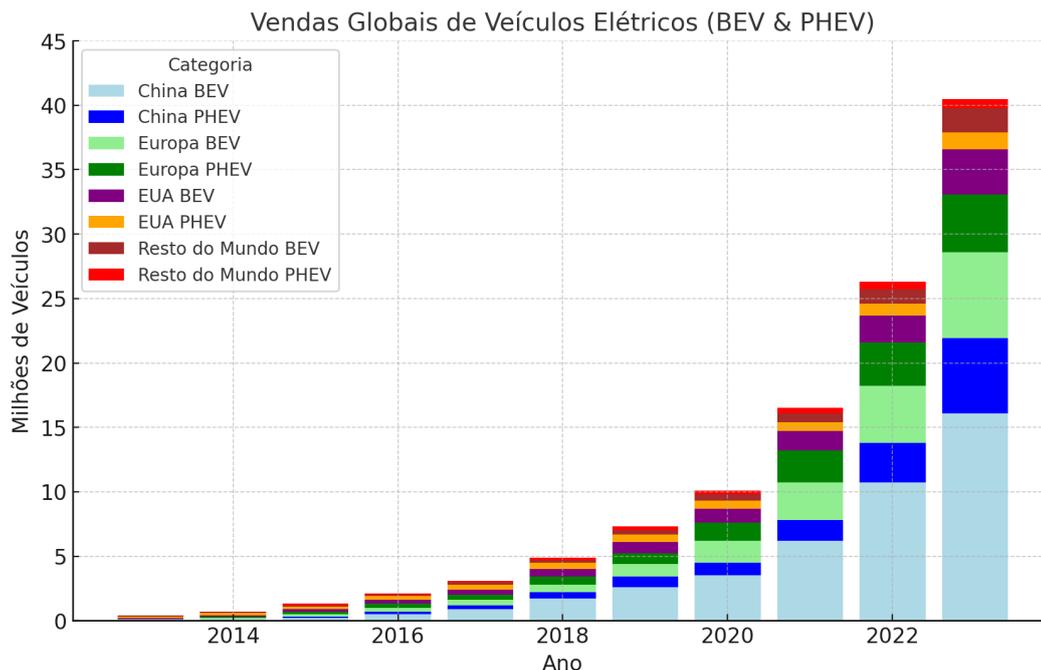


Figura 1 – Estoque global de carros elétricos, 2013-2023

Fonte: Adaptado de (IEA, 2024)

2.1.2 Tipos de Veículos elétricos

Os veículos elétricos (VE) são propulsionados total ou parcialmente por um ou mais motores elétricos, sendo reconhecidos por sua alta eficiência energética e baixo impacto ambiental. Esses veículos emitem poucos ou nenhum poluente atmosférico ou sonoro durante o uso e possuem uma eficiência que pode chegar a 80%, tornando-os significativamente mais eficazes em comparação com veículos de combustão interna, cuja eficiência varia entre 12% e 18% (DEPARTMENT..., s.d.). A Figura 2 ilustra as diferenças técnicas entre os diferentes tipos de veículos elétricos.

Os VEs podem ser classificados em quatro categorias principais (ENERGIA, 2017). O primeiro tipo é o veículo elétrico a bateria (BEV), que utiliza exclusivamente eletricidade proveniente de fontes externas como principal fonte de energia. A bateria interna armazena a eletricidade e a fornece diretamente ao motor elétrico para a propulsão.

Os veículos híbridos (HEV) são divididos em dois tipos: híbridos em série e híbridos em paralelo. No híbrido em série, a propulsão é feita apenas pelo motor elétrico, enquanto o motor a combustão atua como um gerador de energia para recarregar a bateria. Já no híbrido em paralelo, ambos os motores são utilizados simultaneamente para tração, otimizando a eficiência do sistema.

Outra categoria é o híbrido puro (HEV), no qual a propulsão principal é realizada pelo motor a combustão, mas com assistência do motor elétrico para fornecer tração

em baixa potência. Além disso, a tecnologia de frenagem regenerativa recupera energia durante a desaceleração e a converte para alimentar o motor elétrico (ENGENHARIA AUTOMOTIVA, 2025).

O híbrido *plug-in* (PHEV) também utiliza o motor a combustão como principal fonte de tração, mas tem a vantagem de poder ser recarregado por fontes externas de eletricidade, aumentando sua autonomia elétrica. Por fim, há o híbrido de longo alcance, que opera principalmente com um motor elétrico, recarregado tanto por uma fonte externa quanto pelo motor a combustão, que atua como um gerador para carregar a bateria.

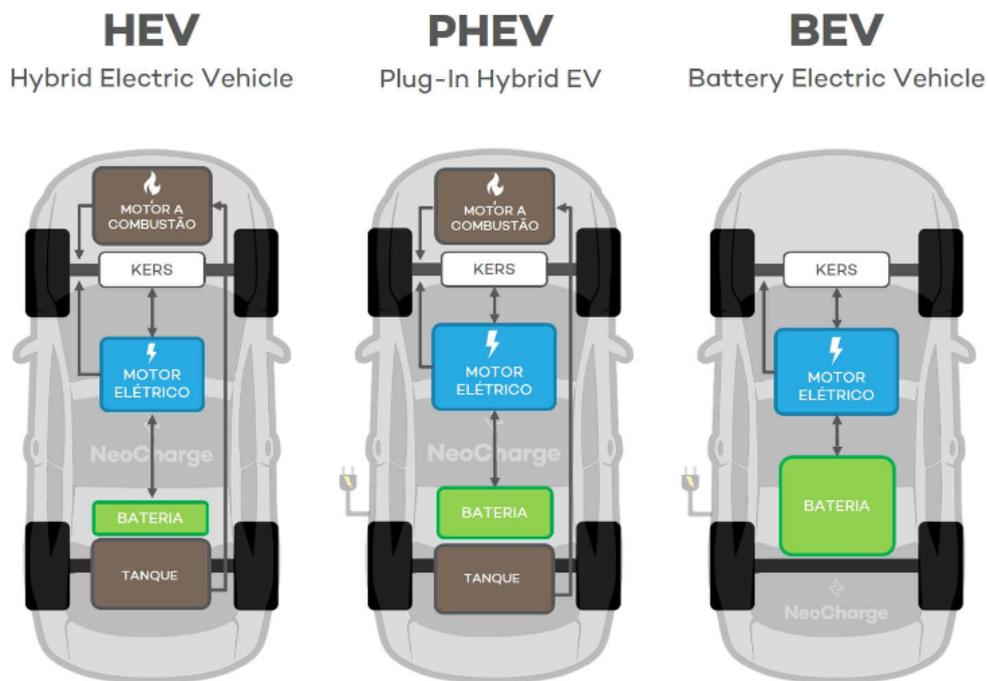


Figura 2 – Estoque global de carros elétricos, 2013-2023

Fonte: (NEOCHARGE, 2024)

2.2 Bateria do Veículo Elétrico

A fonte de energia utilizada para a propulsão de um carro elétrico é proveniente de uma bateria, que atua como um acumulador, convertendo energia química em energia elétrica e vice-versa (BERNARDO HAUCH, 2013). Durante esse processo, a energia química é armazenada nos eletrodos e, por meio de reações de oxidação e redução, é transformada em eletricidade. No ciclo reverso, a energia elétrica permite a restauração dos materiais químicos à sua condição original (MAGALHÃES, 2020).

Graças à sua capacidade de carga e descarga eficiente, as baterias dos veículos elétricos podem ser integradas à rede elétrica por meio da tecnologia *Vehicle to Grid*

(V2G), permitindo que os veículos forneçam energia à rede quando não estão em uso (KASHIMA, 2018).

Entre as principais baterias recarregáveis utilizadas em veículos elétricos, destacam-se as de íon-lítio, íon-lítio polímero, sódio-níquel-cloreto, níquel-hidreto metálico, níquel-cádmio e chumbo-ácido (MANZETTI; MARIASIU, 2015). Essas tecnologias diferem entre si em aspectos como ciclo de vida, custo, impacto ambiental, densidade energética e eficiência.

Atualmente, as baterias de íon-lítio são as mais utilizadas em veículos elétricos devido às suas vantagens, como alta densidade energética e de potência, longo ciclo de vida e ausência do efeito memória, garantindo que sua eficiência e autonomia não sejam prejudicadas por ciclos de carga incompletos (ZHANG et al., 2018).

Dentre os parâmetros inerentes às baterias, destacam-se: a tensão da célula e da bateria, capacidade de carga, capacidade da bateria, eficiência energética, taxas de auto-descarga, temperatura e ciclo de vida.

A tensão da célula, medida em volts (V), indica a diferença de potencial elétrico e está relacionada à capacidade de fornecimento de energia. A capacidade de carga, geralmente expressa em ampère-hora (Ah), representa a quantidade de carga elétrica que a bateria pode fornecer. Já a capacidade energética da bateria, medida em watt-hora (Wh), corresponde à quantidade total de energia disponível para uso, resultante do produto entre a tensão e a capacidade de carga.

A eficiência energética é calculada como a proporção entre a energia elétrica fornecida por uma bateria e a quantidade de energia necessária para restaurá-la ao seu estado original antes da descarga. A taxa de autodescarga ocorre em diversas baterias e se caracteriza pela perda gradual de carga mesmo quando não estão sendo utilizadas (JAMES LARMINIE, 2012).

A maioria das baterias opera em temperatura ambiente, apresentando redução no desempenho em ambientes de baixa temperatura. Por fim, o ciclo de vida reflete o tempo de uso de uma bateria, indicando o número de ciclos de carga e descarga antes de sofrer degradação significativa (JAMES LARMINIE, 2012).

2.3 Tipos de carregamento veículo elétrico

As formas de carregamento dos veículos elétricos podem ser caracterizadas por quatro fatores principais: localização do carregador (*on-board* ou *off-board*), nível de carregamento (modos 1, 2, 3 ou 4), tipo de alimentação elétrica (monofásica, trifásica ou corrente contínua) e direção do fluxo de potência (unidirecional ou bidirecional) (JAIN et al., 2023).

- Carregador *on-board*: o sistema de carregamento está embutido no próprio veículo, utilizando uma conexão à rede elétrica comum. Esse tipo é limitado pela capacidade do conversor de potência interno do veículo, que geralmente possui baixa potência, resultando em tempos de carregamento mais longos;
- Carregador *off-board*: o carregador está localizado externamente ao veículo, permitindo maior capacidade de fornecimento de energia e reduzindo significativamente o tempo de carregamento;

A norma internacional IEC 61851 classifica quatro diferentes modos de carregamento, que pode ser observado na Figura 3:

- Modo 1: O mais lento, realizado a partir de uma tomada convencional sem qualquer sistema de controle de comunicação. Isso pode comprometer a qualidade do carregamento e sobrecarregar a rede elétrica, especialmente em horários de pico, devido à falta de gerenciamento da demanda. Esse modo utiliza alimentação monofásica e apresenta fluxo de potência unidirecional, com potência variando entre 1,5 kW e 3 kW (110-220V);
- Modo 2: Semelhante ao modo 1, também utiliza uma tomada convencional, mas incorpora um canal de controle no cabo de carregamento, permitindo comunicação entre a rede elétrica e o veículo para garantir maior segurança e estabilidade do fornecimento de energia. Assim como o modo 1, opera com alimentação monofásica, fluxo de potência unidirecional e potência entre 1,5 kW e 3 kW;
- Modo 3: Também conhecido como *WallBox*, esse modo é mais sofisticado, pois conta com um sistema de controle avançado que permite a integração com redes inteligentes. O carregador pode identificar o veículo e otimizar o processo de carregamento a partir de dados recebidos de uma central de controle. Ele pode operar tanto em alimentação monofásica quanto trifásica, com fluxo de potência unidirecional e potência de até 43,5 kW;
- Modo 4: Utiliza corrente contínua (DC) e permite carregamento ultrarrápido. O conversor de potência está localizado off-board, reduzindo as limitações da infraestrutura interna do veículo. Além disso, esse modo pode permitir fluxo de potência bidirecional, possibilitando a integração do veículo com a rede elétrica (*Vehicle-to-Grid* - V2G);

Tabela 1 – Modos de carregamento de carro elétrico

Modo	Potência (KW)	Controle de Carregamento	Localização	Tempo para carregar 160 km
Modo 1 (Nível 1)	1 a 3	Não	Casa	>10 h
Modo 2 (Nível 2)	1 a 7	Sim	Casa, Trabalho	2 - 12 h
Modo 3 (Nível 2)	até 43,5	Sim	Trabalho, Público	0,5 - 1,5 h
Modo 4 (Nível 3)	50 a 150	Sim	Estação de Recarga	<15 min

Fonte: Adaptado de (HARDMAN et al., 2018).

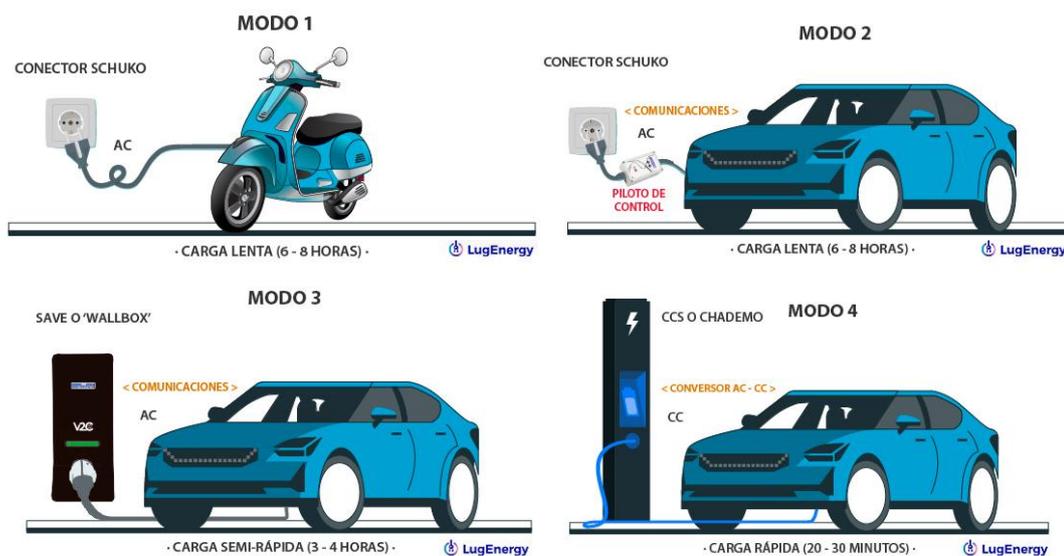


Figura 3 – Tipos de carregamento

Fonte: (LUGENERGY, s.d.)

2.4 Microredes

Segundo o Tribunal de Contas da União (TCU), nos últimos 20 anos, o valor médio da tarifa de energia elétrica no Brasil aumentou 351,1%. Esse expressivo crescimento tem levado os consumidores a buscarem maior controle sobre o seu fornecimento de energia, e as microredes surgem como uma alternativa estratégica para esse objetivo (EDITORIAL, 2021).

A micro e a minigeração de energia desempenham um papel fundamental na expansão da matriz energética brasileira. A capacidade instalada desse segmento passou de 6 MW em 2014 para 4,77 GW em 2021, demonstrando um avanço significativo no setor (EPE, 2024).

As microredes são sistemas integrados que utilizam recursos de energia distribuída e atuam como uma ferramenta avançada de controle da rede elétrica, podendo operar tanto em paralelo com a rede de distribuição convencional quanto de forma isolada (ZHOU; NGAI-MAN HO, 2016).

