UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALFENAS

LUIZ GUSTAVO LIMA QUINELATO

IDENTIFICAÇÃO DE PERFIS DE BATERIA PARA COMPOSIÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

POÇOS DE CALDAS / MG

2026

LUIZ GUSTAVO LIMA QUINELATO

IDENTIFICAÇÃO DE PERFIS DE BATERIA PARA COMPOSIÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

Dissertação apresentada como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química da Universidade Federal de Alfenas.
Orientadora: Prof.ª Dr.ª Izabella Carneiro Bastos

POÇOS DE CALDAS / MG

2026

Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal de Alfenas
Biblioteca Campus Poços de Caldas

Quinelato, Luiz Gustavo Lima.
Identificação de perfis de bateria para composição de sistemas híbridos / Luiz Gustavo Lima Quinelato. - Poços de Caldas, MG, 2026.
137 f. : il. -

Orientador(a): Isabella Carneiro Bastos.
Dissertação (Mestrado em Engenharia Química) - Universidade Federal de Alfenas, Poços de Caldas, MG, 2026.
Bibliografia.

1. Baterias de íons de lítio. 2. Baterias de íons de sódio. 3. , baterias de chumbo-ácido. 4. Sistemas híbridos. 5. Energias renováveis. I. Bastos, Isabella Carneiro, orient. II. Título.

Ficha gerada automaticamente com dados fornecidos pelo autor.

LUIZ GUSTAVO LIMA QUINELATO

IDENTIFICAÇÃO DE PERFIS DE BATERIA PARA COMPOSIÇÃO DE SISTEMAS HÍBRIDOS

A Presidente da banca examinadora abaixo assina a aprovação da Dissertação apresentada como parte dos requisitos para a obtenção do título de Mestre em Engenharia Química pela Universidade Federal de Alfenas. Área de concentração: Engenharia Química.

Aprovada em: 30 de março de 2026.

Profa. Dra. Izabella Carneiro Bastos

Presidente da Banca Examinadora

Instituição: Universidade Federal de Alfenas

Prof. Dr. Alberto Luiz Francato

Instituição: Universidade Estadual de Campinas

Prof. Dr. Paulo Sérgio Franco Barbosa

Instituição: Universidade Estadual de Campinas

Documento assinado eletronicamente por **Izabella Carneiro Bastos**, **Professor do Magistério Superior**, em 07/04/2026, às 04:43, 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 https://sei.unifal-mg.edu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1751305** e o código CRC **DDB72887**.

Dedico este trabalho a todos que sempre acreditaram em mim e me incentivaram todos os dias.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente à minha família, pelo apoio incondicional, amor e incentivo constantes durante toda a minha trajetória.

À minha namorada, pela compreensão, paciência e carinho ao longo de todo o processo.

À minha orientadora, que com dedicação, competência e generosidade, me guiou e inspirou a cada etapa do trabalho.

À Universidade Federal de Alfenas (UNIFAL-MG), por oferecer uma estrutura de excelência e suporte acadêmico que tornaram possível a realização deste mestrado.

À empresa Essentia, pela parceria e pelo apoio durante o desenvolvimento do projeto, que enriqueceram ainda mais esta experiência acadêmica e profissional.

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

RESUMO

A crescente inserção de fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, impõe desafios à estabilidade do sistema elétrico, tornando essencial o desenvolvimento de soluções eficientes de armazenamento de energia. Nesse contexto, este trabalho apresenta uma análise comparativa do desempenho de baterias de íons de lítio, íons de sódio e chumbo-ácido em sistemas híbridos de geração solar e eólica. A simulação foi realizada no MATLAB/Simulink, avaliando parâmetros como faixa de tensão, tempo de carregamento, comportamento da corrente e trajetória do estado de carga. No sistema solar, as baterias de íons de lítio e chumbo-ácido apresentaram tempos de carregamento significativamente inferiores (3.900s e 3.800s), com faixas de tensão entre 80–105 V e 78–100 V, respectivamente, enquanto as baterias de íons de sódio apresentaram maior tempo de carregamento (15.800s) e faixa mais restrita (70–85 V). Já no sistema eólico, as baterias de íons de lítio mantiveram o melhor desempenho (3.650s; 80–105 V), seguidas pelas de chumbo-ácido (6.400s; 78–102 V), enquanto as de íons de sódio apresentaram comportamento intermediário (≈7.000s para 30–70% SOC; 83,5–84,7 V), evidenciando maior limitação operacional. Em termos de estabilidade, as baterias de íons de lítio demonstraram comportamento de corrente mais uniforme, com rápida estabilização após oscilações iniciais e trajetória de SOC linear e contínua. As baterias de chumbo-ácido apresentaram oscilações ao longo do carregamento, com variações de tensão entre aproximadamente 78 V e 102 V, porém com desempenho consistente após estabilização. Já as baterias de íons de sódio exibiram maior instabilidade inicial, com oscilações mais acentuadas e resposta mais lenta, apesar de apresentarem estabilização posterior. Os resultados evidenciam que as baterias de íons de lítio apresentam o melhor desempenho global em sistemas híbridos, especialmente em aplicações que demandam rapidez e estabilidade. As baterias de chumbo-ácido se mostram uma alternativa viável com desempenho intermediário, enquanto as baterias de íons de sódio, embora promissoras, ainda apresentam limitações relevantes, principalmente associadas ao maior tempo de carregamento e menor faixa de operação.

Palavras-chave: baterias de íons de lítio, baterias de íons de sódio, baterias de chumbo-ácido, sistemas híbridos, energias renováveis.

ABSTRACT

The increasing integration of intermittent renewable energy sources, such as solar and wind, poses challenges to power system stability, making the development of efficient energy storage solutions essential. In this context, this study presents a comparative analysis of the performance of lithium-ion, sodium-ion, and lead-acid batteries in hybrid solar and wind generation systems. Simulations were carried out in MATLAB/Simulink, evaluating parameters such as voltage range, charging time, current behavior, and state-of-charge (SOC) trajectory. In the solar system, lithium-ion and lead-acid batteries exhibited significantly shorter charging times (3,900 s and 3,800 s), with voltage ranges of 80–105 V and 78–100 V, respectively, while sodium-ion batteries showed a longer charging time (15,800 s) and a narrower voltage range (70–85 V). In the wind system, lithium-ion batteries maintained the best performance (3,650 s; 80–105 V), followed by lead-acid batteries (6,400 s; 78–102 V), whereas sodium-ion batteries presented intermediate behavior (≈7,000 s to reach 30–70% SOC; 83.5–84.7 V), indicating greater operational limitations. In terms of stability, lithium-ion batteries demonstrated a more uniform current profile, with rapid stabilization after initial oscillations and a linear, continuous SOC trajectory. Lead-acid batteries exhibited oscillations during the charging process, with voltage variations between approximately 78 V and 102 V, but maintained consistent performance after stabilization. Sodium-ion batteries showed higher initial instability, with more pronounced oscillations and slower response, although stabilization was observed over time. The results indicate that lithium-ion batteries present the best overall performance in hybrid systems, especially in applications requiring fast response and operational stability. Lead-acid batteries represent a viable intermediate alternative, while sodium-ion batteries, although promising, still present relevant limitations, particularly related to longer charging times and narrower operating ranges.

***Keywords**: lithium-ion batteries, sodium-ion batteries, lead-acid batteries, hybrid systems, renewable energy.*

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estrutura de uma Célula Fotovoltaica. 10
Figura 2 - Distribuição média anual da irradiação solar no território brasileiro 13
Figura 3 - Componentes de uma turbina eólica. 17
Figura 4 - Velocidade média anual dos ventos no Brasil a 100 m de altura. ... 19
Figura 5 - Esquema de uma célula de bateria de íons de lítio, destacando o transporte de íons entre ânodo e cátodo através do eletrólito. 26
Figura 6 - Impacto da temperatura nos processos de carga e descarga. 28
Figura 7 - Medição e monitoramento de parâmetros críticos (SOC e SOH). .. 30
Figura 8 - Curva de tensão de uma célula LiFePO4, em função do Estado de Carga e da Profundidade de Descarga. 32
Figura 9 - Relação entre a capacidade da bateria e o número de ciclos de vida. 34
Figura 10 - Esquema de funcionamento de uma bateria de íons de sódio. 38
Figura 11 - Estrutura interna de uma célula de bateria chumbo-ácido. 45
Figura 12 - Variação da tensão da bateria de chumbo-ácido em função da profundidade de descarga. 47
Figura 13 - Redução da vida útil projetada da bateria chumbo-ácido em função da elevação da temperatura. 49
Figura 14 - Esquema de funcionamento de um sistema híbrido. 54
Figura 15 - Adições anuais globais de capacidade de armazenamento em baterias em escala de rede elétrica (2017–2022). 64
Figura 16 - Evolução da capacidade global adicionada de armazenamento por baterias (2010–2023). 65
Figura 17 - Evolução da Capacidade Instalada Existente e Contratada do SIN (2026–2035). 66
Figura 18 - Expansão em capacidade e em energia da minigeração distribuída (2026–2035). 67
Figura 19 - Projeções de Demanda do Cenário de Referência (2026–2035). 68
Figura 20 - Fluxograma da metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo. 71
Figura 21 - Diagrama do sistema fotovoltaico com conversor boost e MPPT no Simulink. 73

Figura 22 - Parâmetros do arranjo fotovoltaico configurado no bloco PV Array. 74
Figura 23 - Diagrama do sistema de controle MPPT baseado no método P&O. 75
Figura 24 - Código MATLAB implementando o algoritmo de rastreamento MPPT.....77
Figura 25 - Sistema completo modelado no Simulink, integrando geração, conversão e controle. 78
Figura 26 - Parâmetros do bloco Wind Turbine. 80
Figura 27 - Curvas características de potência da turbina eólica. 81
Figura 28 - Sistema eólico com PMSG e retificador trifásico modelado no Simulink. 83
Figura 29 - Modelagem do sistema de carregamento em três estágios para bateria de íons de lítio no Simulink. 85
Figura 30 - Definição dos parâmetros gerais da bateria de íons de lítio no bloco Battery. 87
Figura 31 - Configuração dos parâmetros de descarga e limites operacionais da bateria de íons de lítio. 87
Figura 32 - Modelagem do sistema de carregamento em três estágios para bateria de íons de sódio no Simulink. 89
Figura 33 - Definição dos parâmetros gerais da bateria de íons de sódio no bloco Battery. 91
Figura 34 - Configuração dos parâmetros de descarga e limites operacionais da bateria de íons de sódio. 92
Figura 35 - Modelagem do sistema de carregamento em três estágios para bateria de chumbo-ácido no Simulink. 94
Figura 36 - Definição dos parâmetros gerais da bateria chumbo-ácido no bloco Battery. 95
Figura 37 - Configuração dos parâmetros de descarga e limites operacionais da bateria chumbo-ácido. 96
Figura 38 - Integração do sistema fotovoltaico com a bateria de íons de lítio.98
Figura 39 - Código MATLAB para geração dos gráficos de tensão, SOC e corrente. 99
Figura 40 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Solar +

Íon-Lítio). 100
Figura 41 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Solar + Íon-Sódio). 102
Figura 42 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Solar + Chumbo-Ácido). 104
Figura 43 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Eólico + Íon-Lítio). 106
Figura 44 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Eólico + Íon-Sódio). 108
Figura 45 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Eólico + Chumbo-Ácido). 110
Figura 46 - Comparação Gráfica do Sistema Solar + Baterias: Desempenho de Tensão e Estado de Carga. 111
Figura 47 - Comparação Gráfica do Sistema Eólico + Baterias: Desempenho de Tensão e Estado de Carga. 113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Principais Estratégias de Controle em Sistemas Híbridos. 57
Tabela 2 - Desempenho das Baterias no Sistema Solar. 116
Tabela 3 - Desempenho das Baterias no Sistema Eólico. 116
Tabela 4 - Comparativo da segurança térmica entre diferentes tecnologias de baterias 119