Essa tecnologia possibilita a incorporação de fontes renováveis de energia, garantindo maior flexibilidade no gerenciamento da geração e do consumo. Além disso, as microredes oferecem um controle mais eficiente sobre a demanda e o fornecimento de energia, permitindo ajustes dinâmicos conforme a necessidade dos consumidores (LI et al., 2015).

Os ajustes dinâmicos das microredes referem-se à sua capacidade de responder rapidamente a variações na oferta e demanda de energia. Isso é possível por meio de algoritmos inteligentes e sistemas automatizados que monitoram em tempo real o fluxo de potência, identificando desequilíbrios e redistribuindo a energia de maneira otimizada (AUTORES, 2023). Por exemplo, em momentos de alta demanda, a microrede pode priorizar o uso de fontes renováveis ou recorrer ao armazenamento de energia para aliviar a carga sobre a rede principal (SILVA; PEREIRA, 2022). Da mesma forma, quando há excesso de geração, como em dias ensolarados para sistemas fotovoltaicos, a microrede pode armazenar o excedente em baterias ou até injetá-lo de volta na rede elétrica.

Além disso, esses ajustes permitem que a microrede reconfigure sua operação em situações de emergência, como em casos de quedas na rede principal. Nesses cenários, o sistema pode automaticamente isolar a microrede (modo ilha), garantindo o fornecimento contínuo de energia para consumidores críticos, como hospitais e indústrias essenciais. Dessa forma, as microredes não apenas otimizam o consumo energético, mas também fortalecem a resiliência do sistema elétrico como um todo (LI et al., 2015).

Os atuais sistemas de distribuição de energia possuem múltiplos caminhos de fluxo de potência, e a crescente conexão de geradores descentralizados pode gerar perturbações na qualidade da energia fornecida (RIBEIRO; FERREIRA; MEDEIROS, 2005). Nesse contexto, as microredes desempenham um papel essencial ao gerenciar e controlar a integração de geradores de pequeno e médio porte, garantindo um funcionamento mais estável e eficiente do sistema elétrico (FALCAO, 2009)

As microredes podem ser configuradas com diferentes características elétricas e arquitetônicas, podendo operar em corrente alternada (CA), corrente contínua (CC) ou em uma configuração híbrida que combina ambas as formas de energia (AHMED et al., 2020). Além disso, possuem um sistema hierárquico de controle dividido em três níveis (BEVRANI, 2017).

- Controle primário: mantém a estabilidade de tensão e frequência, equilibrando a potência ativa e reativa e evitando a circulação indesejada de correntes;
- Controle secundário: corrige desvios de frequência e tensão para seus valores nominais;
- Controle terciário: gerencia o fluxo de potência entre a microrede e o sistema de

distribuição, otimizando a operação econômica;

A matriz energética de uma microrede é chamada de microfonte, sendo geralmente composta por fontes alternativas e renováveis, como energia fotovoltaica, eólica, células a combustível e micro-hidrelétricas (IQBAL et al., 2018). A estrutura de uma microrede em corrente contínua é formada por elementos essenciais, incluindo geração distribuída, conversores estáticos, controladores, cargas, dispositivos de armazenamento de energia e pontos de acoplamento comum (ORTMANN et al., 2015).

A Figura 4 ilustra um modelo de microrede, destacando sua interconexão com a rede principal e a gestão de diferentes fontes de energia. O Sistema de Gerenciamento de Energia (EMS) coordena o funcionamento da microrede, regulando o fluxo de energia entre geradores renováveis, como módulos fotovoltaicos (FV) e turbinas eólicas, e dispositivos de armazenamento de energia, como sistemas de baterias (BESS). Além disso, a figura destaca a integração com veículos elétricos, que podem atuar como fontes de armazenamento ou injetar energia na rede, fortalecendo a estabilidade do sistema.

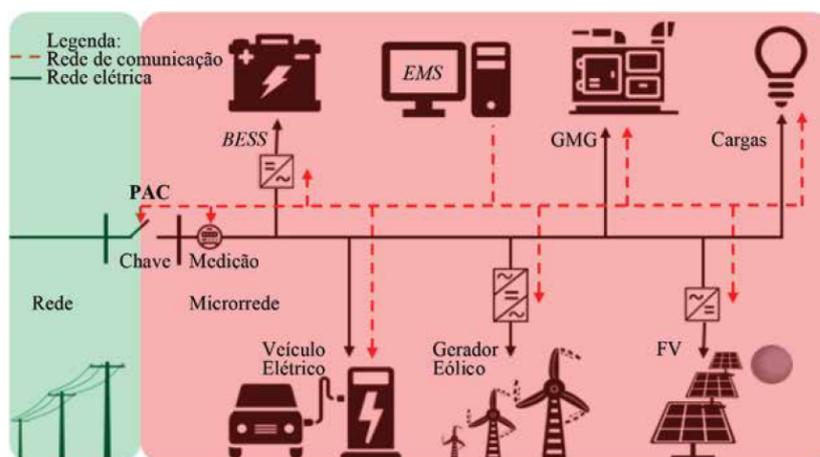


Figura 4 – Esquema Microgrid

Fonte: (EDITORIAL, 2021)

2.5 Smart Grids

O avanço tecnológico e a expansão da microgeração têm transformado significativamente o sistema elétrico, tornando-o mais inteligente e eficiente. O conceito de *Smart Grid*, ou rede elétrica inteligente, envolve a integração de tecnologias digitais e de comunicação ao sistema de distribuição de energia, permitindo a coleta e análise de dados essenciais para otimizar sua operação e controle (VICENTIM, 2015).

Essa tecnologia possibilita uma interação bidirecional entre os usuários e a rede elétrica, permitindo que consumidores não apenas utilizem energia, mas também a pro-

duzam e compartilhem com a rede, promovendo um fluxo de energia mais dinâmico e eficiente. Ferramentas como a internet, tecnologias da informação e comunicação, sistemas de controle e softwares especializados são componentes fundamentais das redes elétricas inteligentes, contribuindo para a eficiência e sustentabilidade do sistema elétrico (IBERDROLA, 2024).

A introdução de equipamentos de controle automatizados e sensores à rede tem como objetivo uma série de funções, como a auto-recuperação, que permite ao sistema detectar e antecipar falhas. Além disso, possibilita uma maior participação do usuário por meio do uso de aplicativos e monitoramento remoto. As *Smart Grids* também trazem avanços significativos no tema da segurança, tanto física quanto cibernética. Outra funcionalidade importante é a capacidade de administrar diferentes formas de armazenagem e geração de energia, promovendo um maior envolvimento no mercado (GRID, 2024).

Dentro dessa perspectiva, a introdução de veículos elétricos às redes inteligentes proporciona benefícios significativos, pois facilita a programação dos horários de recarga e possibilita que os veículos forneçam serviços auxiliares à rede, como no conceito *Vehicle to Grid* (V2G), que será detalhado mais adiante.

A Figura 5 ilustra a estrutura de uma Smart Grid, destacando sua interconexão com diversos elementos do sistema elétrico, como usinas de diferentes matrizes energéticas, cidades, prédios, fábricas, residências inteligentes e veículos elétricos. Essa configuração evidencia a flexibilidade das redes inteligentes, permitindo um fluxo bidirecional de energia e informações para maior eficiência e segurança.

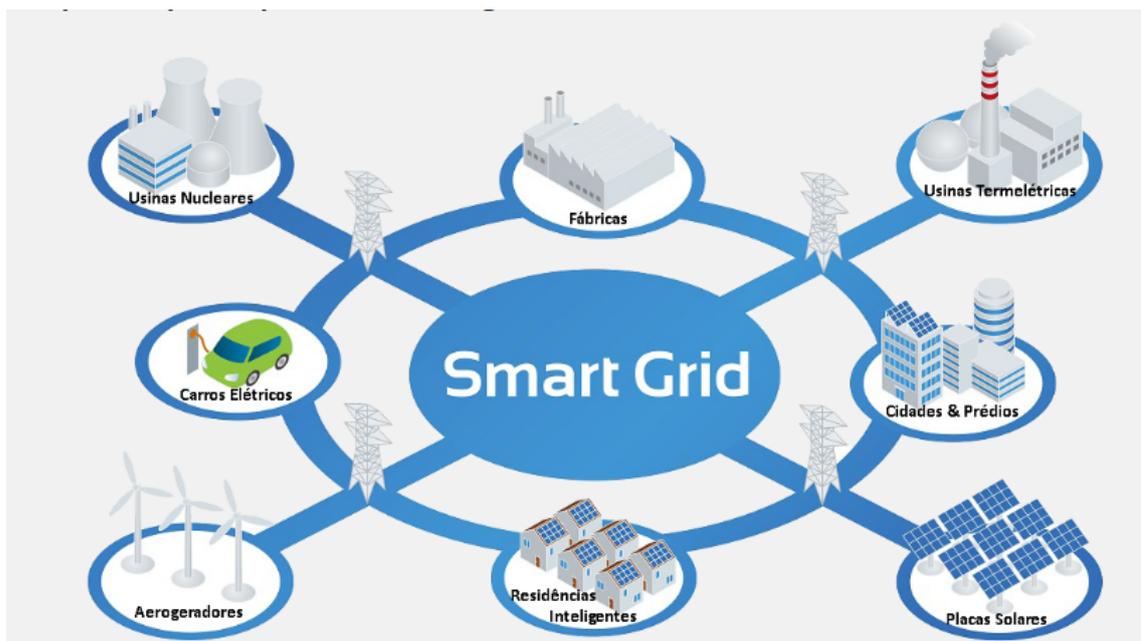


Figura 5 – Esquema de uma Smart Grid

Fonte: (UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2024)

2.6 Integração de Veículos Elétricos à Rede Elétrica

Com o aumento do uso de veículos elétricos no Brasil, as redes elétricas estão sujeitas a lidar com variações nas condições de operação, o que pode resultar em um aumento significativo da demanda de potência nos horários de pico (SILVA, 2012). Esse crescimento acentuado da carga, quando associado a um carregamento não controlado, ou seja, quando os veículos elétricos são conectados à rede sem qualquer gestão ou programação, geralmente em períodos de alta demanda pode comprometer a qualidade da energia e a estabilidade da rede elétrica (MONTEIRO; PINTO; AFONSO, 2016).

Diante da necessidade de um carregamento controlado, torna-se fundamental adotar estratégias que minimizem os impactos do aumento da demanda elétrica causado pelo crescimento da frota de veículos elétricos. O carregamento controlado se refere à gestão inteligente do fornecimento de energia, estabelecendo horários estratégicos para o carregamento dos veículos, de forma programada e distribuída, evitando sobrecargas na rede elétrica e otimizando o uso de fontes renováveis.

Para isso, é essencial revisar os diferentes tipos de interações entre o veículo e a rede elétrica, buscando soluções que promovam um equilíbrio eficiente no fornecimento de energia. Conforme ilustrado na Figura 6, essas interações podem ser classificadas em três principais categorias: *Grid to Vehicle* (G2V), que representa o carregamento tradicional no qual a energia flui da rede para o veículo; *Vehicle to Grid* (V2G), onde o veículo elétrico também atua como um fornecedor de energia, podendo injetar eletricidade de volta para a rede em momentos estratégicos; e *Vehicle to Home* (V2H), que permite ao veículo alimentar uma residência ou outro tipo de carga local, proporcionando maior autonomia energética e reduzindo a dependência da rede elétrica em horários de pico.

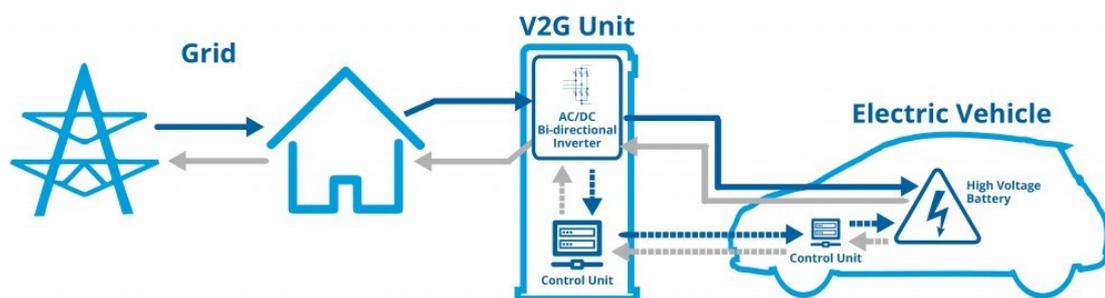


Figura 6 – Arranjo do sistema de carregamento de veículos elétricos

Fonte: (CLEANTECH, 2024)

2.6.1 *Grid to Vehicle* (G2V)

O *Grid to Vehicle* (G2V) é caracterizado pelo fluxo unidirecional de energia, no qual a eletricidade parte da rede elétrica e é transferida para o veículo, mais especificamente

para sua bateria. Esse processo ocorre através de estações de carregamento conectadas à infraestrutura de distribuição de energia, permitindo que o veículo reabasteça sua carga elétrica para uso posterior.

Conforme ilustrado na Figura 6, o fluxo de potência, indicado pela seta azul, inicia-se na parte esquerda, onde está a Rede Elétrica, e segue até o lado direito, onde se encontra o veículo elétrico. Esse tipo de carregamento pode ocorrer em diferentes níveis de potência, dependendo do modo de carregamento utilizado (Modo 1, 2, 3 ou 4).

2.6.2 *Vehicle to Grid*

O *Vehicle to Grid* (V2G) é caracterizado pelo fluxo bidirecional de energia, permitindo que os veículos elétricos não apenas consumam eletricidade da rede, mas também a devolvam quando necessário. Essa tecnologia possibilita que as baterias dos veículos atuem como unidades móveis de armazenamento de energia, auxiliando a rede elétrica em momentos de pico de demanda.

Atualmente, a autonomia média das baterias dos veículos elétricos varia entre 100 e 500 quilômetros (GREENV, 2024). Além disso, estudos indicam que entre 93% e 96% do tempo de vida útil, os automóveis elétricos permanecem estacionados (LOPES; SOARES; ALMEIDA, 2011). Isso significa que, na maior parte do tempo, suas baterias possuem energia armazenada que poderia ser utilizada estrategicamente pela rede elétrica.

Essa capacidade de armazenamento permite que, durante momentos de alta demanda, os veículos elétricos forneçam energia à rede, contribuindo para aliviar a sobrecarga do sistema elétrico. Além dos benefícios para a rede, o V2G também proporciona vantagens financeiras para o consumidor final, que pode vender energia armazenada de volta ao sistema, otimizando seus custos com eletricidade (FERNANDES, 2017).

Conforme ilustrado na Figura 6, a seta cinza representa o fluxo de energia do veículo para a rede, evidenciando o uso das baterias como suporte à demanda da rede elétrica. Essa tecnologia, quando integrada a sistemas de redes inteligentes (*Smart Grid*), pode melhorar a estabilidade da rede e permitir um gerenciamento energético mais eficiente e sustentável.

2.6.3 *Vehicle to Home (V2H)*

O *Vehicle to Home* (V2H) é um conceito semelhante ao *Vehicle to Grid* (V2G), mas com uma diferença fundamental: em vez de fornecer energia diretamente para a rede de distribuição, o fluxo de energia parte da bateria do veículo elétrico (VE) para alimentar a residência. Essa tecnologia permite que os veículos sejam utilizados como unidades de armazenamento temporário, disponibilizando o excedente de energia armazenada para atender à demanda doméstica (GRIDX, 2024).