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ºC	Graus Celsius
A	Ampère
AC	Corrente Alternada
Ah	Ampère-hora
AM	Massa de ar
ANEEL	Agência Nacional de Energia Elétrica
a-Si	Silício amorfo
BMS	Sistemas avançados de gerenciamento de baterias
CC	Corrente constante
CdTe	Telureto de cádmio
CIGS	Disseleniato de cobre, índio e gálio
CO_2	Dióxido de Carbono
CP	Consulta Pública
Cp	Coeficiente de potência
C-rate	Taxa de carga
CV	Tensão constante
DC	Corrente contínua
DoD	Profundidade de descarga
EPR	Responsabilidade estendida do produtor
ESS	Sistemas de armazenamento de energia
FF	Fator de Forma
HER	Reação de Evolução de Hidrogênio
I	Corrente
I0	Corrente de saturação do diodo
IA	Inteligência artificial
ICMS	Imposto sobre Circulação de Mercadorias e Serviços
IEA	Agência Internacional de Energia
IL	Corrente gerada pela luz
Imp	corrente no ponto de máxima potência

Ir	Irradiância
ISC	Corrente de curto-circuito
I-V	Corrente versus tensão
kWh	Quilowatt-hora
LCOE	Custo nivelado de energia
LCA	*Life Cycle Assessment*
$Li(NiMnCo)O_2$ (NMC)	Níquel-manganês-cobalto
Li^+	Íons de lítio
LIBs	Baterias de íons de lítio
LiC_6	Lítio-carbono
$LiCoO_2$	Dióxido de cobalto e lítio
$LiFePO_4$	Fosfato de ferro e lítio
$LiPF_6$	Hexafluorofosfato de lítio
m/s	Metros por segundo
mAh/g	Miliampère-hora por grama
MOSFET	Transistor de Efeito de Campo de Metal-Óxido-Semicondutor
MPP	Ponto de Máxima Potência
MPPT	Rastreamento do Ponto de Máxima Potência
Na^+	Íons de Sódio
NaCl	Cloreto de Sódio
NaS	Sódio-enxofre
NASICON	Condutor Super Iônico de Sódio
OCV	Tensão em circuito aberto
OER	Reação de Evolução de Oxigênio
off-grid	Isolados da rede
on-grid	Conectados à rede
P	Potência elétrica
P&O	Perturbação e Observação
P_ant	Potência anterior
$PbSO_4$	Sulfato de chumbo
PCM	Materiais de mudança de fase

Pi	Potência Incidente
pitch	Ângulo das pás
PMSG	Gerador síncrono com ímã permanente
PNRS	Política Nacional de Resíduos Sólidos
Po	Potência Útil
ppm	Parte por milhão
pu	Por unidade
PV Array	Arranjo fotovoltaico
PWM	Circuito de controle por modulação por largura de pulso
R	Resistência interna
RC	Resistência-capacitância
REN	Resolução Normativa
RS	Resistência em série
Rsh	Resistência de shunt
s	Segundos
SEI	Camada de interface sólida do eletrólito
SIN	Sistema Interligado Nacional
SOC	Estado de Carga
SOH	Estado de Saúde
STC	Testes Laboratoriais Sob Condições Padrão
T	Temperatura
TC	Corrente decrescente intermediária
Tipo N	Negativo
Tipo P	Positivo
Tm	Torque mecânico
TMS	Sistemas de gerenciamento térmico avançados
USD	Dólar americano
UV	Ultravioleta
V	Tensão
V - V_ant	Diferença de tensão entre os ciclos
Vmp	Tensão no ponto de máxima potência
VOC	Tensão de circuito aberto

Vref	Tensão de referência
VRLA	Chumbo-Ácido Regulada por Válvula
W/m²	Watt por metro quadrado
Wh/kg	Watt-hora por quilograma
Wh/L	Watt-hora por litro

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO 7

2 OBJETIVOS 8

2.1 OBJETIVO GERAL 8

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS 8

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA 9

3.1 FUNDAMENTOS DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA E COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS SOLARES 9

3.1.1 Princípios físicos da conversão de energia solar em eletricidade 9

3.1.2 Arquiteturas e classificações de sistemas fotovoltaicos 11

3.1.3 Influência de variáveis ambientais sobre o desempenho dos módulos 12

3.1.4 Curvas I-V e características elétricas sob diferentes condições operacionais 13

3.1.5 Eficiência de conversão, degradação dos módulos e avanços tecnológicos em materiais fotovoltaicos 14

3.1.6 Perspectivas futuras para o uso de energia solar em larga escala 15

3.2 DINÂMICA DA CONVERSÃO EÓLICA E DESEMPENHO DE TURBINAS 16

3.2.1 Fundamentos físicos da conversão de energia cinética do vento em energia elétrica 16

3.2.2 Tipos e configurações de turbinas eólicas 18

3.2.3 Parâmetros críticos de desempenho 19

3.2.4 Efeitos da densidade do ar, altitude e rugosidade do terreno sobre a geração eólica 20

3.2.5 Tecnologias emergentes em aerogeradores 21

3.2.6 Análise comparativa da estabilidade da geração eólica frente a outras fontes renováveis 22

3.3 BATERIAS DE LÍTIO: MECANISMOS ELETROQUÍMICOS, DESEMPENHO OPERACIONAL E DESAFIOS TECNOLÓGICOS 23

3.3.1 Intercalamento e desintercalamento de íons de lítio no ânodo 23

3.3.2 Oxidação e redução dos materiais ativos no cátodo 24
3.3.3 Transferência de íons de lítio pelo eletrólito e seu impacto no desempenho. 25
3.3.4 Impacto da temperatura nos processos de carga e descarga.....27
3.3.5 Medição e monitoramento de parâmetros críticos (SOC) e (SOH) ..29
3.3.6 Efeitos da profundidade de descarga (DoD) 31
3.3.7 Ciclo de vida e durabilidade 33
3.3.8 Segurança e estabilidade.....34
3.3.9 Custos e viabilidade econômica.....35
3.3.10 Sustentabilidade e impacto ambiental.....36
3.4 BATERIAS DE SÓDIO: FUNDAMENTOS ELETROQUÍMICOS E PERSPECTIVAS PARA APLICAÇÕES ENERGÉTICAS 37
3.4.1 Mecanismo de armazenamento e transporte de íons de sódio 37
3.4.2 Eficiência energética e parâmetros críticos de operação 39
3.4.3 Ciclo de vida, degradação e estabilidade de materiais catódicos e anódicos.....40
3.4.4 Comportamento térmico, segurança e gerenciamento térmico em aplicações práticas 41
3.4.5 Análise econômica: custo, abundância do sódio e viabilidade comercial.....42
3.4.6 Sustentabilidade, descarte e potencial para reciclagem.....43
3.5 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO: ANÁLISE TÉCNICA E AMBIENTAL DE UMA TECNOLOGIA CONSOLIDADA 44
3.5.1 Reações eletroquímicas e estrutura típica das células de chumbo-ácido 44
3.5.2 Eficiência, tensão, taxa de descarga e limitações de profundidade de descarga 46
3.5.3 Mecanismos de envelhecimento, sulfatização e manutenção preventiva 47
3.5.4 Segurança operacional, liberação de gases e estabilidade térmica 48
3.5.5 Custo de produção, disponibilidade de chumbo e desempenho comparativo.....50
3.5.6 Potencial de reciclagem e impacto ambiental da cadeia do chumbo

51
3.6 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA 52
3.6.1 Introdução aos sistemas híbridos 52
3.6.2 Armazenamento em baterias em sistemas híbridos 54
3.6.3 Estratégias de controle 55
3.6.4 Hibridização entre diferentes tecnologias de baterias 57
3.7 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE BATERIAS 59
3.7.1 Tipos de modelos de baterias 59
3.7.2 Parâmetros na modelagem de baterias 60
3.7.3 Modelagem e simulações de baterias de lítio utilizando Matlab/Simulink 61
3.7.4 Desafios e limitações na modelagem e simulação 62
3.8 PANORAMA GLOBAL E NACIONAL DO MERCADO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA 63
3.8.1 Crescimento do mercado global de baterias e sistemas de armazenamento 63
3.8.2 Panorama do mercado brasileiro de armazenamento de energia 66
3.9 ASPECTOS REGULATÓRIOS E NORMATIVOS APLICÁVEIS A SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO NO BRASIL 69
4 METODOLOGIA 70
4.1 MODELAGEM DE UM SISTEMA SOLAR 72
4.2 MODELAGEM DE UM SISTEMA EÓLICO 79
4.3 MODELAGEM DAS BATERIAS 84
4.3.1 Bateria de Íons de Lítio 84
4.3.2 Baterias de Íons de Sódio 89
4.3.3 Baterias de Chumbo-Ácido 93
4.4 MODELAGEM DOS SISTEMAS HÍBRIDOS 97
5 ANÁLISE DE RESULTADOS 100
5.1 SISTEMA SOLAR + BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO 100
5.2 SISTEMA SOLAR + BATERIA DE ÍONS DE SÓDIO 101
5.3 SISTEMA SOLAR + BATERIA CHUMBO-ÁCIDO 103
5.4 SISTEMA EÓLICO + BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO 105
5.5 SISTEMA EÓLICO + BATERIA DE ÍONS DE SÓDIO 107

5.6 SISTEMA EÓLICO + BATERIA CHUMBO-ÁCIDO 109
5.7 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS HÍBRIDOS 111
5.8 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A SEGURANÇA TÉRMICA DAS BATERIAS 118
6 CONCLUSÕES 121
REFERÊNCIAS 123

1 INTRODUÇÃO

Os sistemas híbridos de energia têm emergido como uma solução promissora para enfrentar os desafios associados à integração de fontes renováveis intermitentes e à crescente demanda por eletricidade. A combinação de diferentes fontes de energia renovável, como solar e eólica, com sistemas de armazenamento de energia (ESS), especialmente baterias, melhora a eficiência e a confiabilidade da geração de energia. Estes sistemas permitem uma maior flexibilidade, mitigando as flutuações na produção de energia renovável e reduzindo a dependência da rede elétrica convencional (ENGELHARDT et al., 2022; LI et al., 2023).

A importância dos sistemas híbridos reside na sua capacidade de combinar as vantagens de várias fontes de energia, maximizando o aproveitamento dos recursos naturais disponíveis. A incorporação de baterias em sistemas híbridos é essencial para equilibrar a oferta e a demanda de energia, proporcionando armazenamento temporário durante os períodos de baixa produção e liberando energia durante os picos de consumo. Este equilíbrio é crucial para a estabilização da rede elétrica e para a promoção de um uso mais sustentável da energia (VERMAAK; KUSAKANA, 2014; CUNHA et al., 2016).

A pesquisa e o desenvolvimento de perfis de bateria específicos para diferentes aplicações em sistemas híbridos são cruciais para maximizar a eficiência e a longevidade dessas soluções de armazenamento. A identificação de perfis de bateria envolve a análise de parâmetros como a capacidade de carga, a taxa de descarga, a eficiência energética e a durabilidade em diferentes condições operacionais. Este conhecimento permite a customização de sistemas de armazenamento para atender às necessidades específicas de cada aplicação, seja em micro redes, estações de carregamento rápido de veículos elétricos ou em integrações de energia renovável (KIM et al., 2013; GHODDAMI et al., 2012).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

O objetivo geral deste projeto de pesquisa é explorar e identificar perfis de bateria adequados para a composição de sistemas híbridos de energia, com foco na otimização do desempenho energético e na sustentabilidade. Este estudo visa compreender melhor como diferentes tecnologias de baterias podem ser integradas de forma eficiente com fontes renováveis, como solar e eólica, para melhorar a estabilidade e a eficiência dos sistemas elétricos.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar as características de diferentes tecnologias de baterias, investigando as propriedades e o respectivo desempenho, para determinar suas adequações e eficiência em sistemas híbridos.
- Desenvolver estratégias de gerenciamento energético por meio da criação e validação de algoritmos de controle capazes de otimizar o uso de baterias em sistemas híbridos, considerando aspectos de eficiência energética e durabilidade.
- Avaliar a integração de baterias em diferentes configurações de sistemas híbridos (solar e eólico), estudando essas integrações em combinações específicas, analisando o impacto na eficiência geral do sistema.
- Realizar simulações detalhadas e estudos de caso para validar as estratégias propostas e avaliar seu desempenho em condições simuladas de operação.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 FUNDAMENTOS DA CONVERSÃO FOTOVOLTAICA E COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS SOLARES

3.1.1 Princípios físicos da conversão de energia solar em eletricidade

A conversão da energia solar em eletricidade é viabilizada por dispositivos chamados painéis solares fotovoltaicos, que transformam a luz do Sol diretamente em energia elétrica. Esse processo ocorre quando a radiação solar atinge os materiais semicondutores das células solares, provocando o movimento ordenado de cargas elétricas, o que gera corrente elétrica (LIMA et al., 2020; MARIANO; URBANETZ, 2022).

As células mais utilizadas comercialmente são fabricadas a partir de silício cristalino, monocristalino ou policristalino. Sua eficiência depende da qualidade do material, do tipo de estrutura e da intensidade da radiação incidente. Essas células possuem superfícies especiais capazes de captar a luz solar e transformá-la em eletricidade de forma contínua e limpa (MOREIRA JÚNIOR; SOUZA, 2020).

O desempenho dos painéis fotovoltaicos pode ser avaliado por meio da chamada curva característica corrente *versus* tensão (I-V), que indica a potência elétrica gerada sob diferentes condições de operação. Para extrair o máximo de energia possível, os sistemas utilizam controladores eletrônicos capazes de identificar automaticamente o ponto ideal de funcionamento, conhecido como ponto de máxima potência (FERNANDES DE LEVA et al., 2016).

O Brasil, com sua ampla incidência solar, especialmente nas regiões Nordeste e Centro-Oeste, apresenta potencial médio de geração que pode superar países líderes na aplicação dessa tecnologia, como Alemanha e Japão (MOREIRA JÚNIOR; SOUZA, 2020; VELOSO, 2022).

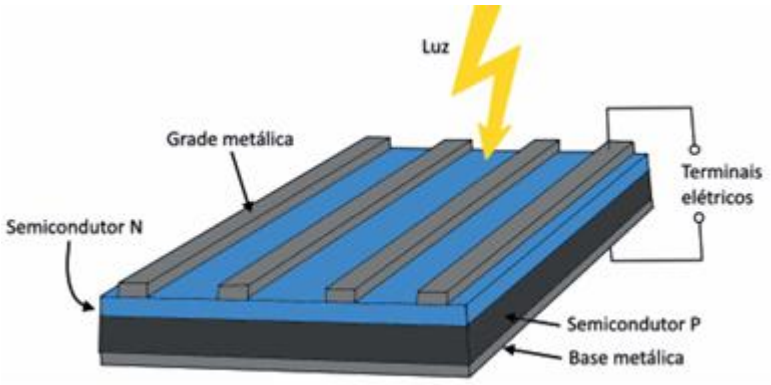
Nos últimos anos, novas tecnologias têm surgido para aumentar a eficiência dos sistemas, como os painéis solares flutuantes. Ao serem instalados sobre reservatórios de água, esses sistemas mantêm os painéis em temperaturas mais baixas, o que melhora seu desempenho energético. Estudos indicam que esse tipo de instalação pode aumentar a geração em até 10% em comparação aos sistemas tradicionais em solo (KOONDHAR et al., 2024).

Mesmo com os avanços, parte significativa da energia solar captada ainda é dissipada como calor. Estima-se que até 80% da radiação solar não é convertida em eletricidade de forma direta, o que impulsiona pesquisas voltadas à aplicação de modelos computacionais para prever e otimizar o funcionamento dos sistemas, considerando variáveis como temperatura, umidade e irradiância (AL-DAHIDI et al., 2024).

Além dos princípios fundamentais do efeito fotovoltaico, é importante compreender a estrutura física das células solares, pois sua composição afeta diretamente a eficiência e o comportamento do sistema. A célula fotovoltaica é composta por camadas de materiais semicondutores, geralmente silício tipo P (positivo) e tipo N (negativo), dispostos de forma a criar um campo elétrico interno. Essa configuração permite que, ao ser atingida pela luz solar, ocorra a separação das cargas geradas, direcionando os elétrons e buracos para polos opostos, o que possibilita o fluxo de corrente elétrica externa (OLIVEIRA et al., 2019).

Na figura 1 a seguir, observa-se a disposição típica dos elementos constituintes de uma célula fotovoltaica: a grade metálica superior, por onde a luz incide, os semicondutores tipo N e P, os terminais elétricos e a base metálica. Esse arranjo é projetado para maximizar a absorção de luz e minimizar perdas por reflexão ou resistência. A compreensão dessa estrutura é essencial para analisar o desempenho de diferentes tipos de módulos e avaliar melhorias tecnológicas em células de nova geração.

Figura 1 - Estrutura de uma Célula Fotovoltaica.



Fonte: OLIVEIRA et al. (2019).

3.1.2 Arquiteturas e classificações de sistemas fotovoltaicos

Os sistemas fotovoltaicos podem ser classificados de acordo com a forma como se relacionam com a rede elétrica convencional. As três principais configurações são: sistemas conectados à rede (*on-grid*), sistemas isolados da rede (*off-grid*) e sistemas híbridos ou autônomos com apoio de múltiplas fontes ou armazenamento (FERNANDES DE LEVA et al., 2016; KOONDHAR et al., 2024).

Nos sistemas *on-grid*, a energia gerada é consumida diretamente e o excedente é injetado na rede pública, sendo compensado posteriormente na fatura por meio de créditos energéticos. Esse modelo é regulamentado pela ANEEL desde a Resolução Normativa nº 482/2012 e atualizado pela REN nº 687/2015, que viabilizaram a geração distribuída no Brasil (VELOSO, 2022; MONTEIRO; SILVEIRA, 2022). Trata-se da configuração mais utilizada em áreas urbanas com rede estável, pois dispensa o uso de baterias, reduzindo o custo e simplificando a operação (DANTAS; POMPERMAYER, 2018).

Por outro lado, os sistemas *off-grid* operam de forma totalmente independente da rede elétrica, sendo frequentemente adotados em comunidades isoladas, zonas rurais e regiões sem acesso confiável à eletricidade convencional. Nesses sistemas, torna-se essencial o uso de baterias para armazenamento de energia, além de controladores de carga e inversores adequados (FERNANDES DE LEVA et al., 2016). Embora o custo inicial seja mais elevado, essa solução representa um meio eficaz de promover a universalização do acesso à energia (RODRIGUES et al., 2024).

Já os sistemas híbridos combinam a energia solar com outras fontes, como eólica, geradores a diesel ou biomassa, e geralmente incluem um sistema de armazenamento para garantir maior confiabilidade e autonomia energética. São comuns em regiões onde a energia solar isoladamente não é suficiente para atender à demanda contínua, como em locais com forte sazonalidade solar (KOONDHAR et al., 2024). Esse tipo de arquitetura favorece a redução do uso de combustíveis fósseis e pode garantir o funcionamento de cargas críticas em situações emergenciais (RODRIGUES et al., 2024).

A escolha entre essas arquiteturas deve considerar fatores como o perfil de consumo local, custo-benefício a longo prazo, disponibilidade de recursos e clima regional. Sistemas *on-grid* tendem a ser mais acessíveis economicamente, enquanto os sistemas *off-grid* e híbridos proporcionam maior autonomia, embora com custos

mais elevados (DANTAS; POMPERMAYER, 2018). Além disso, a tendência de crescimento da geração distribuída no Brasil tem impulsionado o desenvolvimento de tecnologias como inversores inteligentes, que aumentam a flexibilidade e a eficiência da instalação (KOONDHAR et al., 2024; AL-DAHIDI et al., 2024).

3.1.3 Influência de variáveis ambientais sobre o desempenho dos módulos

O desempenho dos módulos fotovoltaicos é diretamente afetado por variáveis ambientais como irradiância solar, temperatura ambiente, orientação e sombreamento. Esses fatores interferem na eficiência de conversão da radiação solar em energia elétrica, sendo fundamentais para o dimensionamento e posicionamento adequado dos sistemas solares (LIMA et al., 2020).

A irradiância solar é a variável mais determinante, pois quanto maior a radiação incidente sobre o módulo, maior será a corrente gerada e, consequentemente, a potência de saída. A curva I-V se desloca positivamente com o aumento da irradiância, mantendo a tensão praticamente constante, mas ampliando a corrente de curto-circuito (*ISC*) e a potência gerada (VELOSO, 2022; LIMA et al., 2020).

Já a temperatura exerce um impacto negativo sobre a eficiência. À medida que a temperatura de operação do módulo aumenta, a tensão de saída é reduzida, o que pode comprometer significativamente a potência máxima gerada. Estudos demonstram que para cada grau Celsius acima da temperatura padrão de 25 °C, há uma redução proporcional na tensão de circuito aberto (*VOC*), sendo esse efeito mais perceptível em tecnologias de silício cristalino (SILVA et al., 2018; LIMA et al., 2020).

A eficiência de conversão mostra que a potência útil (*Po*) decresce em relação à potência incidente (*Pi*) sob alta temperatura. Além disso, os coeficientes térmicos das células indicam que a corrente aumenta ligeiramente, mas a tensão diminui acentuadamente, resultando na queda do rendimento do sistema (SILVA et al., 2018).

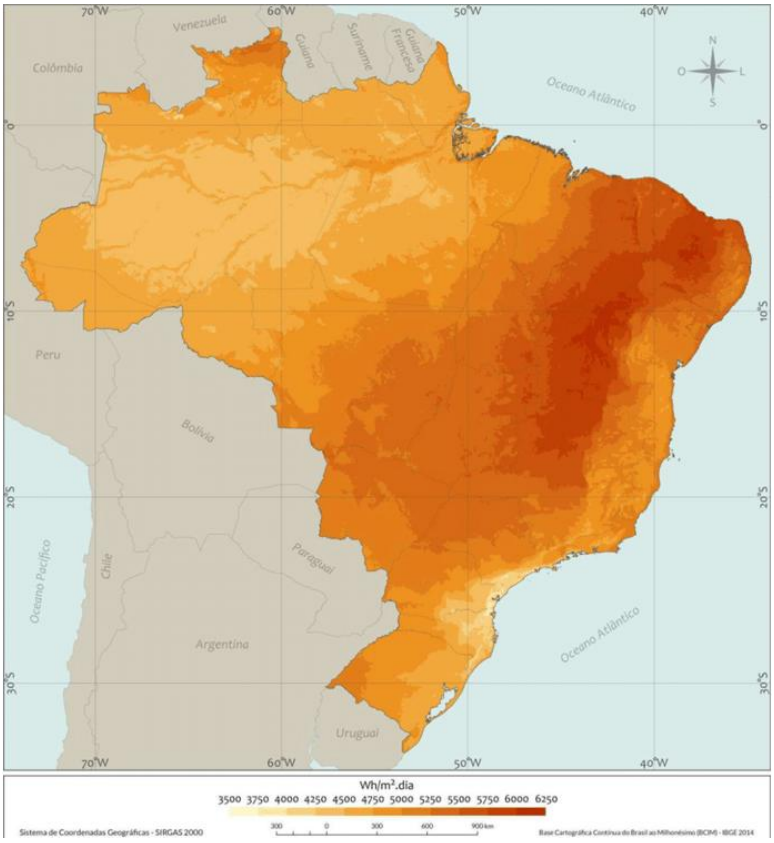
Outro aspecto relevante é a orientação e inclinação dos módulos em relação ao Sol. O desempenho ótimo é obtido quando a superfície do painel está perpendicular à radiação direta. No Brasil, a melhor orientação para captação solar é voltada para o Norte, com o ângulo de inclinação variando de acordo com a latitude local (FERNANDES DE LEVA et al., 2016). Orientações inadequadas ou inclinações imprecisas podem reduzir a captação de energia ao longo do ano.

O sombreamento parcial ou total dos módulos, causado por obstáculos como

árvores, construções ou até acúmulo de sujeira, também compromete a geração elétrica. Mesmo pequenas áreas sombreadas podem afetar significativamente o desempenho, uma vez que os módulos geralmente são ligados em série, e o sombreamento em uma célula pode limitar o desempenho de todo o conjunto de painéis (ROSENTHAL et al., 2017).

Podemos observar na figura 2 abaixo, que a localização geográfica é outro fator de extrema importância, pois ela influencia a quantidade média de energia gerada por metro quadrado ao longo do ano. Regiões como o Nordeste brasileiro apresentam índices médios de 5,0 a 6,5 kWh/m²/dia (DANTAS; POMPERMAYER, 2018; VELOSO, 2022).

Figura 2 - Distribuição média anual da irradiação solar no território brasileiro



Fonte: MACHADO, P.L.O.et al. (2019)

3.1.4 Curvas I-V e características elétricas sob diferentes condições operacionais

A curva corrente *versus* tensão é uma ferramenta central para descrever o comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos. A partir dela, é possível identificar

o ponto de máxima potência (MPP), que representa o ponto ideal de operação do sistema, e que varia conforme as condições de campo (LIMA et al., 2020).