O V2H se mostra especialmente vantajoso em situações de interrupção no fornecimento de energia, funcionando como um sistema de backup eficiente. Em casos de falha na rede elétrica, o veículo pode automaticamente suprir a casa com eletricidade, garantindo a operação de equipamentos essenciais. Uma técnica aplicável para detectar falhas na rede consiste em monitorar o valor eficaz da tensão: se esse valor cair para 85% do valor nominal, considera-se que houve uma interrupção. Quando esse limiar é atingido, o sistema ativa o veículo elétrico para fornecer energia à residência, garantindo maior autonomia e segurança energética (MONTEIRO et al., 2012).

Além de atuar como uma fonte emergencial, essa tecnologia também pode ser utilizada para otimizar o consumo doméstico, permitindo que a energia seja utilizada de maneira mais eficiente. Em horários de pico, quando a tarifa de eletricidade é mais alta, o veículo pode fornecer energia para a casa, reduzindo os custos com eletricidade e melhorando a gestão do consumo.

2.7 Sistema de Recarga de Veículos Elétricos

Para garantir o carregamento e a descarga controlada da bateria do veículo elétrico, são necessários componentes eletrônicos capazes de gerenciar o fluxo de energia entre o veículo e a rede elétrica (TANG et al., 2022). A Figura 7 apresenta uma topologia de ligação energética bidirecional usada para gerenciar o fluxo de energia entre a rede elétrica e o veículo. A energia proveniente da rede passa inicialmente por um filtro, que atua na mitigação de interferências eletromagnéticas e na suavização de distúrbios da rede, está incluso no conversor AC/DC bidirecional (JARRAYA et al., 2019).

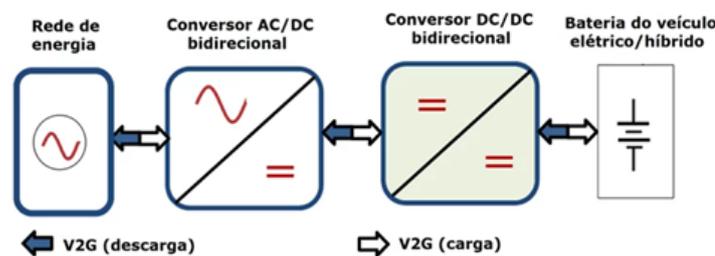


Figura 7 – Topologia do sistema analisado

Fonte: (JARRAYA et al., 2019)

Após o filtro, a energia em corrente alternada (CA) é convertida em corrente contínua (CC) por meio de um conversor CA/CC bidirecional, que permite o fluxo de energia nos dois sentidos. Em seguida, essa energia passa por um conversor CC/CC bidirecional, responsável por ajustar a tensão para o nível adequado da bateria, garantindo um carregamento seguro. Além disso, o conversor também é capaz de elevar a tensão da bateria quando necessário, possibilitando a devolução de energia à rede elétrica (MAYER; PÉRES;

OLIVEIRA, 2017). Neste trabalho, a simulação considera apenas o elo CC do sistema, ou seja, a parte em corrente contínua diretamente conectada à bateria, com o objetivo de simplificar a análise do processo de conversão e controle de energia. Assume-se que a conversão CA/CC é realizada por um retificador, e, portanto, não é o foco deste estudo.

2.8 Conversor Bidirecional *Buck-Boost*

A tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G) permite que veículos elétricos atuem não apenas como consumidores de energia, mas também como fontes de eletricidade para a rede elétrica. Para possibilitar esse fluxo bidirecional de energia de maneira eficiente, utiliza-se um Conversor Bidirecional *Buck-Boost*, responsável por ajustar dinamicamente a tensão entre a bateria do veículo e a rede. Esse conversor pode operar em três modos distintos: *Buck*, quando reduz a tensão da rede para um nível adequado ao carregamento da bateria do veículo; *Boost*, quando eleva a tensão da bateria para injetar energia na rede; e *Buck-Boost*, que combina ambas as funções, permitindo um ajuste dinâmico da tensão. Essa flexibilidade é fundamental para que o V2G funcione de maneira eficiente, garantindo a compatibilidade entre diferentes níveis de tensão e otimizando o uso da energia armazenada no veículo (HAM et al., 2019).

2.8.1 Funcionamento do modo *Buck*

No modo *buck*, o conversor reduz a tensão, já retificada, da rede elétrica para um nível adequado ao carregamento da bateria do veículo. Esse processo ocorre por meio do chaveamento de um transistor de potência, que controla a passagem de corrente para um indutor, em geral, via modulação por largura de pulsos (PWM, do inglês, *Pulse Width Modulation*). Durante o período em que o transistor está ligado, a corrente flui pelo indutor, armazenando energia em seu campo magnético. Quando o transistor desliga, essa energia acumulada é liberada para a bateria por meio de um diodo e de um capacitor de filtro, garantindo uma saída de tensão estável. Esse modo de operação é essencial para proteger a bateria contra sobretensões e garantir um carregamento seguro e eficiente. O modo *buck* é amplamente utilizada em sistemas V2G porque a tensão da rede elétrica geralmente é maior do que a tensão nominal da bateria do veículo, tornando necessária essa redução controlada de tensão. Além disso, estudos indicam que essa conversão pode alcançar eficiências superiores a 98%, reduzindo perdas e aumentando a vida útil da bateria (SAMYUKTHA; GANESAN, 2024).

2.8.2 Funcionamento do modo *Boost*

O modo *Boost* eleva a tensão da bateria do veículo para um nível adequado à injeção de energia na rede elétrica. Nesse modo, o transistor de potência é acionado,

permitindo que a corrente flua pelo indutor, que armazena energia. Quando o transistor desliga, a energia armazenada é somada à tensão da bateria e transferida para a saída, resultando em uma tensão maior.

Para melhorar a eficiência e a estabilidade dessa conversão no contexto V2G, técnicas como a modulação por largura de pulso (PWM) são frequentemente aplicadas. O PWM controla o tempo de condução do transistor, ajustando a tensão de saída conforme necessário (ROMEIRO, 2024).

2.8.3 Funcionamento do modo *Buck-boost*

O modo Buck-Boost combina as funções dos modos *Buck* e *Boost*, permitindo que o conversor ajuste a tensão dinamicamente conforme as necessidades do sistema. Essa capacidade é essencial em aplicações V2G, onde a tensão da bateria e as condições da rede elétrica variam significativamente. Quando o veículo fornece energia à rede (V2G), o conversor opera no modo *Boost*, elevando a tensão da bateria para o nível exigido pela rede elétrica. No sentido inverso (G2V), quando o veículo está carregando, o conversor opera no modo *Buck*, reduzindo a tensão da rede para um nível adequado à bateria. Essa topologia permite que o veículo funcione como regulador de tensão, estabilizando a rede elétrica e auxiliando na qualidade da energia fornecida, especialmente em redes inteligentes (*smart grids*) (MARQUES, 2022).

A Figura 12 apresenta o diagrama de um Conversor Bidirecional Buck-Boost aplicado ao sistema V2G. O circuito é composto por dois transistores de potência (Q1 e Q2), um indutor central (L1) e capacitores de filtro (C1 e C2). Q1 alterna entre os modos *Buck* e *Boost*, enquanto Q2 permite o fluxo bidirecional de corrente. L1 armazena energia e regula a corrente, enquanto C1 e C2 estabilizam a tensão, reduzindo oscilações.

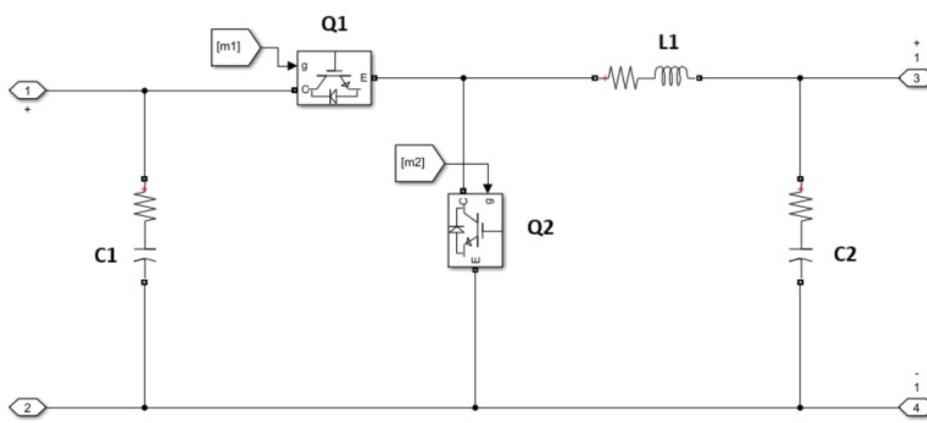


Figura 8 – Conversor Buck-Boost

Fonte: Elaboração Própria

3 Desenvolvimento

O conceito V2G (*Vehicle-to-Grid*) é abordado neste trabalho com o objetivo de simular um cenário de carga e descarga da bateria de um veículo elétrico e sua interação com uma residência, por meio do MATLAB. A partir da simulação, o trabalho visa analisar como o controle do período de carga do veículo elétrico pode trazer benefícios ao fornecer energia no horário de ponta, contribuindo para evitar a sobrecarga do sistema. A topologia completa de um sistema V2G, consiste nos seguintes elementos, um filtro cuja função é reduzir ruídos e distorções harmônicas na rede elétrica, um conversor CA-CC que converte a corrente alternada (CA) e corrente contínua (CC), e um conversor bidirecional CC-CC, que ajusta a tensão da corrente contínua para um nível adequado ao carregamento da bateria do carro elétrico. Devido ao projeto focar no sistema de controle de carga e descarga do VE, o presente trabalho considera apenas o elo CC do sistema, que contém o conversor bidirecional, a bateria, e um sistema modelado para representar uma residência que simula uma curva de carga real. A simulação é desenvolvida a partir das seguintes etapas: primeiramente, são definidos os componentes que serão utilizados, bem como seus parâmetros. Em seguida, a residência é representada com sua respectiva curva de carga, refletindo o perfil de consumo ao longo do tempo. São consideradas as características do conversor *buck-boost* bidirecional, como a tensão de entrada e a tensão de saída, conforme os requisitos do projeto. Para o Veículo elétrico, a modelagem é realizada com base nas especificações de sua bateria.

Conforme ilustrado na Figura 9, será desenvolvido um modelo no Simulink, fundamentado em uma estratégia que emprega o controle de corrente e o monitoramento do Estado de Carga (SoC) da bateria. O cenário simulado contempla o fluxo bidirecional de energia entre o veículo elétrico e a residência, considerando tanto o processo de armazenamento quanto o fornecimento de energia. A partir desse modelo, serão analisados os dados de saída, incluindo o comportamento dinâmico da bateria ao longo do tempo.

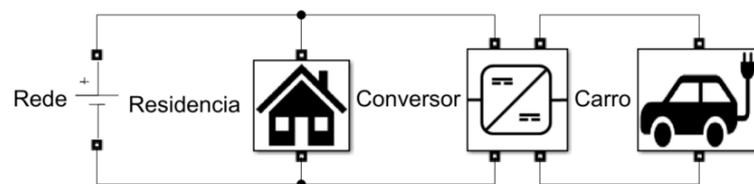


Figura 9 – Modelo Simulink

Fonte: Elaboração própria

3.1 Residência

Na modelagem proposta, foi desenvolvido um esquema para simular uma curva de carga típica de uma residência (Figura 10), que servirá de base para os controles de carga e descarga da bateria. A curva representa um consumo médio de 330 kWh/mês, com demanda reduzida durante a madrugada, elevação gradual pela manhã e pico acentuado entre 18 h e 21 h. Após o pico, observa-se uma redução progressiva do consumo ao longo da noite, até retornar aos níveis mínimos. Essa dinâmica permite analisar o comportamento do sistema frente às variações do consumo residencial.

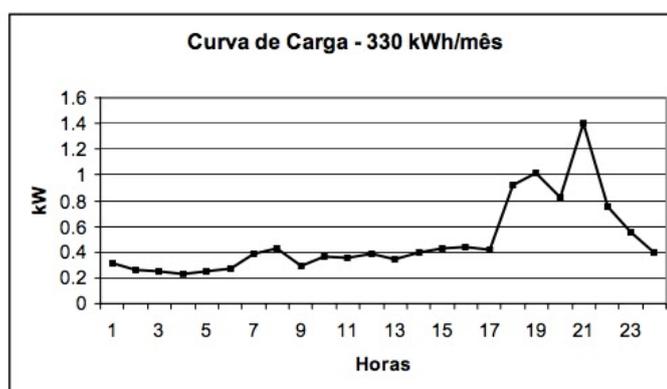


Figura 10 – Curva de carga residencial

Fonte: (FRANCISQUINI, 2006)

O tempo de simulação foi definido em 24 segundos, sendo que cada segundo representa uma hora do dia. Inicialmente, a carga permanece em um nível baixo, próximo de 0,2 kW, e a partir de $t = 6$ s, ela começa a aumentar gradualmente, atingindo seu pico de aproximadamente 1,4 kW em $t = 21$ s, seguindo o comportamento típico de uma curva de carga residencial. Considerando uma tensão no elo CC de 650 V, cada resistor do circuito possui valor fixo de 2500 Ω , conforme representado na Figura 11. Esse comportamento reflete um padrão de consumo que cresce progressivamente até o horário de pico e, em seguida, apresenta uma leve queda.

Para simular a variação da carga ao longo do tempo, foram utilizados blocos do MATLAB/Simulink, como chaves controladas (*ideal switches*), responsáveis por ligar ou desligar os resistores em momentos específicos, de acordo com o perfil de consumo desejado. Além disso, blocos como *Product* (multiplicação) e *Unit Delay* (Z^{-1}) foram empregados para temporizar e sequenciar o acionamento das cargas, permitindo o aumento gradual da potência conforme o avanço do tempo de simulação. Dessa forma, o modelo reproduz o comportamento dinâmico do consumo de uma residência ao longo de um dia.

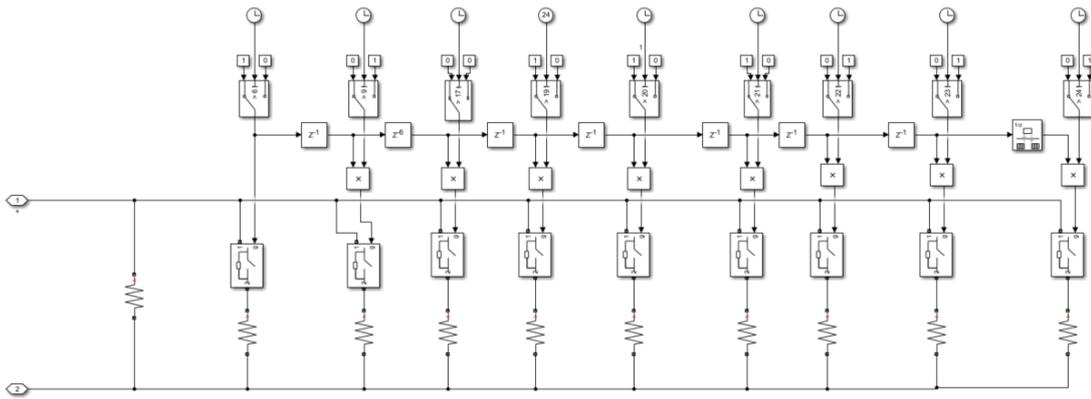


Figura 11 – Modelo da residência

Fonte: Elaboração própria

3.2 Modelo da Bateria

Neste estudo, a bateria adotada para a análise é a utilizada no veículo elétrico Nissan Leaf. As especificações técnicas dessa bateria estão detalhadas na Tabela.