Em testes laboratoriais sob condições padrão (STC), os módulos são avaliados com irradiância de 1000 W/m², temperatura de célula de 25 °C e espectro AM 1.5. Nessa condição, parâmetros como a tensão de circuito aberto, corrente de curto-circuito e o fator de forma (FF) são obtidos, compondo a base para cálculos de rendimento energético (SILVA et al., 2018).

No entanto, em operação real, esses parâmetros sofrem variações significativas. A curva I-V desloca-se conforme as mudanças na irradiância e na temperatura, o que exige que os sistemas utilizem controladores capazes de rastrear continuamente o MPP, processo conhecido como *Maximum Power Point Tracking* (MPPT). Esse rastreamento garante que o sistema opere no ponto de maior aproveitamento energético, mesmo sob flutuações ambientais (FERNANDES DE LEVA et al., 2016).

Complementando o que foi dito anteriormente, irregularidades como sombreamento parcial, sujeira ou falhas nos módulos alteram significativamente a forma da curva I-V, podendo criar múltiplos picos de potência e reduzir a eficiência do sistema. Para mitigar esse efeito, é comum a instalação de diodos de *by-pass*, que contornam as áreas comprometidas do módulo e evitam a perda de desempenho do conjunto (ROSENTHAL et al., 2017).

A compreensão aprofundada da curva I-V é essencial para a análise de desempenho, detecção de falhas e dimensionamento correto dos inversores, especialmente em projetos que envolvem diferentes tecnologias de módulos ou condições de instalação específicas (FERNANDES DE LEVA et al., 2016).

3.1.5 Eficiência de conversão, degradação dos módulos e avanços tecnológicos em materiais fotovoltaicos

A eficiência de conversão fotovoltaica representa a razão entre a energia elétrica gerada e a energia solar incidente sobre a área útil do módulo. Esse valor depende de diversos fatores como a tecnologia utilizada, condições ambientais e características estruturais da célula. Em condições padrão de teste, módulos de silício monocristalino apresentam eficiências típicas entre 17% e 21%, enquanto os de silício policristalino variam entre 14% e 17% (MOREIRA JÚNIOR; SOUZA, 2020; LIMA et al.,

2020).

Módulos com tecnologias mais recentes, como os bifaciais e de contato traseiro (*back contact*), podem atingir eficiências superiores a 22%, sendo indicados para aplicações com limitação de área disponível (LIMA et al., 2020). Já os módulos de filme fino, como telureto de cádmio (CdTe), disseleniato de cobre, índio e gálio (CIGS), ou silício amorfo (a-Si), apresentam eficiências comerciais que variam entre 6% e 14%, sendo mais indicados para aplicações arquitetônicas ou de grande escala com baixa exigência de eficiência por área (FERNANDES DE LEVA et al., 2016).

Ao longo do tempo, os módulos fotovoltaicos sofrem processos de degradação natural, os quais podem reduzir sua capacidade de geração. Essa degradação pode ser causada por fatores como exposição prolongada à radiação UV, ciclos térmicos diários e umidade. Estudos mostram que, em média, os módulos perdem entre 0,5% e 1% de eficiência ao ano, sendo os de silício cristalino mais resistentes, enquanto os de filme fino apresentam maiores taxas de perda (SILVA et al., 2018; VELOSO, 2022).

A adoção dessas novas tecnologias, no entanto, ainda depende da superação de desafios como estabilidade térmica, degradação acelerada, uso de materiais tóxicos e escalabilidade de produção. Mesmo assim, a tendência do setor é caminhar para módulos mais eficientes, leves, integráveis a edificações e com menor impacto ambiental (MOREIRA JÚNIOR; SOUZA, 2020; ROSENTHAL et al., 2017).

3.1.6 Perspectivas futuras para o uso de energia solar em larga escala

As perspectivas para o uso da energia solar em larga escala são altamente promissoras, tanto no Brasil quanto em nível global. Esse otimismo se justifica pelo contínuo avanço tecnológico, redução dos custos de instalação e forte demanda por fontes renováveis em meio à transição energética global (VELOSO, 2022; RODRIGUES et al., 2024).

Estudos recentes indicam que a energia solar fotovoltaica pode atender entre 25% e 49% da demanda global de eletricidade até 2050, com potencial para evitar a emissão de até 180 gigatoneladas de CO_2 no período entre 2017 e 2060. Isso se alinha ao cenário de descarbonização energética estabelecido no Acordo de Paris e nas metas da COP21, ampliando a importância estratégica dessa fonte para o cumprimento dos compromissos climáticos (WANG et al., 2021).

No Brasil, as projeções também são animadoras. A *Bloomberg New Energy*

Finance estima que, até 2040, a energia solar representará 32% da matriz energética brasileira, superando inclusive a participação atual das hidrelétricas em alguns cenários. O país apresenta vantagens estruturais, como ampla incidência solar ao longo do ano e grande extensão territorial, além de um histórico de predominância de energias renováveis (SAUAIA, 2019).

O crescimento futuro dependerá, porém, da superação de barreiras institucionais e econômicas, como a ampliação de incentivos fiscais, programas de financiamento acessíveis, desoneração de tributos como ICMS sobre energia compensada e criação de políticas públicas de longo prazo (MONTEIRO; SILVEIRA, 2022).

No aspecto tecnológico, espera-se uma ampla disseminação de sistemas flutuantes e bifaciais, otimizando o uso da energia conforme a demanda. Tais avanços tornarão a energia solar mais estável e competitiva frente às fontes convencionais (GÉLIO; CÉSAR, 2021).

Em um país de dimensões continentais como o Brasil, a energia solar pode desempenhar um papel essencial na autossuficiência energética de comunidades remotas, contribuindo para o desenvolvimento socioeconômico regional, ampliação do acesso à energia e redução das desigualdades energéticas no país (RODRIGUES et al., 2024). No entanto, para garantir uma matriz mais estável, sobretudo diante da intermitência natural da radiação solar, torna-se essencial considerar a junção com outras fontes renováveis, como a energia eólica, cuja variabilidade pode ser inversamente correlacionada à da solar em determinadas regiões (BAGHAI et al., 2020).

3.2 DINÂMICA DA CONVERSÃO EÓLICA E DESEMPENHO DE TURBINAS

3.2.1 Fundamentos físicos da conversão de energia cinética do vento em energia elétrica

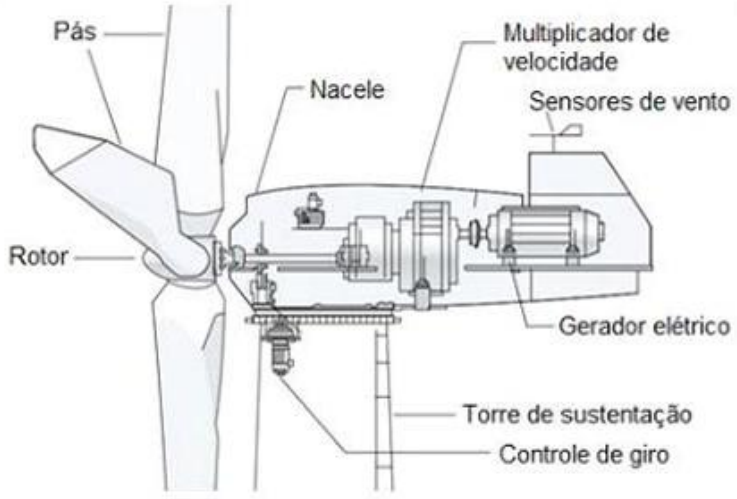
A energia eólica é convertida em eletricidade por meio de turbinas que transformam a energia cinética do vento em energia mecânica e, em seguida, em energia elétrica. O processo tem início quando as pás da turbina, projetadas com perfis aerodinâmicos, captam o vento e o transformam em movimento rotacional. Esse movimento gira um eixo conectado a um gerador, que converte a energia mecânica

em eletricidade (SOLCIA; LESSA, 2024).

A quantidade de energia disponível no vento depende de variáveis como a velocidade, densidade do ar e área de captação das pás. A velocidade do vento, em especial, tem forte influência sobre o potencial de geração elétrica, o que torna essencial a escolha de locais com ventos consistentes e bem distribuídos ao longo do ano (SOLCIA; LESSA, 2024).

Turbinas eólicas modernas são compostas por componentes como pás, rotor, nacele, gerador e sistemas de controle. A nacele abriga os principais elementos eletromecânicos, incluindo o multiplicador de velocidade e os sensores que monitoram variáveis como direção e intensidade do vento. Esses sensores orientam automaticamente a posição das pás, otimizando o desempenho do sistema e prevenindo sobrecargas em situações extremas (IBERDROLA, 2024). Podemos observar esses componentes na figura 3 abaixo:

Figura 3 - Componentes de uma turbina eólica.



Fonte: TELUB (2022).

As turbinas podem ser classificadas em dois tipos principais: as de eixo horizontal, predominantes em parques de grande escala, e as de eixo vertical, mais utilizadas em ambientes urbanos e aplicações específicas como rodovias. Essas últimas possuem a vantagem de operar independentemente da direção do vento, com menor impacto visual e sonoro (CARVALHO, 2020).

Além da estrutura física, o desempenho do sistema depende de condições

atmosféricas como altitude, rugosidade do solo, presença de obstáculos e gradientes de pressão. Por isso, estudos prévios de vento, topografia e clima local são indispensáveis para garantir o melhor aproveitamento do potencial energético e minimizar perdas operacionais (IBERDROLA, 2024).

3.2.2 Tipos e configurações de turbinas eólicas

As turbinas eólicas apresentam diferentes configurações, que se adaptam aos objetivos do empreendimento e do sistema energético correspondente. A mais utilizada mundialmente é a turbina de eixo horizontal, na qual o rotor está posicionado paralelamente ao solo. Esse tipo de turbina apresenta elevado rendimento quando instalado em áreas com ventos estáveis e bem direcionados. Já as turbinas de eixo vertical são indicadas para situações em que há maior turbulência do vento ou limitação de espaço. Elas operam independentemente da direção do vento e têm menor impacto visual e sonoro, o que favorece sua aplicação em projetos de geração distribuída (CARVALHO, 2020; SOLCIA; LESSA, 2024).

As turbinas verticais podem assumir diferentes formas construtivas. Entre os principais modelos estão as turbinas *Savonius*, que funcionam com base no arrasto do vento e são eficientes em baixas velocidades; as *Darrieus*, que utilizam força de sustentação e oferecem maior eficiência, embora exijam maior controle mecânico. Outra opção sõa as *Panemone*, cuja estrutura simples e de custo reduzido viabiliza sua aplicação em projetos experimentais ou de pequena escala (CARVALHO, 2020).

Além da orientação do eixo, as turbinas se diferenciam quanto ao porte e ao modelo de aplicação. As turbinas de pequena escala são geralmente utilizadas para atendimento local, em sistemas isolados ou rurais. Já as turbinas de grande escala integram parques eólicos interligados à rede de transmissão nacional, sendo utilizadas em sistemas de geração centralizada (PORTAL SOLAR, 2024; ALMEIDA, 2021).

Outro critério importante de classificação é o local de instalação, com a diferenciação entre turbinas *onshore*, instaladas em terra firme, e turbinas *offshore*, localizadas em áreas marítimas. As turbinas *offshore* têm ganhado destaque nos últimos anos por estarem expostas a ventos mais constantes e intensos, com menor interferência urbana. Elas podem ser montadas sobre fundações fixas, jaquetas metálicas ou plataformas flutuantes, dependendo da profundidade da água e da topografia do fundo marinho. Apesar dos custos mais elevados de instalação, esse

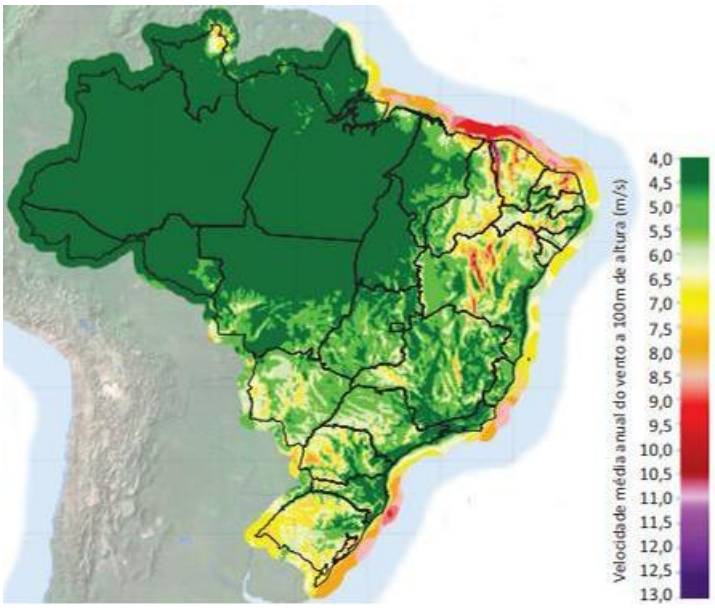
tipo de turbina oferece maior fator de capacidade e maior produção de energia ao longo do tempo, o que tem motivado sua expansão em diversos países, inclusive no Brasil (IBERDROLA, 2024; CNN, 2023).

3.2.3 Parâmetros críticos de desempenho

A avaliação do desempenho de turbinas eólicas envolve a análise de parâmetros técnicos que indicam o grau de eficiência e aproveitamento energético da instalação. Entre os mais relevantes está o fator de capacidade, que representa a relação entre a energia efetivamente gerada e a energia que seria gerada se a turbina operasse continuamente em sua potência nominal durante o mesmo período. Esse indicador depende de fatores como localização geográfica, regime de ventos, tecnologia empregada e estratégias de operação. Dados da ABEEólica (2022) indicam que o fator de capacidade médio no Brasil foi de 41,5% no ano de 2022, com picos superiores a 70% em regiões como o Nordeste durante o segundo semestre, devido à maior estabilidade e intensidade dos ventos.

Podemos observar na figura 4 adiante, que as regiões costeiras do Nordeste e do Sul concentram os maiores valores de velocidade de vento, com destaque para áreas *onshore* e *offshore* com velocidade superior a 7,5 m/s.

Figura 4 - Velocidade média anual dos ventos no Brasil a 100 m de altura.



Fonte: BEZERRA (2021).

Outro parâmetro importante é o coeficiente de potência (Cp), que indica a fração da energia cinética do vento que pode ser convertida em energia mecânica pelo rotor. Embora teoricamente o limite máximo para o Cp seja de 59,3%, conforme estabelecido pelo limite de Betz, os valores práticos alcançados por turbinas comerciais variam entre 30% e 45%, dependendo da aerodinâmica das pás, das condições de operação e da eletrônica de controle utilizada (CUNHA; SILVA; SILVA, 2024).

As curvas de potência também são essenciais na caracterização do desempenho de aerogeradores. Essas curvas relacionam a velocidade do vento com a potência gerada pela turbina e apresentam três zonas principais: a de partida, em que a turbina começa a girar (velocidade de corte inferior); a zona de operação nominal, onde a potência cresce até atingir o valor máximo constante; e a zona de desligamento, quando a velocidade do vento excede o limite superior de segurança e o sistema é automaticamente interrompido (SOLCIA; LESSA, 2024).

3.2.4 Efeitos da densidade do ar, altitude e rugosidade do terreno sobre a geração eólica

A densidade do ar está relacionada à temperatura, altitude e pressão atmosférica. Regiões em baixas altitudes, com ar mais denso, tendem a favorecer a produção de energia por oferecerem maior quantidade de massa de ar em movimento sobre as pás da turbina. Por outro lado, altitudes elevadas apresentam ar mais rarefeito, o que reduz a densidade, mas podem compensar essa perda com ventos mais intensos e constantes, especialmente em áreas de relevo favorável (RIBEIRO, 2017; CUNHA; SILVA; SILVA, 2024).

Outro fator importante é a rugosidade superficial, ou seja, a resistência que o solo oferece ao escoamento do vento. Superfícies planas e com vegetação rasteira ou ausência de obstáculos, como áreas litorâneas, favorecem o escoamento uniforme do vento, reduzindo turbulências e aumentando a eficiência da turbina. Já terrenos acidentados, com edificações, árvores altas ou variações abruptas de relevo, tendem a fragmentar o fluxo de vento, criando zonas de turbulência que prejudicam o desempenho das pás (CUNHA; SILVA; SILVA, 2024).

Essas condições também impactam a escolha da altura das torres e o espaçamento entre as turbinas nos parques eólicos. A implantação ideal busca

minimizar os efeitos negativos da rugosidade e aproveitar áreas elevadas com menor interferência superficial, o que requer estudos topográficos e meteorológicos detalhados. Como reforçam os estudos de campo, o planejamento adequado da localização e da altura das turbinas pode representar um ganho de até 20% na geração esperada (POSSNER; CALDEIRA, 2017).

Atualmente, o uso de sensores ambientais e algoritmos de controle em tempo real, permite ajustar a operação das turbinas conforme as mudanças dessas variáveis externas, assegurando maior estabilidade e eficiência do sistema ao longo do tempo (HANIFI et al., 2024).

3.2.5 Tecnologias emergentes em aerogeradores

O avanço tecnológico no setor eólico tem impulsionado o desenvolvimento de aerogeradores cada vez mais eficientes, silenciosos e adaptáveis a diferentes ambientes. Entre as principais inovações, destaca-se o aumento do porte das turbinas, tanto em altura quanto em diâmetro de rotor, com o objetivo de alcançar camadas atmosféricas com ventos mais intensos e constantes. A evolução estrutural é acompanhada por melhorias nos materiais utilizados, como a substituição de pás metálicas por compostos sintéticos de alta resistência, que reduzem o peso, o ruído e a interferência eletromagnética dos sistemas (LARCO, 2017).

A geração eólica *offshore*, por sua vez, tem impulsionado a adoção de turbinas capazes de operar em águas profundas com estabilidade garantida por estruturas ancoradas ao fundo do mar. Essas turbinas permitem explorar regiões antes inviáveis economicamente, contribuindo para o aumento da capacidade instalada sem competição por espaço terrestre (ENGIE, 2024).

No campo da mini e microgeração, têm ganhado espaço turbinas de eixo vertical com *design* adaptado. Essas turbinas são mais discretas e seguras para áreas povoadas, operando com baixos níveis de ruído e sensibilidade reduzida às mudanças abruptas de direção do vento (SOLCIA; LESSA, 2024).

Outras iniciativas vêm explorando o uso de materiais compósitos inteligentes, que respondem a deformações ou alterações de carga e tecnologias de manufatura aditiva, como a impressão 3D, para produzir componentes de turbinas com geometrias otimizadas e manutenção simplificada. Embora ainda em fase de testes em ambientes controlados, essas tecnologias prometem reduzir custos e acelerar a customização

de equipamentos em escala industrial (ENGIE, 2024).

3.2.6 Análise comparativa da estabilidade da geração eólica frente a outras fontes renováveis

A estabilidade na geração de energia é um fator crítico para o planejamento energético, pois influencia diretamente a confiabilidade do suprimento e a segurança operacional do sistema elétrico. Quando comparada a outras fontes renováveis, como a solar fotovoltaica, a energia eólica apresenta um desempenho relativamente mais estável em determinadas regiões do Brasil, especialmente no Nordeste. Isso se deve à constância dos ventos ao longo do ano, que, diferentemente da radiação solar, não está limitada ao período diurno e tende a apresentar menores variações sazonais (POSSNER; CALDEIRA, 2017).

Estudos demonstram que o fator de capacidade das usinas eólicas no Brasil tem se mantido acima da média global, superando inclusive o de usinas solares. Em 2015, por exemplo, esse fator foi de 38,1% no país, o maior valor registrado mundialmente à época, e 60% superior à média global. Esse desempenho mais elevado contribui para maior confiabilidade da geração, o que reduz os custos e facilita o despacho da carga pelo operador do sistema elétrico (ABEEólica, 2015).

Em contrapartida, a energia solar, embora mais previsível durante o dia e com padrões claros de variação, sofre maior impacto de eventos meteorológicos momentâneos, como nebulosidade e chuvas. Já a energia hidrelétrica, tradicionalmente a base da matriz brasileira, oferece elevada estabilidade, mas depende do regime hídrico, o que a torna vulnerável em períodos de estiagem, justamente quando a complementaridade com a geração eólica se torna estratégica para o país (SILVA et al., 2016).

Diante desse cenário, o aumento da participação de fontes renováveis tem intensificado a ocorrência do fenômeno conhecido como *curtailment*, caracterizado pela limitação intencional da geração de energia, mesmo quando há disponibilidade de recurso energético. Esse fenômeno ocorre, principalmente, em função de restrições da rede elétrica, excesso de geração em determinados períodos e limitações na capacidade de escoamento da energia produzida. Em sistemas com elevada produção de energia eólica e solar, o *curtailment* torna-se um desafio relevante, pois implica na perda de energia potencialmente aproveitável e evidencia a

falta de flexibilidade operacional do sistema elétrico (BIRD et al., 2016).

Devido a esse fato, os sistemas de armazenamento de energia assumem papel fundamental na mitigação desse problema, ao possibilitar o armazenamento do excedente energético e sua posterior utilização em momentos de maior demanda. A integração de baterias, como as de íons de lítio, em sistemas híbridos contribui diretamente para a redução do *curtailment*, aumentando a eficiência do aproveitamento energético e promovendo maior estabilidade e confiabilidade na operação da rede (BIRD et al., 2016; O'SHAUGHNESSY et al., 2020).

3.3 BATERIAS DE LÍTIO: MECANISMOS ELETROQUÍMICOS, DESEMPENHO OPERACIONAL E DESAFIOS TECNOLÓGICOS

3.3.1 Intercalamento e desintercalamento de íons de lítio no ânodo

O processo de intercalamento e desintercalamento de íons de lítio no ânodo é crucial para o funcionamento das baterias de íons de lítio (LIBs), sendo um dos pilares para sua eficiência energética e ampla aplicação em dispositivos eletrônicos e veículos elétricos. Durante a carga da bateria, os íons de lítio migram do cátodo para o ânodo através do eletrólito, intercalando-se nas camadas de grafite ou outros materiais utilizados no ânodo. Este processo ocorre de forma reversível, permitindo que os íons sejam armazenados sem alterações estruturais significativas no material do ânodo (ZANOLETTI et al., 2024; REY et al., 2023).

A grafite é amplamente utilizada como material padrão para ânodos devido à sua alta estabilidade, baixo custo e capacidade de suportar várias centenas de ciclos de carga e descarga com eficiência. A capacidade específica teórica da grafite é de aproximadamente 372 mAh/g, sendo baseada na formação do composto LiC_6 durante o processo de intercalamento (SHI et al., 2023; SALDARINI; LONGO, 2023). No entanto, desafios como a formação da camada de interface sólida do eletrólito (SEI) e a expansão volumétrica durante os ciclos de carga e descarga podem impactar a durabilidade e a eficiência da bateria (SHI et al., 2023; SALDARINI; LONGO, 2023).

Além da grafite, outros materiais têm sido estudados para melhorar o desempenho do ânodo, como os baseados em carbono duro, óxidos metálicos e compostos de silício. Esses materiais oferecem capacidades específicas mais altas, embora enfrentem desafios relacionados à estabilidade mecânica e à formação de

dendritos de lítio em ciclos intensivos (ZHANG et al., 2023; LIU et al., 2021). A pesquisa contínua em modificações de superfície e otimização de interfaces tem buscado mitigar esses problemas, garantindo maior eficiência e segurança operacional (PREGER et al., 2021; AYDIN et al., 2023).

A estabilidade da SEI (Camada de interface sólida do eletrólito) é um fator crucial no desempenho do ânodo. Essa camada é formada nas primeiras cargas da bateria e serve como uma barreira passiva que impede reações parasíticas contínuas entre o eletrólito e o ânodo. No entanto, a instabilidade dessa camada pode levar à perda de capacidade irreversível e ao envelhecimento prematuro da bateria (ISLAM; IYER-RANIGA, 2022; LIN, 2023). Métodos recentes incluem o uso de aditivos no eletrólito e revestimentos funcionais no ânodo para reforçar a estabilidade da SEI e minimizar os efeitos de degradação (MACHIN et al., 2023; PAKSERESHT et al., 2023).