Tabela 2 – Especificações da bateria do Nissan Leaf (40 kWh)

Especificação	Valor
Capacidade Nominal (kWh)	40,0
Capacidade Útil (kWh)	39,0
Tipo de Bateria	Íon de Lítio (NCM523)
Número de Células	192
Configuração do Pacote	96s2p
Arquitetura (V)	400
Tensão Nominal (V)	350

Fonte: Adaptado de (EV DATABASE, 2025).

A bateria de tração do Nissan Leaf na versão com 40,0 kWh de capacidade nominal adota a tecnologia de Íons de Lítio, especificamente com a química NCM523 (Níquel, Cobalto e Manganês na proporção 5:2:3). O sistema de armazenamento de energia é composto por 192 células, dispostas em uma configuração 96s2p (duas séries de 96 células conectadas em paralelo). A capacidade útil da bateria é de 39,0 kWh, o que representa alta eficiência no aproveitamento da energia armazenada para propulsão elétrica. Os parâmetros definidos para a simulação da bateria, apresentados na Tabela 3, foram configurados de modo a facilitar a análise do comportamento dinâmico do sistema durante o intervalo de tempo estipulado para a simulação. A capacidade nominal da bateria foi reduzida para 5,6 Ah em relação ao valor real do componente, com o objetivo de acelerar os ciclos de carga e descarga, permitindo a observação de um intervalo operacional mais amplo den-

tro de um tempo de simulação reduzido. O tempo de resposta da bateria foi definido de forma arbitrária, de modo a atender às necessidades específicas do estudo e favorecer a visualização dos efeitos de carga e descarga ao longo do tempo. Adicionalmente, o estado inicial de carga (State of Charge - SOC) foi ajustado em 39%, possibilitando a avaliação do desempenho da bateria a partir de uma condição de carga parcial.

Tabela 3 – Parâmetros adotados para a simulação da bateria

Parâmetro	Valor
Tipo de Bateria	Íon de Lítio
Tensão Nominal (V)	350
Capacidade Nominal (Ah)	5,6
Estado Inicial de Carga (SOC) (%)	39
Tempo de Resposta da Bateria (s)	1
Efeitos de Temperatura	Não Simulado
Efeitos de Envelhecimento (Aging)	Não Simulado

Fonte: Dados extraídos do ambiente de simulação no MATLAB/Simulink.

3.3 Conversor Bidirecional

Para o presente trabalho, foi modelado um conversor bidirecional que atenda as especificações e necessidades do projeto, o conversor *Buck-Boost* bidirecional permite o fluxo de energia em ambas as direções, contemplando dois modos operacionais: o modo *Buck* e o modo *Boost*. Dessa forma, a corrente pode ser transferida tanto da bateria para a rede quanto da rede para a bateria. O conversor é composto por semicondutores, como transistores e diodos, que atuam como interruptores eletrônicos, realizando o chaveamento controlado da corrente elétrica para ajustar o nível de tensão e o fluxo de energia entre a fonte de entrada e a saída. Esses dispositivos permitem que o conversor aumente ou reduza a tensão conforme a necessidade, viabilizando a transferência de energia em ambas as direções. Além disso, o circuito inclui indutores e capacitores, que têm a função de armazenar energia temporariamente e filtrar as oscilações de tensão e corrente. Dessa forma, o conversor consegue atender às variações dinâmicas do sistema, mantendo o controle eficiente da transferência de energia. O dimensionamento do conversor bidirecional foi realizado com base nas especificações definidas neste projeto. Os cálculos dos parâmetros de cada componente foram elaborados considerando os dados técnicos da bateria do veículo elétrico. A Figura 12 apresenta o modelo do conversor *buck-boost* implementado no *software* Simulink.

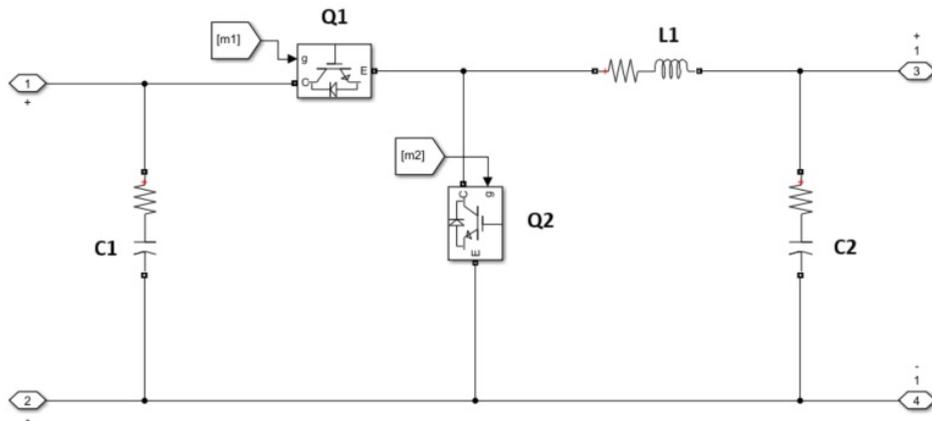


Figura 12 – Conversor Buck-Boost

Fonte: Elaboração própria

3.3.1 Modo Boost

No modo boost, ilustrado pelas Figuras 13 e 14, o conversor opera para elevar a tensão de saída em relação à tensão de entrada. No estágio 1 (Figura 13), o transistor Q2 funciona como uma chave fechada, a corrente da fonte de baixa tensão (bateria) flui através do indutor L1, carregando-o. Durante esse processo, o diodo interno do transistor Q1 permanece inversamente polarizado, já que a tensão do barramento de saída (lado esquerdo), proveniente da rede, é maior. Em seguida, no estágio 2 (Figura 14), o transistor Q2 atua como uma chave aberta, e a energia armazenada no indutor se soma à tensão da bateria. Dependendo do ciclo de trabalho do sinal PWM aplicado, essa combinação pode resultar em uma tensão instantânea superior à tensão da fonte de alta tensão, o que faz com que o diodo em antiparalelo ao transistor Q1 se polarize diretamente. Com isso, o próprio Q1 passa a atuar como um diodo, permitindo que a corrente flua no sentido da rede, elevando assim a tensão na saída do conversor.

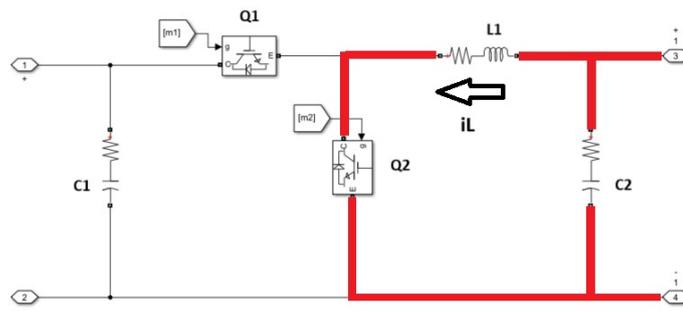


Figura 13 – Conversor modo Boost - estágio 1

Fonte: Elaboração própria

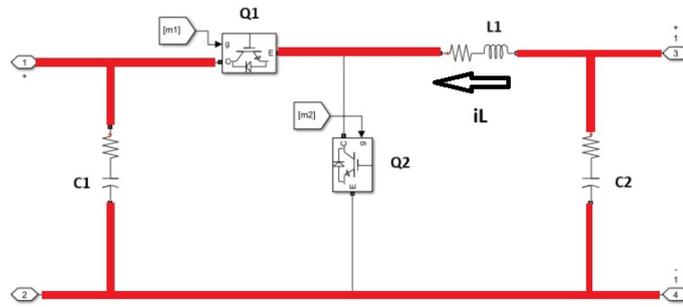


Figura 14 – Conversor modo Boost - estágio 2

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 4 apresenta as especificações da bateria utilizadas no dimensionamento dos componentes do conversor no modo *boost*.

Tabela 4 – Parâmetros adotados para a simulação da bateria

Parâmetro	Valor
P_2 – Potência de saída da bateria	3,6 kW
V_1 – Tensão nominal da bateria	350 V
V_{1min} – Tensão mínima de entrada na bateria	300 V
V_{1max} – Tensão máxima de entrada na bateria	400 V
V_2 – Tensão no elo CC	650 V
f_{ch} – Frequência de chaveamento	5 kHz
η – Rendimento do conversor	90%
ΔI_{LI} – Máxima ondulação de corrente no indutor	10% I_1
ΔV_2 – Máxima ondulação de tensão de saída	1% V_2

Fonte: Elaboração própria.

A razão cíclica D_{boost} define a fração de tempo em que a chave permanece fechada durante cada ciclo de comutação:

$$D_{boost} = 1 - \frac{V_{1nom}}{V_2} \quad (3.1)$$

Substituindo os valores:

$$D_{boost} = 1 - \frac{350}{650} = 0,462 \quad (3.2)$$

A potência de entrada P_1 no modo Boost é calculada a partir da potência de saída P_2 , considerando o rendimento η do conversor:

$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \quad (3.3)$$

$$P_1 = \frac{3600}{0,9} = 4000 \text{ W} \quad (3.4)$$

A corrente de entrada I_1 é determinada pela divisão entre a potência de entrada P_1 e a menor tensão de entrada V_{1min} :

$$I_1 = \frac{P_1}{V_{1min}} = \frac{4000}{300} = 13,33 \text{ A} \quad (3.5)$$

A corrente de saída I_2 no modo Boost é obtida pela relação:

$$I_2 = \frac{P_2}{V_2} = \frac{3600}{650} = 5,54 \text{ A} \quad (3.6)$$

Adota-se uma ondulação de corrente no indutor de 10% da corrente de entrada:

$$\Delta I_{L1} = 0,1 \times I_1 = 1,333 \text{ A} \quad (3.7)$$

O valor do indutor L_1 no modo Boost é calculado pela equação:

$$L_1 = \frac{V_2}{16 \times f_{ch} \times \Delta I_{L1}} \quad (3.8)$$

$$L_1 = \frac{650}{16 \times 5000 \times 1,333} = 6,1 \text{ mH} \quad (3.9)$$

O capacitor de saída C_{boost} limita a ondulação de tensão na saída e é dimensionado conforme a equação abaixo:

$$C_{boost} = \frac{1}{2} \times \frac{(I_1 - 2I_2)(I_1 - D_{boost})}{f_{ch} \times \Delta V_2} \quad (3.10)$$

Substituindo os valores:

$$C_{boost} = \frac{1}{2} \times \frac{(13,33 - 2 \times 5,54)(13,33 - 0,462)}{5000 \times 3,5} \quad (3.11)$$

$$C_{boost} = \frac{1}{2} \times \frac{2,25 \times 12,868}{17500} = 827 \mu F \quad (3.12)$$

3.3.2 Modo Buck

No modo buck, ilustrado pelas Figuras 15 e 16, o conversor opera para reduzir a tensão de saída em relação à tensão de entrada. Na Figura 15, o transistor Q1 é acionado, permitindo que a corrente flua diretamente da fonte de alta tensão através do indutor L1 até a carga. Nesse instante, o indutor se comporta como uma resistência de baixa impedância, conduzindo a energia e, ao mesmo tempo, armazenando parte dela em seu campo magnético. Já no estágio dois (Figura 16), o transistor Q1 é desligado e, devido ao atraso de corrente introduzido pelo indutor, a chave Q2 fica inversamente polarizada e seu diodo em antiparalelo passa a conduzir, funcionando como um diodo de "roda livre" e permitindo que a corrente continue fluindo pela carga. Essa continuidade evita interrupções bruscas na corrente e garante a entrega de uma tensão mais baixa e controlada na saída. A redução da tensão ocorre porque a energia é liberada gradualmente pelo indutor, sendo a fração da tensão de entrada entregue à carga determinada pelo tempo em que o transistor Q1 permanece conduzindo em cada ciclo de operação.

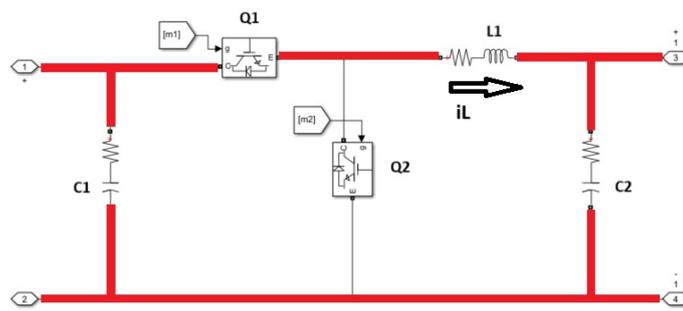


Figura 15 – Conversor modo Buck - estágio 1

Fonte: Elaboração própria

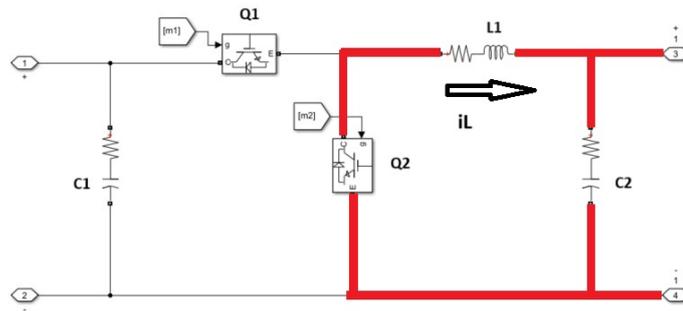


Figura 16 – Conversor modo Buck - estágio 2

Fonte: Elaboração própria

A Tabela 5 apresenta as especificações da bateria utilizadas no dimensionamento dos componentes do conversor no modo buck.

Tabela 5 – Parâmetros utilizados no dimensionamento do conversor Buck

Parâmetro	Valor
P_2 – Potência de saída do elo CC	4 kW
V_1 – Tensão nominal na bateria	350 V
$V_{1_{min}}$ – Tensão mínima de entrada no elo CC	300 V
$V_{1_{max}}$ – Tensão máxima de entrada no elo CC	408 V
V_2 – Tensão nominal no elo CC	650 V
f_{ch} – Frequência de chaveamento	1 kHz
η – Rendimento do conversor	90%
ΔI_{L2} – Máxima ondulação de corrente no indutor	10% I_{L2}
ΔV_2 – Máxima ondulação de tensão de saída	1% V_2

Fonte: Elaboração própria.

Neste projeto, a potência de saída do conversor no modo Buck deve ser considerada igual à potência de entrada P_1 calculada no modo Boost:

$$P_1 = 4000 \text{ W} \quad (3.13)$$

A razão cíclica D_{buck} no modo Buck é determinada pela relação entre a tensão de entrada nominal e a tensão de saída:

$$D_{buck} = \frac{V_{1_{nom}}}{V_2} \quad (3.14)$$

$$D_{buck} = \frac{350}{650} = 0,538 \quad (3.15)$$

A corrente de saída I_2 no modo Buck é obtida pela relação entre a potência de entrada P_1 e a menor tensão de entrada V_{1min} :

$$I_2 = \frac{P_1}{V_{1min}} = \frac{4000}{300} = 13,33 A \quad (3.16)$$

A corrente de entrada I_1 é dada pela razão entre a potência de saída P_2 e a tensão de saída V_2 :

$$I_1 = \frac{P_2}{V_2} = \frac{3600}{650} = 5,54 A \quad (3.17)$$

A ondulação de corrente no indutor é de 10% da corrente de saída:

$$\Delta I_{L2} = 0,1 \times I_2 = 1,333 A \quad (3.18)$$

O capacitor de saída C_{buck} limita a ondulação de tensão na saída e é dimensionado pela equação:

$$C_{buck} = \frac{V_{1nom} \times D_{buck} \times (1 - D_{buck})}{8 \times L \times f_{ch}^2 \times \Delta V_2} \quad (3.19)$$

Substituindo os valores:

$$C_{buck} = \frac{350 \times 0,538 \times (1 - 0,538)}{8 \times 0,0061 \times 5000^2 \times 3,5} \quad (3.20)$$

$$C_{buck} = \frac{86,927}{4,27 \times 10^6} = 20,36 \mu F \quad (3.21)$$

3.4 Controle de carga e descarga

A gestão da carga e descarga da bateria de um veículo elétrico no contexto do Vehicle-to-Grid (V2G) é fundamental para otimizar o uso da energia armazenada e garantir a estabilidade da rede de distribuição. No cenário considerado, o controle dessas operações é realizado com base na corrente da residência, permitindo que o sistema ajuste dinamicamente os momentos de carregamento e descarregamento conforme a demanda local.

3.4.1 Controle *Vehicle to Grid* (V2G)

O sistema de controle para a interação do veículo elétrico com a rede no contexto Vehicle-to-Grid (V2G) é baseado no conversor bidirecional *buck-boost*, que permite tanto

o carregamento quanto a descarga da bateria. O chaveamento dos semicondutores do conversor é controlado por uma técnica conhecida como modulação por largura de pulso (*Pulse Width Modulation* - PWM). No PWM, a potência transferida ao sistema é regulada pela variação do tempo em que a chave permanece conduzindo dentro de cada ciclo de operação, definido pelo ciclo de trabalho (*duty cycle*). Como ilustrado na Figura 1, quanto maior o ciclo de trabalho, maior será o tempo em que o sinal permanece ativo (nível alto), permitindo um maior fluxo de energia. A geração do sinal PWM ocorre a partir da comparação entre uma onda portadora, geralmente uma forma de onda triangular ou dente de serra, e um sinal de referência (normalmente uma tensão contínua que define a razão cíclica desejada). Sempre que a tensão da onda portadora é menor que a tensão de referência, o sinal de saída do PWM assume um nível alto (ativado); quando a tensão da onda portadora ultrapassa o valor de referência, o sinal de saída assume um nível baixo (desativado). Esse pulso gerado pelo PWM é então aplicado ao terminal “gate” do dispositivo semiconductor por meio de um circuito isolado, garantindo a correta ativação da chave. Dessa forma, o conversor buck-boost bidirecional ajusta dinamicamente a tensão e corrente de saída, garantindo a operação eficiente do sistema de carga e descarga do veículo elétrico.

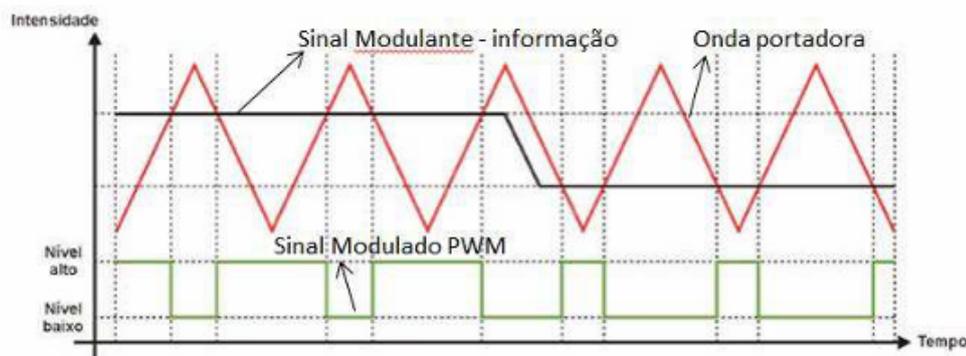


Figura 17 – Modulação por Largura de Pulso (PWM)

Fonte: (CAVALCANTE; RODRIGUES; BUENO, 2014)

O controle do chaveamento do conversor bidirecional buck-boost, no contexto *Vehicle-to-Grid* (V2G), é realizado por meio de uma malha fechada, como ilustrado na Figura 18. A estratégia baseia-se no cálculo do erro entre o valor de referência da corrente desejada, definido a partir do estado de carga da bateria (soc_ctl), e a corrente real medida na bateria (I_bat). Esse erro é então normalizado pela corrente de referência ($I_control$), com o objetivo de adequar a resposta do sistema à demanda instantânea de energia.

O sinal obtido é processado por um controlador Proporcional-Integral (PI), responsável por gerar o comando de controle que ajusta dinamicamente o *duty cycle* do PWM. A ação proporcional responde diretamente às variações do erro, enquanto a ação integral

acumula desvios ao longo do tempo, promovendo estabilidade e precisão no rastreamento da corrente de referência. Com isso, o conversor opera de forma adequada nos modos *buck* (modo G2V, quando a bateria é carregada) ou *boost* (modo V2G, quando a bateria fornece energia para a residência ou rede).

A saída do controlador PI é enviada para um gerador PWM, que converte o sinal de controle contínuo no tempo em pulsos modulados, adequados ao acionamento das chaves do conversor. Esse sinal passa por um bloco lógico, responsável por definir qual chave será acionada. Quando o sinal de controle ($I_Control$) se torna positivo, o bloco m2 é ativado, e aciona por PWM o transistor Q2. Caso contrário, a chave M1 entra em operação e o transistor Q1 realiza o chaveamento. Dessa forma, o sistema regula o fluxo de energia conforme a direção desejada. O valor de corrente de referência utilizado é de 16 A, valor comum em aplicações de carregadores para veículos elétricos.

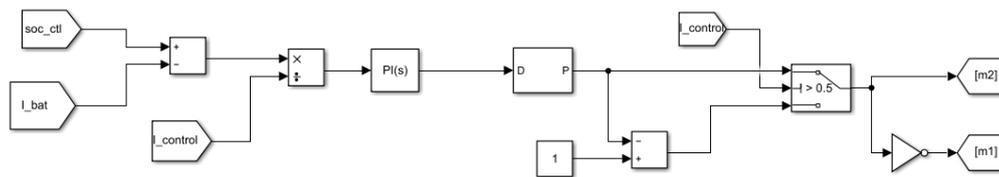


Figura 18 – Esquema do controlador Matlab/Simulink

Fonte: Elaboração própria

3.4.2 Controle através da Carga da residência

O ambiente de simulação adotado baseia-se na aplicação do controle de corrente, onde o processo de carga e descarga da bateria é regulado conforme a corrente consumida pela residência (i_load). Quando esse valor ultrapassa 1,6A, o sistema entra em operação. Esse limite foi definido com base na análise da curva de demanda da residência simulada, representada mais adiante na Figura 21 que apresenta picos mais significativos a partir desse ponto. Enquanto a corrente da carga permanecer igual ou superior a 1,6A, o veículo elétrico fornecerá energia à rede por meio da tecnologia *Vehicle-to-Grid* (V2G), ajudando a compensar os picos de demanda do sistema elétrico. A estrutura do controle desenvolvido pode ser observada na Figura 19.

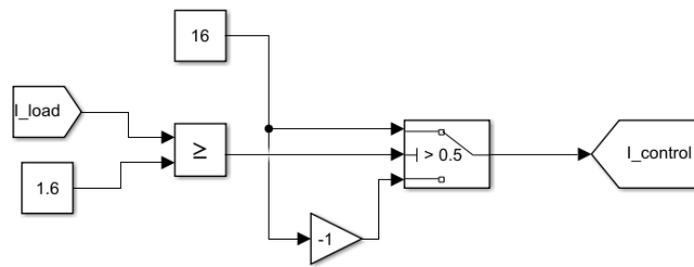


Figura 19 – Controle através da carga da residência

Fonte: Elaboração própria

3.4.3 Controle do Estado de Carga

Para aumentar a segurança e prolongar a vida útil da bateria do veículo elétrico, foi implementado um controle específico para o *State of Charge* (SOC). Esse controle define limites mínimo e máximo para o estado de carga da bateria, garantindo que, quando o veículo estiver conectado à rede e seu nível de carga estiver abaixo do limite mínimo estabelecido, a descarga da bateria não será permitida. Nessa condição, o sistema permite apenas o processo de carregamento. Dessa forma, o controle do SOC atua como uma restrição para a operação dos controles de corrente, visto que estes só entram em funcionamento quando o SOC da bateria do veículo elétrico se encontra dentro dos valores pré-definidos. Para monitorar e gerenciar o estado de carga ou descarga da bateria, foi utilizado um bloco Relay no Simulink, conforme apresentado na Figura 20, que aplica um controle baseado em histerese. O valor mínimo estabelecido para o SOC é de 39,9%. Enquanto o SOC não atingir esse intervalo aceitável, o sistema impede a descarga da bateria, permitindo exclusivamente seu carregamento. O sinal de referência adotado no controle é a corrente da residência.

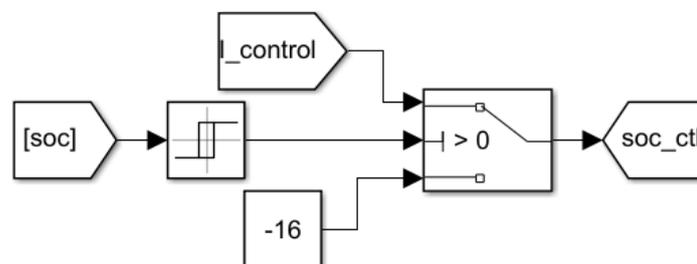


Figura 20 – Estado de carga da bateria (SOC)

Fonte: Elaboração própria

4 Resultados

Nesta seção, são apresentados os resultados obtidos a partir da simulação realizada no *software* MATLAB/Simulink, com base na estratégia de controle de carga e descarga da bateria do veículo elétrico proposta neste estudo. A simulação foi conduzida considerando um perfil de carga residencial típico, no qual a demanda de energia varia ao longo do dia, com picos de consumo no período noturno. Além disso, foram analisados os impactos da utilização da bateria do veículo para suprir parte dessa demanda, verificando o comportamento do estado de carga (State of Charge - SOC), a eficiência do conversor e a estabilização da rede elétrica. Os resultados a seguir demonstram a viabilidade da estratégia proposta, destacando o desempenho do sistema em diferentes cenários operacionais, no sentido de validar a aplicação do conceito Vehicle to Grid como uma solução promissora para a otimização do uso de energia em sistemas distribuídos.

4.1 Residência

Durante a simulação, a curva de carga da residência apresentou um comportamento típico de variação gradual da potência e da corrente ao longo do tempo, baseado no perfil apresentado na Figura 10. É importante destacar que o tempo foi comprimido para fins de simulação, de modo que cada segundo representa uma hora do dia, o que facilita a visualização dos resultados e permite analisar o comportamento do sistema ao longo de um ciclo diário completo em um intervalo reduzido. Na Figura 21, que mostra a potência consumida, observa-se que a demanda inicial é relativamente baixa, em torno de 200 W, aumentando progressivamente conforme novos equipamentos são acionados. O primeiro aumento significativo ocorre por volta do tempo 5, seguido por um período de estabilidade até o tempo 10. Depois disso, novos incrementos acontecem em momentos distintos, e a partir das 20 horas, a demanda cresce de forma mais acentuada, atingindo um pico próximo de 1400 W ao final da simulação. Esse comportamento sugere um perfil de consumo residencial típico, no qual diferentes cargas vão sendo ligadas ao longo do tempo.

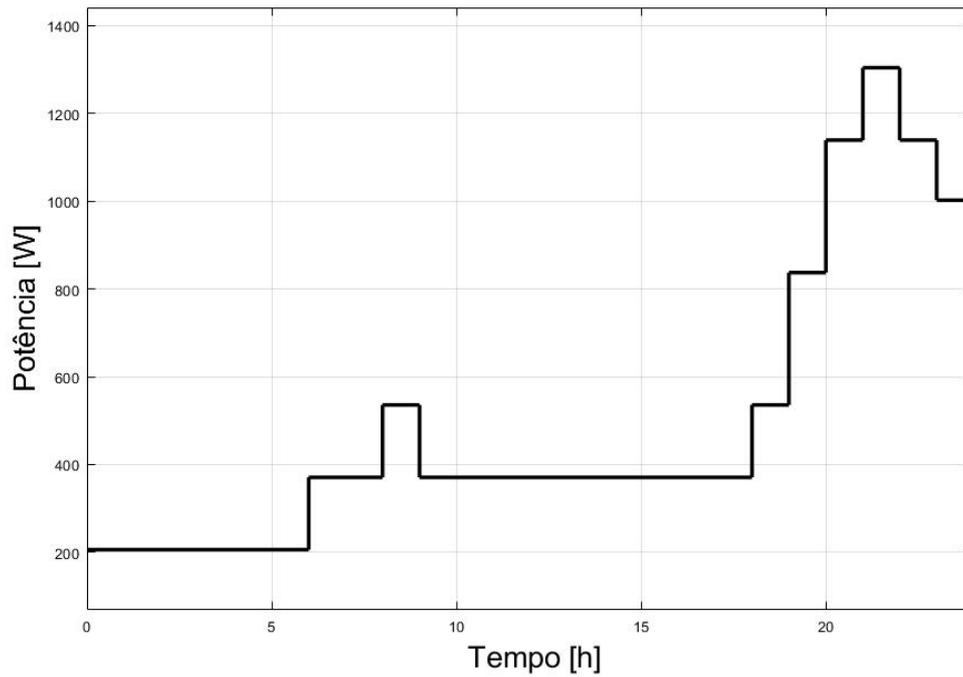


Figura 21 – Curva de potência da residência

Fonte: Elaboração própria

A Figura 22, que representa a corrente elétrica da carga, segue a mesma tendência, já que a corrente é diretamente proporcional à potência para uma tensão constante. No início da simulação, os valores se mantêm baixos, em torno de 0,3 A, aumentando progressivamente com o acionamento das cargas. A partir do segundo 20, a corrente cresce de maneira mais expressiva, acompanhando o aumento da potência, até atingir aproximadamente 2,0 A ao final do período analisado.