As tecnologias emergentes, como os ânodos à base de silício e as abordagens de eletrodos espessos sem solvente, também têm mostrado potencial para aumentar a densidade de energia e melhorar a eficiência do armazenamento de íons de lítio. A combinação dessas soluções com técnicas avançadas de fabricação, como deposição a seco e fibrilação de polímeros, está abrindo novos caminhos para o desenvolvimento de baterias de maior desempenho e menor impacto ambiental (BAAZOUZI, 2023; GONÇALVES, 2022). Assim, a contínua evolução nos materiais do ânodo e no controle do processo de intercalamento/desintercalamento é essencial para atender às crescentes demandas da sociedade moderna por tecnologias de armazenamento de energia sustentável.

3.3.2 Oxidação e redução dos materiais ativos no cátodo

Em paralelo ao processo anterior, a oxidação e redução nos materiais ativos do cátodo é responsável pela liberação e armazenamento reversível de energia. Durante a descarga da bateria, os íons de lítio migram do ânodo para o cátodo, onde ocorrem reações de redução nos materiais ativos do cátodo. Já no processo de carga, o movimento dos íons se inverte, e os materiais do cátodo sofrem reações de oxidação, liberando os íons de lítio para o eletrólito (REY et al., 2023; SHI et al., 2023).

Os materiais ativos mais comumente utilizados nos cátodos das LIBs incluem compostos como $LiCoO_2$, $LiFePO_4$ e $Li(NiMnCo)O_2$ (NMC), cada um com características específicas em termos de densidade de energia, estabilidade térmica

e custo. O $LiCoO_2$, por exemplo, oferece alta densidade de energia, mas enfrenta desafios relacionados à sua estabilidade térmica e impacto ambiental. Por outro lado, materiais como $LiFePO_4$ se destacam pela alta estabilidade térmica e segurança, embora apresentem menor densidade de energia em comparação com outros materiais (ZANOLETTI et al., 2024; BAAZOUZI, 2023).

As reações de oxidação/redução no cátodo envolvem a inserção e remoção de íons de lítio nas estruturas cristalinas dos materiais ativos. Esse processo é sustentado por alterações no estado de oxidação dos metais de transição presentes nos materiais do cátodo, como o cobalto, níquel e manganês. Essas mudanças permitem o armazenamento e a liberação de energia química, sendo fundamentais para a operação eficiente das LIBs. Entretanto, desafios como a instabilidade da estrutura cristalina durante ciclos intensos e a dissolução de metais no eletrólito podem reduzir a vida útil das baterias (ZHANG et al., 2023; LIU et al., 2021).

Recentemente, têm sido desenvolvidas estratégias para melhorar o desempenho dos materiais do cátodo, incluindo a modificação de superfícies e a introdução de revestimentos protetores que minimizam as reações parasíticas e aumentam a estabilidade estrutural. Adicionalmente, novos compostos como os materiais ricos em níquel e as camadas de óxidos compostos têm demonstrado maior capacidade específica e melhor eficiência energética, embora ainda enfrentem desafios relacionados à segurança e à reciclagem (PAKSERESHT et al., 2023; SALDARINI; LONGO, 2023).

A evolução contínua dos materiais ativos no cátodo visa alcançar um equilíbrio ideal entre densidade de energia, estabilidade e sustentabilidade. A integração de novas tecnologias, como a fabricação de eletrodos sem solvente e a combinação de materiais híbridos, promete não apenas melhorar o desempenho, mas também reduzir os custos de produção e o impacto ambiental associado ao descarte de baterias (GONÇALVES, 2022; LIN, 2023). Assim, os avanços na química e engenharia dos materiais do cátodo continuam a desempenhar um papel vital no desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia mais eficientes e sustentáveis.

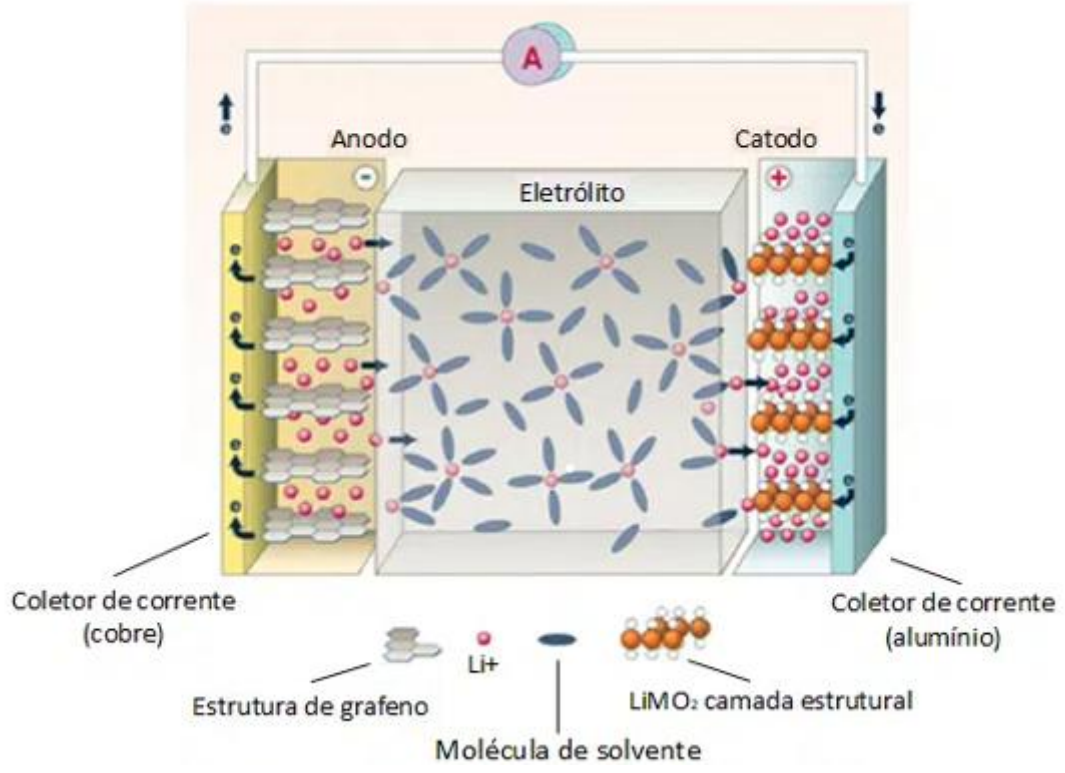
3.3.3 Transferência de íons de lítio pelo eletrólito e seu impacto no desempenho.

A transferência de íons de lítio através do eletrólito é um processo essencial no

funcionamento das baterias de íons de lítio, sendo responsável pelo transporte eficiente de íons entre os eletrodos durante os ciclos de carga e descarga. Esse movimento ocorre por meio de um eletrólito líquido, sólido ou em forma de gel, que serve como um meio condutor para os íons, enquanto impede a condução de elétrons, garantindo a separação elétrica dos eletrodos (PREGER et al., 2021; ZANOLETTI et al., 2024).

Como podemos observar na figura 5 abaixo, a célula de uma bateria de íons de lítio é composta por três principais componentes: o ânodo, o cátodo e o eletrólito. Durante os ciclos de carga e descarga, como dito anteriormente, os íons de lítio (Li^+) migram através do eletrólito, do ânodo para o cátodo e vice-versa, conforme o sentido da corrente. O eletrólito serve como meio condutor para os íons, enquanto impede o fluxo de elétrons, garantindo a separação elétrica entre os eletrodos. Essa estrutura funcional é essencial para o transporte eficiente de íons, que, quando comprometido, pode levar a uma diminuição no desempenho e na capacidade da bateria.

Figura 5 - Esquema de uma célula de bateria de íons de lítio, destacando o transporte de íons entre ânodo e cátodo através do eletrólito.



Fonte: AKINYELE, D. O. et al. (2014).

A eficiência da transferência de íons é influenciada diretamente pelas propriedades do eletrólito, como a condutividade iônica, estabilidade térmica e compatibilidade química com os eletrodos. Os eletrólitos líquidos, que frequentemente utilizam sais de lítio (como $LiPF_6$) dissolvidos em solventes orgânicos, apresentam alta condutividade iônica e ampla janela eletroquímica. No entanto, esses eletrólitos enfrentam desafios relacionados à segurança devido à sua inflamabilidade e instabilidade térmica em temperaturas elevadas (ZHANG et al., 2023; LIU et al., 2021).

Um fator crítico no desempenho das LIBs é o transporte dos íons de lítio através do eletrólito, que pode ser limitado pela difusão lenta em altas taxas de carga ou descarga. Isso leva a um aumento na polarização da célula e a uma redução na capacidade utilizável (PAKSERESHT et al., 2023; LIN, 2023).

A otimização dos eletrólitos é essencial para melhorar a densidade de energia e a longevidade das LIBs. Estratégias como o desenvolvimento de eletrólitos híbridos (líquido-sólido) e o uso de aditivos químicos para reduzir a formação de produtos indesejados e aumentar a estabilidade térmica têm mostrado resultados promissores. Essas inovações não apenas melhoram a eficiência de transferência dos íons de lítio, mas também contribuem para a viabilidade de aplicações mais exigentes, como veículos elétricos e sistemas de armazenamento estacionário (REY et al., 2023; GONÇALVES, 2022).

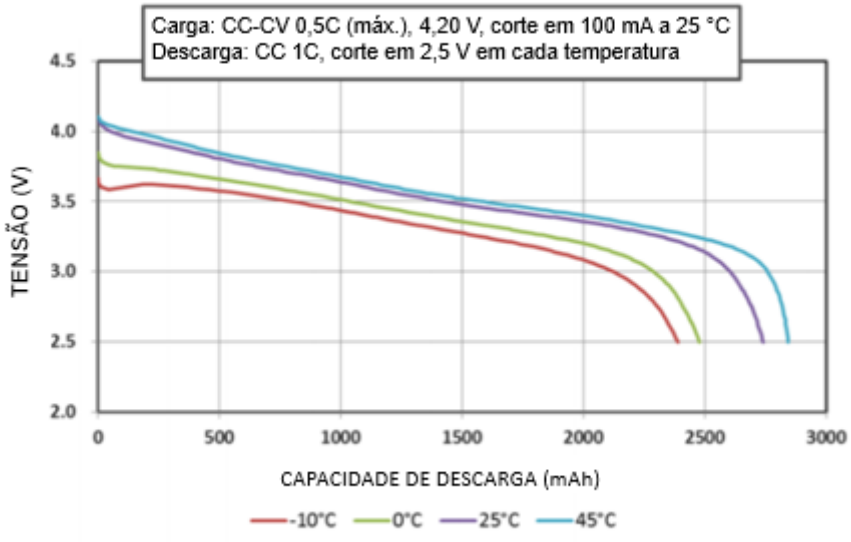
3.3.4 Impacto da temperatura nos processos de carga e descarga

A temperatura influencia diretamente a eficiência, segurança e longevidade dos dispositivos. A operação dentro de uma faixa de temperatura ideal é essencial para garantir o transporte eficiente de íons, a estabilidade química dos materiais ativos e a integridade estrutural dos eletrodos e do eletrólito (PREGER et al., 2021; SALDARINI; LONGO, 2023).

Em temperaturas baixas, a mobilidade dos íons de lítio no eletrólito e nos eletrodos é significativamente reduzida, resultando em uma maior resistência interna e perda de capacidade. Isso ocorre porque a condutividade iônica do eletrólito diminui, dificultando o transporte eficiente de íons entre os eletrodos. Adicionalmente, o crescimento da SEI pode ser exacerbado em baixas temperaturas, levando a uma maior degradação dos eletrodos ao longo do tempo (ZHANG et al., 2023; REY et al., 2023).

Como podemos observar na figura 6 a seguir, a curva de descarga da bateria varia significativamente com a temperatura. Em temperaturas mais baixas (-10°C e 0°C), a capacidade disponível é reduzida devido à diminuição da mobilidade iônica no eletrólito e ao aumento da resistência interna. Por outro lado, em temperaturas elevadas (45°C), a capacidade permanece mais próxima do ideal, mas os riscos de degradação térmica aumentam consideravelmente. Essa relação demonstra a importância de operar as baterias dentro de faixas de temperatura controladas para garantir eficiência e longevidade.

Figura 6 - Impacto da temperatura nos processos de carga e descarga.



Fonte: PANASONIC (2021).