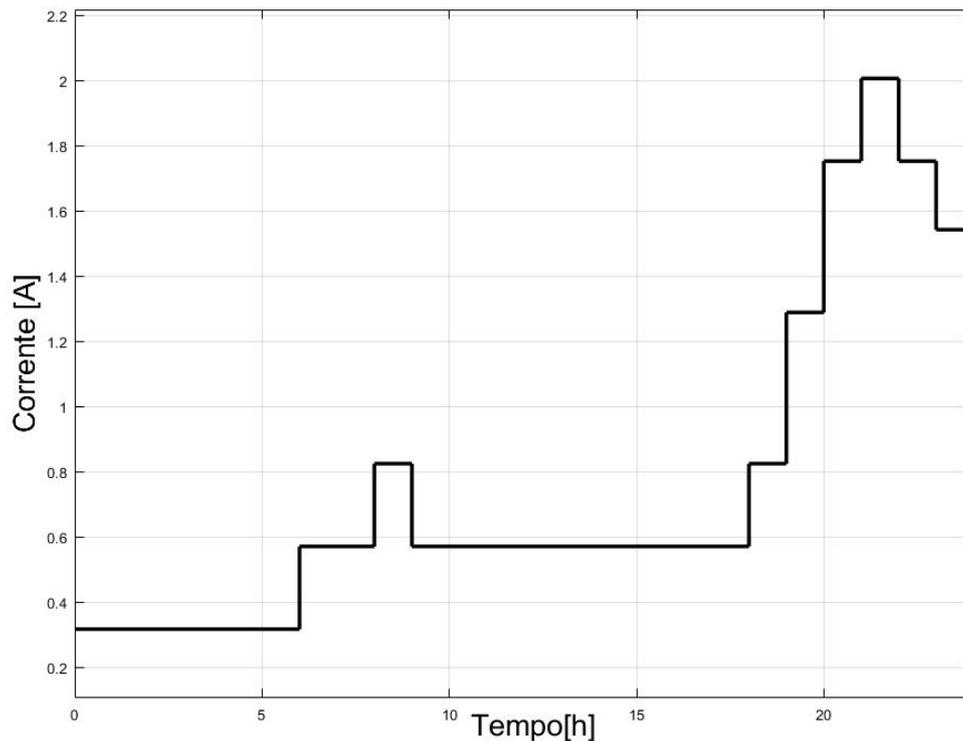


Figura 22 – Curva de corrente da residência

Fonte: Elaboração própria

4.2 Bateria

Para entender a atuação do veículo elétrico no suporte à carga residencial, é necessário analisar o comportamento da bateria durante a simulação. O sistema implementado permite que a bateria forneça energia à residência nos momentos de maior demanda e seja recarregada quando há menor consumo. A estratégia de controle busca equilibrar esse fluxo de potência de forma dinâmica, garantindo que o estado de carga (SOC) seja gerenciado de maneira eficiente. Nos próximos gráficos, serão apresentados os resultados da tensão, corrente e SOC da bateria, permitindo avaliar seu desempenho ao longo da operação e verificar sua contribuição para o atendimento da demanda residencial. A Figura 23, mostra como o nível de carga da bateria varia ao longo da simulação, refletindo a interação dinâmica com a demanda da residência. No início, o SOC está em torno de 39% e segue um crescimento gradual, chegando a aproximadamente 40,2% por volta das 20 horas. Esse comportamento indica que, nesse período, a bateria está sendo carregada, armazenando energia da rede para uso futuro. A partir desse ponto, quando a corrente da residência atinge 1,6 A, a bateria muda de função e começa a fornecer energia para atender ao aumento da demanda, entrando no modo *Vehicle to Grid* (V2G). Isso faz com que o SOC comece a cair, já que a bateria está suprindo parte do consumo da casa. Nos momentos finais da simulação, quando a corrente da residência diminui novamente, a

bateria volta ao modo de carregamento, recuperando parte de sua carga. Esse comportamento mostra que a estratégia de controle adotada funciona como esperado, alternando de forma inteligente entre carregar e descarregar a bateria de acordo com a necessidade da residência. Esse tipo de gestão eficiente é essencial para garantir que o sistema *Vehicle to Grid* (V2G) possa contribuir para um uso mais equilibrado da energia armazenada no veículo elétrico.

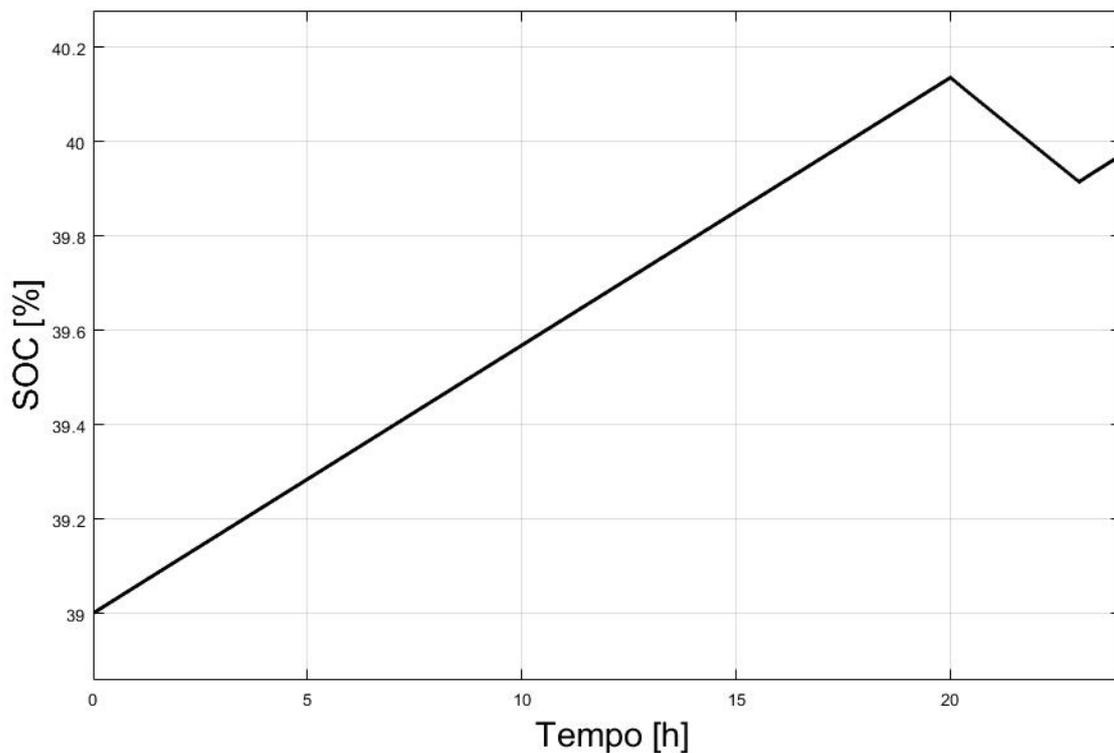


Figura 23 – Estado de carga da bateria

Fonte: Elaboração própria

A Figura 24 mostra a corrente da bateria (I_{Bat}) em preto e a corrente de controle ($I_{control}$) em azul, evidenciando a dinâmica de operação do sistema. No início da simulação, I_{Bat} permanece em torno de -10 A, indicando que a bateria está sendo carregada. Esse comportamento se mantém estável até aproximadamente as 20 horas, quando ocorre uma mudança no regime de operação. Quando a corrente da residência atinge 1,6 A, a bateria passa a fornecer energia para a carga, e I_{Bat} muda rapidamente para valores positivos, alcançando um pico próximo de 15 A, caracterizando a operação no modo *Vehicle to Grid* (V2G). Essa transição ocorre sob o comando da corrente de controle ($I_{control}$), que inicialmente se mantém em -15 A, garantindo que a bateria permaneça no modo de carregamento. No instante da mudança, $I_{control}$ sofre uma inversão e passa a atuar na faixa positiva, sinalizando ao sistema que a bateria deve fornecer energia. Nos instantes finais da simulação, a corrente da bateria começa a diminuir novamente, indicando que a necessidade de fornecimento de energia foi reduzida, permitindo que o sistema retome

o carregamento. Esse comportamento demonstra que o controle implementado responde de forma eficiente às variações da carga residencial, garantindo transições bem definidas entre os modos de operação da bateria.

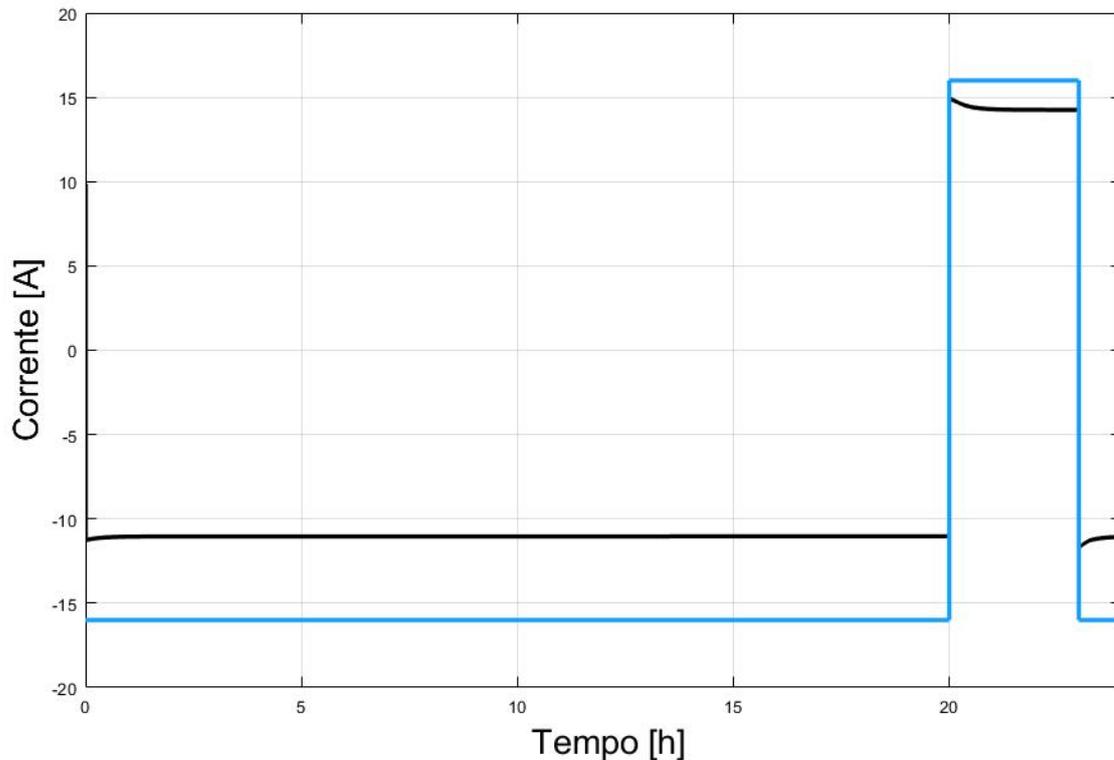


Figura 24 – Corrente na bateria (Preto) Corrente de Controle (Azul)

Fonte: Elaboração própria

A Figura 25 apresenta a variação da tensão da bateria (V_{Bat}) ao longo da simulação. Inicialmente, a tensão cresce rapidamente e se estabiliza em torno de 374 V, refletindo o controle do conversor bidirecional no modo Grid to Vehicle (G2V), garantindo uma recarga eficiente. Esse valor se mantém constante até 20 horas, quando a bateria passa a fornecer energia para a residência. Nesse momento, a corrente de descarga aumenta, e a tensão da bateria sofre uma queda abrupta, atingindo 356 V. Nos instantes finais, com a redução da corrente de descarga, a bateria volta ao modo de carregamento, e a tensão retorna gradualmente à sua faixa operacional. Esse comportamento evidencia a atuação eficiente do controle implementado na transição entre os modos G2V e Vehicle to Grid (V2G).

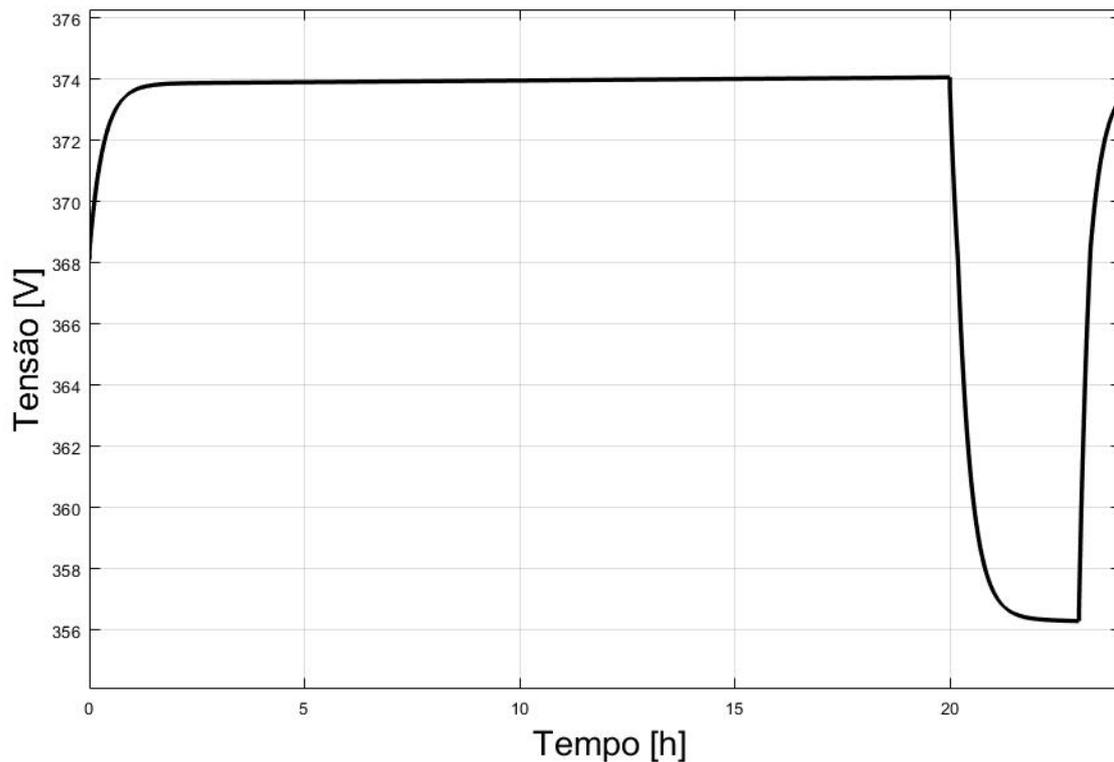


Figura 25 – Tensão na bateria

Fonte: Elaboração própria

4.3 Conversor

As Figuras 26 e 27 ilustram o comportamento da corrente nos dois transistores (Q1 e Q2) do conversor bidirecional *buck-boost* ao longo da simulação. Observa-se que, durante a operação em modo G2V (Grid to Vehicle), a corrente em Q1 permanece elevada e praticamente constante, indicando sua condução ativa enquanto transfere energia da rede para a bateria. Por volta das 20 horas, ocorre a transição para o modo V2G (Vehicle to Grid), momento em que a corrente em Q1 cai bruscamente a zero, sinalizando o bloqueio do dispositivo. Simultaneamente, conforme mostrado na Figura 27, Q2 passa a conduzir, com um aumento repentino da corrente, caracterizando o início da transferência de energia da bateria para a carga. O comportamento alternado entre as correntes de Q1 e Q2 reforça a atuação complementar dos dois dispositivos conforme o sentido do fluxo de potência no sistema.

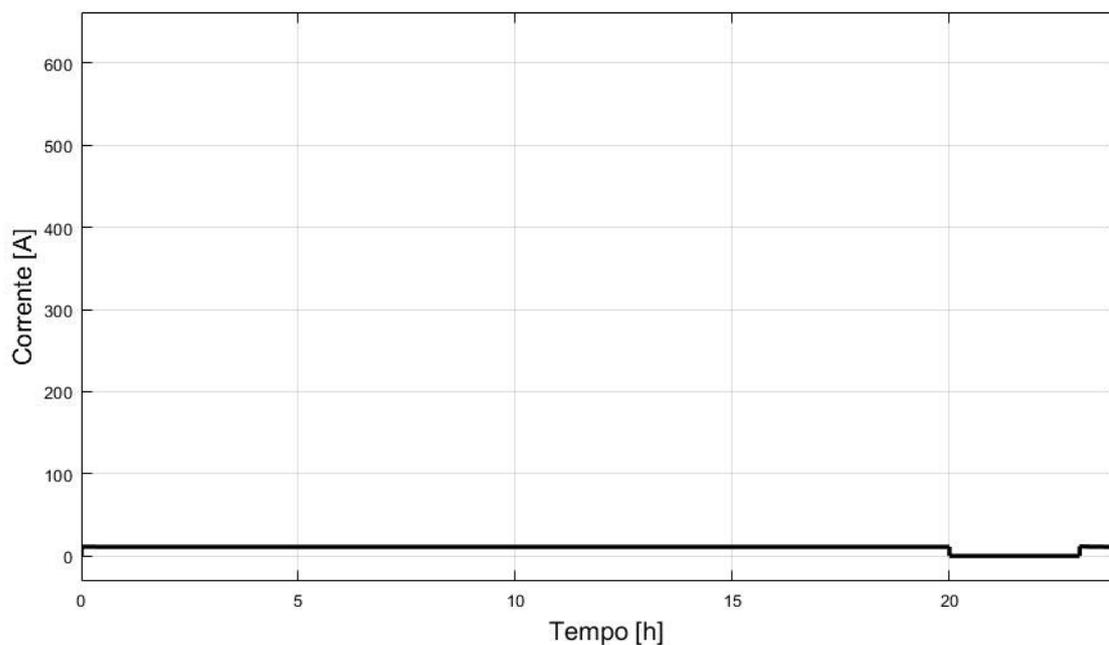


Figura 26 – Corrente no transistor 1

Fonte: Elaboração própria

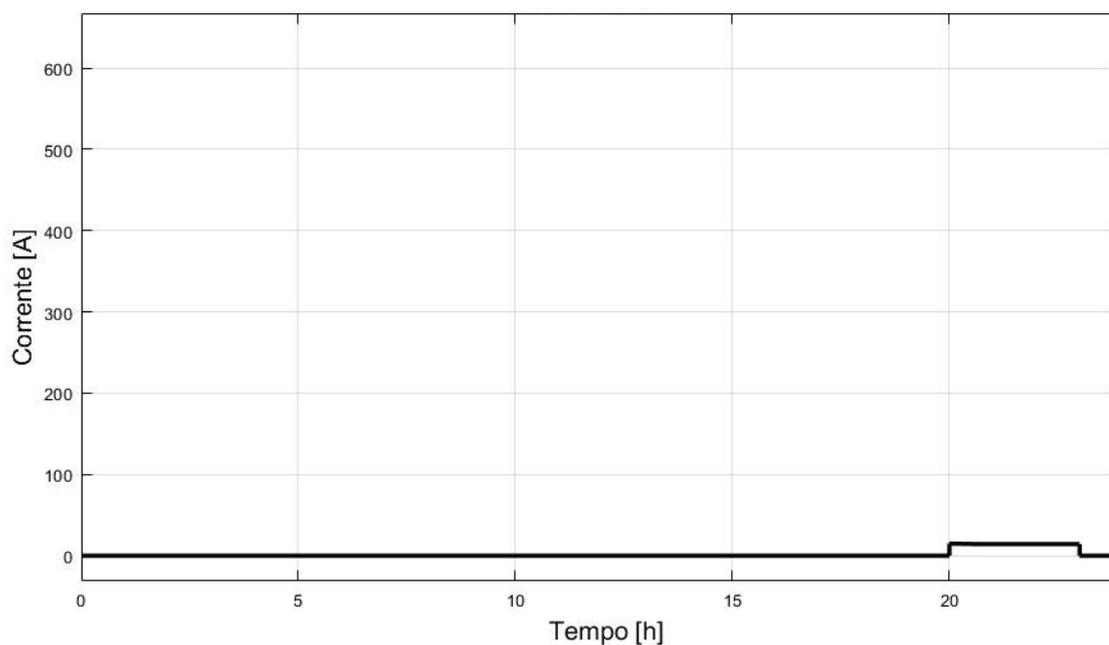


Figura 27 – Corrente no transistor 2

Fonte: Elaboração própria

4.4 Comportamento da Corrente e Interação com a Rede

A Figura 28 exibe a evolução da corrente na residência, corrente no conversor e corrente na rede elétrica ao longo do tempo. A análise conjunta dessas três variáveis

permite entender o desempenho do sistema em relação à distribuição de energia, com ênfase na atuação da rede elétrica, considerando as características da estratégia Vehicle to Grid (V2G). Durante a primeira parte da simulação (até cerca de 20 horas), o sistema opera no modo Grid to Vehicle (G2V). Nesse intervalo, a corrente na residência apresenta um perfil crescente e discreto, refletindo o aumento progressivo da demanda de carga. A corrente no conversor se mantém constante, em torno de 11 A, indicando que a bateria está sendo carregada enquanto a rede também supre a carga residencial. Cabe destacar que, neste caso, a corrente é positiva, pois representa o fluxo de energia da rede para o conversor, ou seja, do barramento AC para o DC. A corrente da bateria, por sua vez, seria negativa nesse mesmo instante, considerando que, durante o carregamento, o fluxo de corrente é dirigido para dentro da bateria. Por volta de 20 horas, ocorre a mudança de regime para o modo V2G, momento em que o sistema começa a utilizar a bateria do veículo para alimentar a residência. Isso fica evidente pela queda brusca da corrente da rede, que passa a valores bem inferiores, próximos da corrente residencial, sugerindo que a rede está agora fornecendo apenas uma fração da demanda. Ao mesmo tempo, a corrente no conversor inverte o sentido (fica negativa), confirmando que a bateria está descarregando para suprir a carga. A corrente da residência continua em seu patamar elevado, mas agora majoritariamente atendida pela energia da bateria.

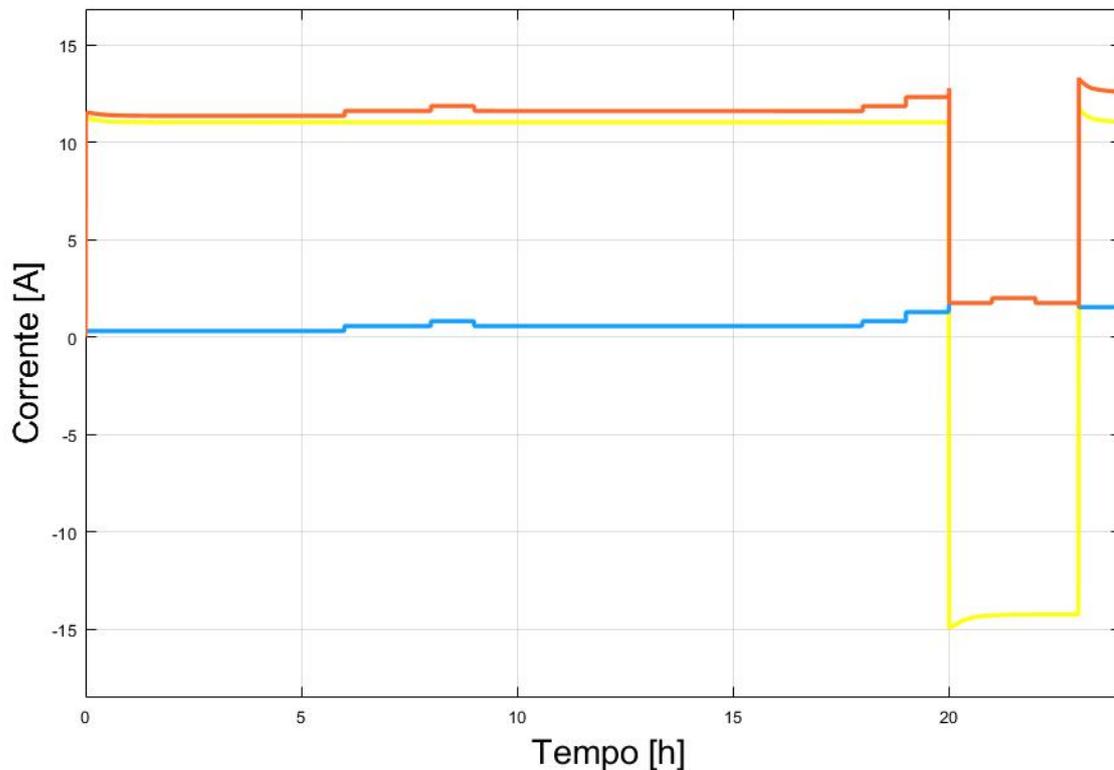


Figura 28 – Comportamento corrente, Residência (Azul), Rede (Vermelho), Conversor (Amarelo)

Esse comportamento evidencia a eficiência da estratégia de controle implementada, que realiza a transição entre os modos de operação de forma consistente e sem comprometer o fornecimento de energia à carga. Mesmo com a redução da contribuição da rede elétrica durante o modo V2G, o sistema mantém o atendimento da demanda residencial, demonstrando sua capacidade de responder dinamicamente às variações de consumo.

5 Conclusão

Com base na análise dos gráficos e no comportamento do sistema ao longo da simulação, é possível concluir que a estratégia Vehicle to Grid (V2G) proposta apresenta um desempenho positivo, atuando de forma eficiente no controle do fluxo de energia entre a rede, a residência e a bateria do veículo elétrico. A simulação demonstrou que o sistema é capaz de alternar de maneira estável entre os modos de carregamento (G2V) e fornecimento de energia (V2G), garantindo o atendimento da carga residencial mesmo durante as transições de operação. Durante o modo G2V, a rede elétrica alimenta tanto a residência quanto o carregamento da bateria, com o controle mantendo os níveis de corrente e tensão dentro dos padrões esperados. Já no modo V2G, a bateria passa a suprir parte da demanda da residência, reduzindo significativamente a necessidade de energia da rede. Esse comportamento mostra que, além de contribuir para o alívio da carga na rede em horários de pico, o sistema pode proporcionar economia ao consumidor, permitindo o uso da energia armazenada em momentos estratégicos, como em tarifas de ponta. A atuação do conversor bidirecional Buck-Boost também se mostrou adequada, com chaveamento coerente dos transistores e controle eficiente por meio do PI. Os sinais de corrente e tensão apresentaram transições suaves e comportamento estável, reforçando a confiabilidade do sistema simulado. De forma geral, a simulação validou a proposta do controle aplicado ao sistema V2G, demonstrando seu potencial para otimizar o uso da energia elétrica em ambientes residenciais, reduzir custos com eletricidade e contribuir para um modelo energético mais inteligente e sustentável.

6 Considerações finais

O trabalho cumpriu seu objetivo de simular um sistema V2G com controle de corrente aplicado a um conversor buck-boost bidirecional, validando a operação da estratégia proposta em ambiente residencial. A modelagem adotada permitiu avaliar o comportamento do sistema e os efeitos da atuação do controle em diferentes condições de carga.

Como continuidade, sugere-se o aprofundamento no estudo das etapas de conversão CA/CC e CC/CA, não abordadas neste modelo, além do desenvolvimento de uma bancada experimental em escala reduzida para validação prática dos resultados obtidos em simulação.

Referências

- AHMED, Moudud et al. Stability and Control Aspects of Microgrid Architectures—A Comprehensive Review. *IEEE Access*, v. 8, p. 144730–144766, 2020. DOI: [10.1109/ACCESS.2020.3014977](https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3014977). Citado 1 vez na página 19.
- ANEEL. *Matriz Elétrica Brasileira Alcança 200 GW*. Accessed: 2024-09-30. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2024/matriz-eletrica-brasileira-alcanca-200-gw>. Citado 1 vez na página 10.
- ARAÚJO, Lucas Mestres de; SANTOS, Fernando César Almada. Comparação da Emissão de Gás Carbônico entre Veículos Elétricos e Veículos a Combustão no Brasil e Estados Unidos. In: XXIX Simpósio de Engenharia de Produção: Resiliência na Cadeia de Suprimentos. Bauru, SP, Brasil, 2022. P. 1–15. Disponível em: /mnt/data/artigo_pdfCHMDq025.08.2022_23.09.27.pdf. Citado 1 vez na página 10.
- ASSOCIATED PRESS. O mundo será movido a eletricidade, mas ainda mais energia limpa é necessária, diz relatório. *Associated Press News*, 2024. Disponível em: <https://apnews.com/article/df50c39865f3d24cf78ac9d58f0ad07c>. Citado 1 vez na página 13.
- AUTORES, Vários. Control de microrredes: una revisión comprensiva. *Revista de Energía y Sistemas*, v. 15, n. 3, p. 123–145, 2023. Citado 1 vez na página 19.
- BARAN, Renato; LEGEY, Luiz Fernando Loureiro. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. *BNDES Setorial*, Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social (BNDES), v. 33, p. 207–224, 2010. Presented at the XIII Congresso Brasileiro de Energia, November 2010. Disponível em: <http://www.bndes.gov.br/bibliotecadigital>. Citado 1 vez na página 12.
- BERNARDO HAUCH, Daniel Chiari e Suzana da Veiga. Baterias automotivas: panorama da indústria no Brasil, as novas tecnologias e como os veículos elétricos podem transformar o mercado global. *BNDES Biblioteca digital*, BNDES Biblioteca digital, 2013. Citado 1 vez na página 15.
- BEVRANI, H. Microgrid control: A solution for penetration of renewable power. In: 2017 International Conference on Green Energy and Applications (ICGEA). 2017. P. 46–51. DOI: [10.1109/ICGEA.2017.7925453](https://doi.org/10.1109/ICGEA.2017.7925453). Citado 1 vez na página 19.
- BRASIL, EDP. *Qual o Melhor Horário Para Economizar Energia?* Accessed: 2024-09-30. 2024. Disponível em: <https://solucoes.edp.com.br/blog/melhor-horario-economizar-energia/>. Citado 1 vez na página 11.

CAVALCANTE, Marisa Almeida; RODRIGUES, Thais Tokashiki Tavares; BUENO, Darlene Andrea. Controle Remoto: observando códigos com o Arduino (parte 2 de 2). *Caderno Brasileiro de Ensino de Física*, v. 31, n. 3, p. 614–641, 2014. DOI: [10.5007/2175-7941.2014v31n3p614](https://doi.org/10.5007/2175-7941.2014v31n3p614). Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5007/2175-7941.2014v31n3p614>. Citado 0 vez na página 38.

CLEANTECH. *EV Charging Software and Grid Services*. 2024. Accessed: 2024-09-30. Disponível em: <https://www.cleantech.com/ev-charging-software-and-grid-services/>. Citado 0 vez na página 22.

EDITORIAL, Atitude. Tudo sobre microrredes no Brasil. *O Setor Elétrico*, v. 16, n. 181, p. 1–30, ago. 2021. Accessed: 2024-09-30. Disponível em: <https://www.osetoreletrico.com.br>. Citado 1 vez nas páginas 18, 20.

EDP. *Autonomia média de um carro elétrico: o que considerar?* Acesso em: 9 mar. 2025. EDP Brasil. 2023. Disponível em: <https://solucoes.edp.com.br/blog/autonomia-media-carro-eletrico/>. Citado 1 vez na página 10.

ENERGIA, FGV. *Carros Elétricos*. FGV ENERGIA, 2017. Disponível em: <https://fgvenergia.fgv.br/publicacao/caderno-de-carros-eletricos>. Citado 1 vez na página 14.

ENGENHARIA AUTOMOTIVA, Associação Brasileira de. Tecnologia dos veículos híbridos elétricos. *Revista de Engenharia Automotiva*, v. 35, n. 2, p. 123–130, 2025. Disponível em: <https://www.aea.org.br/revista/v35n2/tecnologia-veiculos-hibridos-eletricos>. Citado 1 vez na página 15.