Por outro lado, temperaturas elevadas podem acelerar reações indesejadas entre os componentes da bateria, como a decomposição do eletrólito e a dissolução dos metais de transição do cátodo. Esses processos não apenas reduzem a eficiência da LIB, mas também comprometem a segurança do sistema, aumentando o risco de fuga térmica. A instabilidade da SEI em altas temperaturas pode liberar gases e levar a alterações estruturais irreversíveis nos materiais ativos, especialmente em cátodos ricos em níquel, que são mais suscetíveis ao calor (LIN, 2023; BAAZOUZI, 2023).

O impacto da temperatura também é evidente nas taxas de carga e descarga. Em condições de baixa temperatura, o carregamento rápido pode causar deposição de lítio metálico no ânodo em vez de um intercalamento uniforme, aumentando o risco de formação de dendritos que podem causar curto-circuito. Já em altas temperaturas,

o transporte de íons é mais eficiente, mas os efeitos negativos da degradação térmica tendem a prevalecer, limitando a vida útil da bateria (LIU et al., 2021; PAKSERESHT et al., 2023).

Estratégias de controle térmico, como sistemas de gerenciamento térmico avançados (TMS), têm sido implementadas para mitigar os efeitos da temperatura nas LIBs. Esses sistemas incluem o uso de materiais com alta capacidade térmica, resfriamento ativo por líquido ou ar e algoritmos de gestão térmica que ajustam os parâmetros de operação da bateria em tempo real. Além disso, o desenvolvimento de eletrólitos e revestimentos com maior estabilidade térmica está entre as abordagens mais promissoras para melhorar a resistência em condições extremas de temperatura (SHI et al., 2023; ZANOLETTI et al., 2024).

Pesquisas recentes também exploram a integração de sensores de temperatura em sistemas de monitoramento, permitindo uma melhor previsão e prevenção de falhas relacionadas ao calor. Tecnologias como materiais de mudança de fase (PCM) e recobrimentos cerâmicos para dissipação de calor têm demonstrado eficácia na manutenção de temperaturas operacionais seguras, promovendo maior estabilidade e segurança durante ciclos prolongados (GONÇALVES, 2022; MACHIN et al., 2023).

Portanto, compreender e controlar o impacto da temperatura nos processos de carga e descarga é fundamental para garantir um desempenho consistente e seguro. À medida que a demanda por essas baterias cresce em aplicações críticas, como veículos elétricos e sistemas de armazenamento de energia, o foco no gerenciamento térmico se torna indispensável para superar as limitações impostas pelas condições ambientais e operacionais extremas.

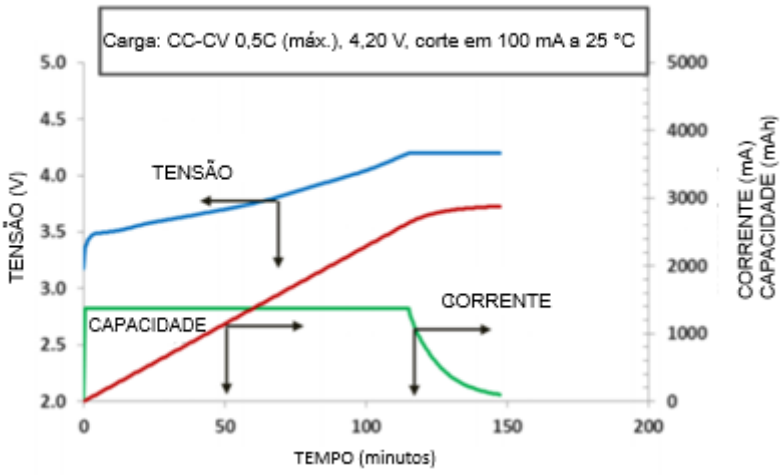
3.3.5 Medição e monitoramento de parâmetros críticos (SOC) e (SOH)

A medição e o monitoramento de parâmetros críticos, como Estado de Carga (SOC, do inglês *State of Charge*) e Estado de Saúde (SOH, do inglês *State of Health*), são fundamentais para garantir o desempenho, segurança e longevidade das baterias de íons de lítio. Esses parâmetros fornecem informações sobre a capacidade remanescente e a saúde geral da bateria, sendo indispensáveis para as mais variáveis aplicações. Métodos eficazes para medir o SOC e o SOH são essenciais para prever o comportamento da bateria e evitar falhas inesperadas (SALDARINI; LONGO, 2023;

REY et al., 2023).

Como podemos observar na figura 7 abaixo, a curva de carga de uma célula de bateria de íons de lítio ilustra a relação entre tensão, corrente e capacidade ao longo do tempo durante o processo de carregamento. Na etapa de corrente constante (CC), a capacidade aumenta de forma linear à medida que a tensão sobe gradualmente. Na etapa de tensão constante (CV), a tensão se estabiliza e a corrente diminui até atingir o corte. Esse comportamento é crucial para determinar o estado de carga, fornecendo informações em tempo real sobre a capacidade restante e garantindo a operação eficiente e segura da bateria.

Figura 7 - Medição e monitoramento de parâmetros críticos (SOC e SOH).



Fonte: PANASONIC (2021).

O SOC representa a quantidade de carga disponível em uma bateria em relação à sua capacidade total e é comumente expresso como uma porcentagem. A medição precisa do SOC enfrenta desafios devido à complexidade do comportamento eletroquímico da bateria, especialmente em condições de alta carga ou descarga. Métodos comuns para determiná-lo incluem integração de corrente (método Coulomb), medições de tensão aberta e abordagens baseadas em modelos. A combinação desses métodos tem mostrado maior precisão em diferentes condições operacionais (PREGER et al., 2021; ZHANG et al., 2023).

Por outro lado, o SOH avalia a capacidade de uma bateria em comparação ao seu estado inicial, levando em conta fatores como capacidade perdida, resistência interna aumentada e degradação estrutural dos eletrodos. Monitorar o SOH é

essencial para identificar sinais de envelhecimento e tomar ações preventivas, como a substituição da bateria antes de falhas críticas. Métodos modernos de análise do SOH utilizam algoritmos avançados baseados em aprendizado de máquina e sensores incorporados para detectar anomalias de desempenho em tempo real (LIN, 2023; LIU et al., 2021).

A integração de sistemas avançados de gerenciamento de baterias (BMS) desempenha um papel crucial no monitoramento contínuo do SOC e SOH. Esses sistemas coletam dados em tempo real sobre a corrente, tensão e temperatura da bateria, permitindo cálculos precisos e dinâmicos desses parâmetros. Além disso, algoritmos de predição integrados aos BMS têm mostrado eficiência na estimativa de ciclos de vida remanescente e no planejamento de estratégias de recarga para maximizar a vida útil das LIBs (SHI et al., 2023; ZANOLETTI et al., 2024).

Soluções emergentes incluem sensores avançados e métodos não intrusivos, como espectroscopia de impedância eletroquímica, para obter medições mais precisas do SOH e SOC. Essas tecnologias, combinadas com sistemas baseados em inteligência artificial, têm o potencial de transformar a forma como os parâmetros críticos são monitorados, promovendo maior confiabilidade e sustentabilidade em aplicações críticas (GONÇALVES, 2022; MACHIN et al., 2023).

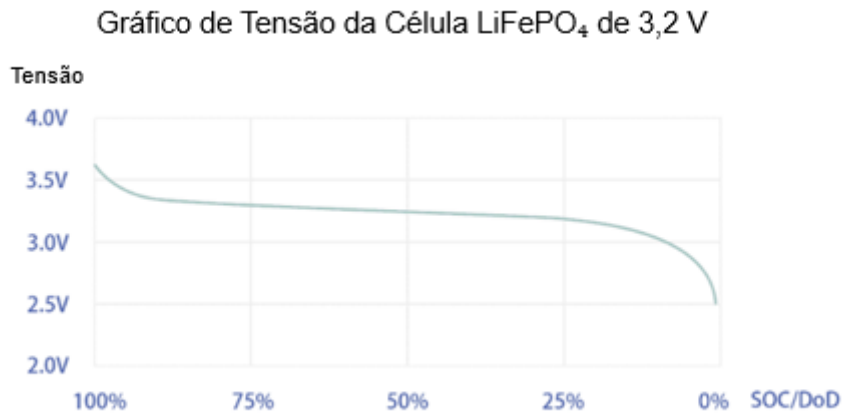
3.3.6 Efeitos da profundidade de descarga (DoD)

A profundidade de descarga (DoD, do inglês *Depth of Discharge*) indica a porcentagem da capacidade total da bateria que foi utilizada em um ciclo de descarga. Quanto maior a DoD, maior a quantidade de energia extraída da bateria, mas isso também pode influenciar diretamente os mecanismos de degradação dos materiais ativos e do eletrólito, comprometendo a vida útil da bateria (PREGER et al., 2021; REY et al., 2023).

Ciclos com altas profundidades de descarga, embora maximizem a utilização da capacidade nominal, podem acelerar a degradação estrutural dos eletrodos, especialmente no cátodo. Em materiais como o $LiCoO_2$ e os compostos de NMC, a repetida extração e inserção de grandes quantidades de íons de lítio podem levar a deformações mecânicas e perda de integridade estrutural. Esse processo reduz gradualmente a capacidade utilizável da bateria ao longo do tempo (ZHANG et al., 2023; BAAZOUZI, 2023).

Como podemos observar na figura 8 a seguir, a curva de tensão de uma célula LiFePO4 varia conforme o Estado de Carga e a Profundidade de Descarga. A tensão permanece relativamente constante na maior parte da operação, proporcionando estabilidade ao sistema. No entanto, próximo de 0% de SOC, observa-se uma queda acentuada na tensão, indicando o limite operacional da bateria. Esse comportamento ressalta a importância de evitar descargas profundas para preservar a integridade da célula e prolongar sua vida útil.

Figura 8 - Curva de tensão de uma célula LiFePO4, em função do Estado de Carga e da Profundidade de Descarga.



Fonte: JUST LITHIUM BATTERY (2022).

Por outro lado, operar com baixas profundidades de descarga pode mitigar os danos estruturais, mas reduz a eficiência do uso da bateria em aplicações onde altas demandas de energia são necessárias. Além disso, ciclos com DoD muito baixos podem resultar em um aumento na resistência interna da célula devido ao acúmulo de camadas passivas no ânodo, como a interface sólida do eletrólito. Esses efeitos podem ser especialmente significativos em baterias utilizadas em condições de recarga frequente (LIN, 2023; SALDARINI; LONGO, 2023).

A relação entre a DoD e a vida útil da bateria é descrita por meio de um compromisso, quanto menor a DoD média por ciclo, maior tende a ser o número total de ciclos que a bateria pode suportar antes de atingir níveis críticos de degradação. Estudos mostram que limitar a DoD a cerca de 80% pode prolongar significativamente a vida útil de uma bateria sem comprometer demasiadamente a capacidade energética disponível para o usuário (LIU et al., 2021; PAKSERESHT et al., 2023).

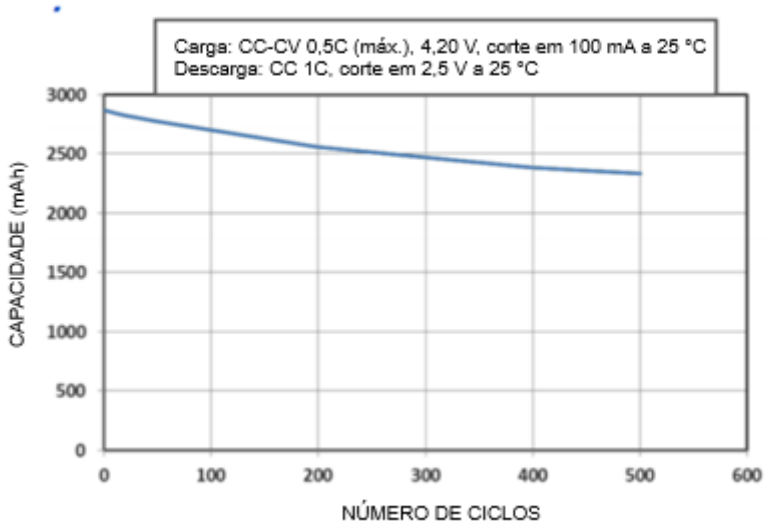
Para mitigar os efeitos negativos da profundidade de descarga, fabricantes e pesquisadores têm implementado estratégias como o uso de sistemas avançados de gerenciamento de bateria, que monitoram e controlam a DoD em tempo real. Outro ponto, é o desenvolvimento de novos materiais ativos mais resistentes a ciclos profundos, como cátodos ricos em níquel e ânodos baseados em silício, tem mostrado potencial para reduzir os impactos negativos de DoD elevadas. Essas inovações visam equilibrar a capacidade energética e a durabilidade, atendendo às crescentes demandas de desempenho em aplicações críticas (SHI et al., 2023; ZANOLETTI et al., 2024).