EPE. *Matriz Energética e Elétrica*. Accessed: 2024-09-30. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/abcdenergia/matriz-energetica-e-eletrica>. Citado 1 vez na página 18.

EV DATABASE. *Nissan Leaf (40 kWh)*. Acesso em: março de 2025. 2025. Disponível em: <https://ev-database.org/car/1106/Nissan-Leaf>. Citado 0 vez na página 30.

FALCAO, Djalma. Smart Grids e Microredes: o futuro já é presente, jan. 2009. Citado 2 vezes nas páginas 10, 19.

FERNANDES, Lúcio Mascarenhas. *Estudos para a implantação do conceito Vehicle to Grid na rede elétrica do CT/UFRJ*. 2017. Projeto de Graduação – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil. Disponível em: <http://repositorio.inesctec.pt/handle/123456789/1960>. Citado 1 vez na página 23.

FRANCISQUINI, Aislan Antonio. *Estimação de Curvas de Carga em Pontos de Consumo e em Transformadores de Distribuição*. Mar. 2006. Dissertação de Mestrado – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, Ilha Solteira, SP, Brasil. Citado 0 vez na página 29.

GONÇALVES, José Miguel Ribeiro. Soluções de Tecnologias de Informação e Comunicação para Implementação do Conceito V2G. *Instituto Superior de engenharia de Coimbra*, Instituto Superior de engenharia de Coimbra, 2015. Citado 1 vez na página 10.

GONÇALVES, José Miguel Ribeiro. Soluções de Tecnologias de Informação e Comunicação para Implementação do Conceito V2G. *Instituto Superior de Engenharia de Coimbra*, Instituto Superior de Engenharia de Coimbra, p. 680–688, 2015. Citado 1 vez na página 13.

GREENV. *Autonomia dos Carros Elétricos: Entenda*. 2024. Accessed: 2024-09-30. Disponível em: <https://www.greenv.com.br/blog/autonomia-dos-carros-eletricos-entenda/>. Citado 1 vez na página 23.

GRID, Relatório Smart. *Relatório Smart Grid*. 2024. https://example.com/relatorio_smart_grid. Ministério de Minas e Energia, Brasil. Citado 1 vez na página 21.

GRIDX. *Vehicle-to-Grid (V2G) and Vehicle-to-Home (V2H): What You Need to Know*. 2024. Accessed: 2024-09-30. Disponível em: <https://www.gridx.ai/knowledge/vehicle-to-grid-v2g-and-vehicle-to-home-v2h>. Citado 1 vez na página 23.

GUARNIERI, Massimo. Looking Back to Electric Cars. *Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università di Padova*, Dipartimento di Ingegneria Industriale – Università di Padova, 2012. Citado 2 vezes na página 12.

HAM, Seung-Ho et al. High-efficiency Bidirectional Buck–Boost Converter for Residential Energy Storage Systems. *Energies*, v. 12, n. 19, p. 3786, 2019. DOI: [10.3390/en12193786](https://doi.org/10.3390/en12193786). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/19/3786>. Citado 1 vez na página 25.

HARDMAN, Scott et al. A review of consumer preferences of and interactions with electric vehicle charging infrastructure. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, v. 62, p. 508–523, 2018. ISSN 1361-9209. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.04.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1361920918301330>. Citado 0 vez na página 18.

HØYER, Karl Georg. The history of alternative fuels in transportation: The case of electric and hybrid cars. *Utilities Policy*, v. 16, n. 2, p. 63–71, 2008. Sustainable Energy and Transportation Systems. ISSN 0957-1787. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jup.2007.11.001>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0957178707000768>. Citado 2 vezes na página 12.

IBERDROLA. *História do Carro Elétrico*. Acesso em: 8 mar. 2025. 2025. Disponível em: <https://www.iberdrola.com/sustentabilidade/historia-carro-eletrico>. Citado 1 vez na página 12.

IBERDROLA. *Smart Grids: O que são e como funcionam?* 2024. <https://www.iberdrola.com/quem-somos/nossa-atividade/smart-grids>. Acessado em: 29 de setembro de 2024. Citado 1 vez na página 21.

- IEA. *Global EV Outlook 2024*. Accessed: 2024-09-30. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-ev-outlook-2024>. Citado 3 vezes nas páginas 13, 14.
- IQBAL, Sheeraz et al. Aggregated Electric Vehicle-to-Grid for Primary Frequency Control in a Microgrid- A Review. In: 2018 IEEE 2nd International Electrical and Energy Conference (CIEEC). 2018. P. 563–568. DOI: [10.1109/CIEEC.2018.8745952](https://doi.org/10.1109/CIEEC.2018.8745952). Citado 1 vez na página 20.
- JAIN, Rahul et al. A comprehensive review on charger technologies, types, and topologies for electric vehicles. *Heliyon*, Elsevier, v. 9, n. 4, e14882, 2023. DOI: [10.1016/j.heliyon.2023.e14882](https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e14882). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844024149766>. Citado 1 vez na página 16.
- JAMES LARMINIE, John Lowry. *ELECTRIC VEHICLE TECHNOLOGY EXPLAINED*. 2012 John Wiley Sons Ltd, 2012. Disponível em: <https://www.iqytechnicalcollege.com/BAE%20685-Electric%20Vehicle%20Technology.pdf>. Citado 2 vezes na página 16.
- JARRAYA, Fatma et al. Design considerations, modelling, and control of dual-active full bridge for electric vehicles charging applications. *The Journal of Engineering*, IET, v. 2019, n. 12, p. 8439–8447, 2019. Citado 1 vez na página 24.
- KASHIMA, Maisa. PROJETO DE UM INVERSOR BIDIRECIONAL APLICADO EM CARREGADORES DE VEÍCULOS ELÉTRICOS PARA CONFIGURAÇÃO G2V E V2G. *Universidade Federaol do Rio de Janeiro - Escola PolitécnicaL*, Universidade Federaol do Rio de Janeiro - Escola Politécnica, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 11, 16.
- LI, Zhongwen et al. Analysis of Multi-Agent-Based Adaptive Droop-Controlled AC Microgrids with PSCAD: Modeling and Simulation. *Journal of Power Electronics*, v. 15, p. 455–468, mar. 2015. DOI: [10.6113/JPE.2015.15.2.455](https://doi.org/10.6113/JPE.2015.15.2.455). Citado 2 vezes na página 19.
- LOPES, João Peças; SOARES, Filipe Joel; ALMEIDA, Pedro Miguel Rocha. Integration of Electric Vehicles in the Electric Power System. English, 2011. Disponível em: <http://repositorio.inesctec.pt/handle/123456789/1960>. Citado 1 vez na página 23.
- LUGENERGY. *Tipos de Carregamento de Veículos Elétricos – Os 4 Modos*. s.d. Acesso em: 8 abr. 2025. Disponível em: <https://www.lugenergy.pt/tipos-de-carregamento-4modos/>. Citado 0 vez na página 18.
- LUIZ FERNANDO LOUREIRO LEGEY, Renato Baran e. Veículos elétricos: história e perspectivas no Brasil. *BNDES Biblioteca Digital*, BNDES Biblioteca Digita, 2011. Citado 1 vez na página 12.
- MAGALHÃES, Jéssica de Lourdes Almeida Magalhães. Carros Elétricos e Uso Eficiente de Baterias. *Uni Academia Centro Universitári*, Uni Academia Centro Universitário, p. 680–688, 2020. Citado 1 vez na página 15.

- MANZETTI, Sergio; MARIASIU, Florin. Electric vehicle battery technologies: From present state to future systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 51, p. 1004–1012, 2015. ISSN 1364-0321. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.07.010>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1364032115006577>. Citado 1 vez na página 16.
- MARQUES, Gonçalo Jorge Gomes. *Conversor Full-Controlled Interleaved para Aplicações de Armazenamento de Energia em Redes Inteligentes*. 2022. Diss. (Mestrado) – Universidade do Minho, Guimarães, Portugal. Disponível em: <https://repositorium.sdum.uminho.pt/bitstream/1822/94469/1/Goncalo%20Jorge%20Gomes%20Marques.pdf>. Citado 1 vez na página 26.
- MAYER, Robson; PÉRES, Adriano; OLIVEIRA, Sérgio Vidal Garcia. Conversores CC-CC Bidirecionais Aplicados ao Sistema Elétrico de Tração de Veículos Elétricos e Híbridos. *Anais do Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência*, 2017. Citado 1 vez na página 24.
- MONTEIRO, Vítor et al. Assessment of a battery charger for electric vehicles with reactive power control. In: IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society. IEEE, 2012. P. 5142–5147. Citado 1 vez na página 24.
- MONTEIRO, Vítor; PINTO, J. G.; AFONSO, João L. Operation Modes for the Electric Vehicle in Smart Grids and Smart Homes: Present and Proposed Modes. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, v. 65, n. 3, p. 1007–1020, 2016. ISSN 0018-9545. DOI: [10.1109/TVT.2015.2481005](https://doi.org/10.1109/TVT.2015.2481005). Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/xpl/articleDetails.jsp?reload=true&arnumber=7273953>. Citado 1 vez na página 22.
- NEOCHARGE. *Tipos de Veículos Elétricos*. Accessed: 2024-09-30. 2024. Disponível em: <https://www.neocharge.com.br/tudo-sobre/carro-eletrico/tipos-veiculos-eletricos>. Citado 0 vez na página 15.
- OLIVEIRA, Ricardo Velozo Marcondes de. *Estudo da viabilidade energética de amortecedores regenerativos por indução com ênfase nos carros elétricos*. 2012. F. 112. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Faculdade de Engenharia do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Guaratinguetá, Brasil. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/106568>. Citado 1 vez na página 12.
- ORTMANN, M.S et al. Arquitetura e Componentes de uma Microrrede Inteligente Experimental. In. DOI: [10.13140/RG.2.1.1104.1361](https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1104.1361). Citado 1 vez na página 20.
- RIBEIRO, Paulo; FERREIRA, Flávia; MEDEIROS, Fábio. Geração Distribuída e Impacto na Qualidade de Energia. In: VI Simpósio Brasileiro de Qualidade de Energia Elétrica (SBQEE). Belém, Pará, Brasil, 2005. Disponível em: <https://www.cgti.org.br/publicacoes/wp-content/uploads/2016/04/GERAC%CC%A7A%CC%830-DISTRIBUI%CC%81DA-E-IMPACTO-NA-QUALIDADE-DE-ENERGIA.pdf>. Citado 1 vez na página 19.

ROMEIRO, Lucas. *Controle de Conversores em Sistemas de Energia*. 2024. Disponível em: https://pos.uel.br/meel/wp-content/uploads/2024/06/2024_Lucas_Romeiro.pdf. Citado 1 vez na página 26.

SAMYUKTHA, T.; GANESAN, S. Hardware Implementation of Bi-Directional Buck Boost Converter for V2G System with Hybrid Energy Storage System. *International Journal of Scientific Research & Engineering Trends*, v. 10, n. 4, p. 1218–1223, 2024. Citado 1 vez na página 25.

SCHVARTZ, Marcell Adriane et al. The Electric Vehicle Market in Brazil: A Systematic Literature Review of Factors Influencing Purchase Decisions. *Sustainability*, v. 16, n. 11, 2024. ISSN 2071-1050. DOI: [10.3390/su16114594](https://doi.org/10.3390/su16114594). Disponível em: <https://www.mdpi.com/2071-1050/16/11/4594>. Citado 1 vez na página 13.

SILVA, João; PEREIRA, Maria. Gestão de Energia em Microrredes com Alta Penetração de Fontes Renováveis. *Revista Brasileira de Energias Renováveis*, v. 10, n. 2, p. 200–215, 2022. Citado 1 vez na página 19.

SILVA, Vera Lúcia Paiva da. Veículos elétricos. Impactos, barreiras e oportunidades da integração nos sistemas de energia. *Neutro à Terra - Revista Técnico-Científica*, Instituto Politécnico do Porto, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Área de Máquinas e Instalações Elétricas, Departamento de Engenharia Eletrotécnica, n. 9, 2012. ISSN 1647-5496. DOI: [10.26537/neutroaterra.v0i9.383](https://doi.org/10.26537/neutroaterra.v0i9.383). Disponível em: <http://hdl.handle.net/10400.22/3633>. Citado 1 vez na página 22.

TANG, Xiaoying et al. A Holistic Review on Advanced Bi-directional EV Charging Control Algorithms. *arXiv preprint arXiv:2202.13565*, 2022. Citado 1 vez na página 24.

TERRA. *Trabalhadores brasileiros percorrem 16 km e demoram 40 minutos para chegar ao trabalho, aponta pesquisa Mobilidade Alelo*. Acesso em: 9 mar. 2025. Terra Notícias. 2023. Disponível em: <https://www.terra.com.br/noticias/trabalhadores-brasileiros-percorrem-16-km-e-demoram-40-minutos-para-chegar-ao-trabalho-aponta-pesquisa-mobilidade-alelo,26437cf0239dea7cac8a6964e454295ca1pel7ut.html>. Citado 1 vez na página 10.

TOYOSHIMA, Denis T. Introdução ao conceito Vehicle-to-Grid. *JOURNAL OF APPLIED INSTRUMENTATION AND CONTROL*, JOURNAL OF APPLIED INSTRUMENTATION e CONTROL, 2020. Citado 1 vez na página 10.

DEPARTMENT of Energy. the official U.S. government source for fuel economy information. U.S. Department of Energy - Office of Energy Efficiency Renewable Energy. Disponível em: <https://www.fueleconomy.gov/feg/evtech.shtml#data-sources>. Citado 1 vez na página 14.

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO. *Smart Grid - Redes Elétricas Inteligentes*. 2024. https://www.gta.ufrj.br/ensino/eel878/redes1-2016-1/16_1/smartgrid/. Acessado em: 29 de setembro de 2024. Citado 0 vez na página 21.

VICENTIM, Cezar Augusto. *Análise Estática de Microrredes: Modelagem de Sistemas Armazenadores de Energia e Monitoração em Tempo Real via Estimação de Estados*. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil. Acessado em: 27 set. 2024. Disponível em: </mnt/data/analise%20estatica%20de%20microrredes.pdf>. Citado 1 vez na página 20.

VIEIRA, R. N. Estudo de um Conversor CC-CC Bidirecional na Conexão de uma Microrrede CC a um Dispositivo de Armazenamento. *Revista Interciencia*, Universidade Federal da Paraíba, 2019. Citado 1 vez na página 10.

WANG, Shiyong; GE, Mengpin. *Transporte é a fonte de emissões que mais cresce. Veja o que dizem os números*. Accessed: 2024-09-30. WRI Brasil. 2019. Disponível em: <https://www.wribrasil.org.br/noticias/transporte-e-fonte-de-emissoes-que-mais-cresce-veja-o-que-dizem-os-numeros>. Citado 1 vez na página 10.

ZHANG, Ruifeng et al. State of the Art of Lithium-Ion Battery SOC Estimation for Electrical Vehicles. *Energies*, v. 11, n. 7, 2018. ISSN 1996-1073. DOI: [10.3390/en11071820](https://doi.org/10.3390/en11071820). Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/11/7/1820>. Citado 1 vez na página 16.

ZHOU, Yang; NGAI-MAN HO, Carl. A review on Microgrid architectures and control methods. In: 2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia). 2016. P. 3149–3156. DOI: [10.1109/IPEMC.2016.7512799](https://doi.org/10.1109/IPEMC.2016.7512799). Citado 1 vez na página 18.