3.3.7 Ciclo de vida e durabilidade

O ciclo de vida é definido pelo número de ciclos de carga e descarga que uma bateria pode suportar antes que sua capacidade caia para menos de 80% da original. Por outro lado, a durabilidade é afetada por fatores como os materiais ativos, as condições de operação e as estratégias de controle térmico e elétrico implementadas no sistema (PREGER et al., 2021; SALDARINI; LONGO, 2023).

Como podemos observar na figura 9 abaixo, a capacidade da bateria diminui progressivamente com o aumento do número de ciclos de carga e descarga. Esse padrão reflete a degradação natural dos materiais ativos e a perda de íons de lítio disponíveis devido à formação de camadas passivas. Embora a curva mostre uma redução moderada da capacidade em até 500 ciclos, ela ilustra a importância de limitar fatores que aceleram esse processo, como já foi explicado sobre as altas profundidades de descarga e operação fora da faixa de temperatura ideal.

Figura 9 - Relação entre a capacidade da bateria e o número de ciclos de vida.



Fonte: PANASONIC (2021).

3.3.8 Segurança e estabilidade

A segurança e a estabilidade das baterias de íons de lítio são determinantes para sua confiabilidade em aplicações diversas, desde dispositivos portáteis até veículos elétricos e sistemas de armazenamento estacionário. Esses aspectos são influenciados por fatores como materiais ativos, comportamento eletroquímico e gerenciamento térmico. Apesar de sua alta densidade de energia, as LIBs apresentam riscos associados a fenômenos como fuga térmica e instabilidade química, especialmente em condições de operação extremas (PREGER et al., 2021; ZHANG et al., 2023).

A fuga térmica é um dos principais desafios relacionados à segurança das LIBs. Esse fenômeno ocorre quando o calor gerado internamente excede a capacidade do sistema de dissipá-lo, levando a reações químicas descontroladas. Fatores como a decomposição do eletrólito, liberação de oxigênio do cátodo e crescimento de dendritos no ânodo podem desencadear esse processo, agravando os riscos em altas temperaturas ou sobrecarga (AYDIN, 2023; LIN, 2023). Materiais ativos como $LiFePO_4$ têm se destacado por sua maior estabilidade térmica, sendo amplamente utilizados em aplicações que exigem maior segurança (GONÇALVES, 2022).

No âmbito estrutural, as propriedades dos materiais ativos desempenham papel crucial na mitigação de riscos. Enquanto cátodos como $LiCoO_2$ e NMC apresentam alta densidade de energia, eles estão associados a maior suscetibilidade à degradação térmica e química. Alternativas, como materiais ricos em níquel e cátodos com revestimentos protetores, têm mostrado potencial para minimizar reações parasíticas e melhorar a estabilidade estrutural, especialmente em ciclos intensivos (SHI, 2023; REY et al., 2023).

Inovações tecnológicas têm buscado reduzir os riscos associados ao eletrólito, tradicionalmente líquido e inflamável. A introdução de eletrólitos sólidos e híbridos contribui para aumentar a segurança ao eliminar problemas relacionados à inflamabilidade. Além disso, o uso de aditivos que estabilizam as interfaces entre os eletrodos e o eletrólito tem demonstrado eficácia na redução de reações indesejadas e na preservação dos componentes internos ao longo do tempo (MACHIN et al., 2023; BAAZOUZI, 2023).

3.3.9 Custos e viabilidade econômica

Os custos estão diretamente relacionados aos materiais utilizados, aos processos de fabricação e à escala de produção. Avanços recentes têm reduzido os custos, mas desafios como a dependência de metais críticos e o impacto ambiental da extração de matérias-primas ainda afetam sua competitividade (ZANOLETTI et al., 2024; REY et al., 2023).

Os materiais do cátodo, como cobalto, níquel e lítio, são os principais responsáveis pelos altos custos de produção. O cobalto, em particular, apresenta flutuações de preço devido à sua baixa disponibilidade e à concentração de mineração em regiões de instabilidade política. Alternativas, como os cátodos ricos em níquel e materiais como $LiFePO_4$, têm ganhado destaque por combinarem custos mais baixos com boa densidade energética, embora apresentem desafios de desempenho em algumas aplicações (BAAZOUZI, 2023; SHI, 2023).

Os processos de fabricação, incluindo o uso de solventes caros e sistemas de recuperação complexos, também contribuem significativamente para o custo final das LIBs. Tecnologias emergentes, como a fabricação de eletrodos sem solvente, têm mostrado potencial para reduzir custos ao eliminar etapas da fabricação, diminuindo o consumo energético no processo de secagem e formação dos eletrodos. Essas

inovações, aliadas a processos de produção em larga escala, podem acelerar a redução de custos no médio prazo (ZHANG et al., 2023; LIN, 2023).

As políticas públicas e os incentivos governamentais também têm desempenhado um papel essencial na viabilização econômica. Subsídios para veículos elétricos e investimentos em infraestrutura de recarga têm impulsionado a adoção de tecnologias baseadas em baterias. Outro fator é a implementação de regulamentações que incentivem a reciclagem e a economia circular está se tornando cada vez mais relevante para garantir a sustentabilidade econômica e ambiental no setor (REY et al., 2023; GONÇALVES, 2022).

A redução dos custos das LIBs é resultado de um esforço conjunto entre inovação tecnológica, expansão da capacidade produtiva e políticas de incentivo. Com o avanço contínuo em materiais, processos de fabricação e gestão do ciclo de vida, as LIBs estão se consolidando como uma solução viável e competitiva para atender às demandas por armazenamento de energia em diferentes setores.

3.3.10 Sustentabilidade e impacto ambiental

A sustentabilidade e o impacto ambiental das baterias de íons de lítio são questões centrais à medida que sua adoção cresce em inúmeros setores. Embora elas ofereçam benefícios significativos na redução de emissões de gases de efeito estufa quando comparadas aos combustíveis fósseis, sua produção, uso e descarte apresentam desafios ambientais significativos. Esses desafios incluem o consumo de recursos naturais críticos, além dos impactos associados ao ciclo de vida das baterias (ZANOLETTI et al., 2024; REY et al., 2023).

A extração de matérias-primas é uma das etapas mais prejudiciais ao meio ambiente. O processo de mineração de lítio, por exemplo, consome grandes volumes de água, particularmente em regiões áridas como o Triângulo do Lítio, na América do Sul. Em adição, a mineração de cobalto, concentrada em países como a República Democrática do Congo, está frequentemente associada a práticas de trabalho inseguras e degradação ambiental. A dependência desses materiais representa um obstáculo tanto ambiental quanto social (BAAZOUZI, 2023; ISLAM; IYER-RANIGA, 2022).

A fabricação também contribui para seu impacto ambiental, devido ao alto consumo de energia em processos como a produção de eletrodos e a montagem das

células (ZHANG et al., 2023; SHI et al., 2023).

No final de sua vida útil, elas representam um desafio significativo de descarte. O aumento da demanda global por baterias tem gerado preocupações sobre o volume de resíduos e a escassez de infraestrutura para reciclagem. Métodos de reciclagem como hidrometalurgia e pirometalurgia têm demonstrado viabilidade para recuperar metais valiosos, reduzindo a necessidade de novas extrações. No entanto, a eficiência desses processos ainda precisa ser aprimorada para torná-los economicamente viáveis em larga escala (ZANOLETTI et al., 2024; LIN, 2023).

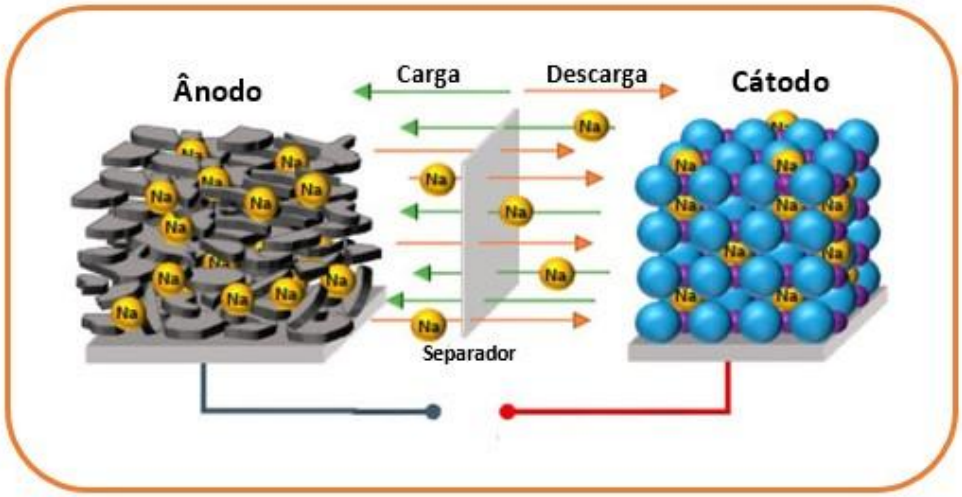
Outra vez, as políticas públicas voltadas para a sustentabilidade desempenham um papel importante na mitigação do impacto ambiental. Regulamentações para incentivar a economia circular, como o reaproveitamento de baterias em aplicações menos exigentes (segunda vida) e investimentos em tecnologias de reciclagem, são essenciais para minimizar os danos ambientais. Somado a isso, incentivos à pesquisa e desenvolvimento de materiais recicláveis e biodegradáveis têm o potencial de revolucionar a indústria no futuro (REY et al., 2023; MACHIN et al., 2023).

3.4 BATERIAS DE SÓDIO: FUNDAMENTOS ELETROQUÍMICOS E PERSPECTIVAS PARA APLICAÇÕES ENERGÉTICAS

3.4.1 Mecanismo de armazenamento e transporte de íons de sódio

O princípio de funcionamento das baterias de sódio, especialmente das do tipo íon-sódio, baseia-se no movimento reversível dos íons de sódio (Na^+) entre o ânodo e o cátodo através de um eletrólito, similarmente ao processo realizado nas LIBs, conhecido como intercalação. Durante a carga, os íons de sódio se desinserem do material catódico e migram pelo eletrólito em direção ao ânodo, onde são intercalados. O processo inverso ocorre durante a descarga, com os íons retornando ao cátodo e liberando energia elétrica (LI et al., 2023; WU et al., 2023). Pode-se observar esse fenômeno na figura 10 adiante:

Figura 10 - Esquema de funcionamento de uma bateria de íons de sódio.



Fonte: STA Eletrônica (2023).

A estrutura dos materiais catódicos e anódicos é crucial para o desempenho eletroquímico dessas baterias. Compostos de estrutura aberta, como os do tipo NASICON *(*Na *Super Ionic Conductor*), facilitam a difusão rápida dos íons devido aos seus canais tridimensionais, contribuindo para altas taxas de transporte iônico e estabilidade estrutural durante os ciclos de carga e descarga (TAYOURY et al., 2021). Entre os materiais de ânodo, o carbono duro se destaca como o mais promissor, devido à sua estrutura amorfa e à capacidade de armazenar sódio em microporos, embora sua tensão de operação próxima a 0 V possa apresentar riscos de formação de sódio metálico sob determinadas condições (WU et al., 2023).

As baterias de íon-sódio podem ser classificadas em sistemas com eletrólito aquoso ou não aquoso. No caso dos sistemas aquosos, o chamado mecanismo "*rocking-chair*" se aplica, em que ambos os eletrodos são materiais de inserção, e o eletrólito é uma solução de sal de sódio em água. Esse tipo de bateria oferece vantagens de custo e segurança, mas apresenta uma janela eletroquímica mais estreita, limitada pela decomposição da água (OER e HER), o que restringe sua densidade energética (WU et al., 2023).

As baterias com eletrólitos orgânicos permitem maior tensão de operação e, consequentemente, maior densidade de energia, embora apresentem desafios relacionados à segurança e ao custo dos materiais utilizados. O desenvolvimento recente de eletrólitos "água-em-sal" tem permitido ampliar a janela eletroquímica dos

sistemas aquosos, tornando-os mais competitivos em termos de desempenho (SUO et al., 2017; JIN et al., 2021).

O mecanismo de transporte e armazenamento de íons de sódio depende diretamente da natureza dos materiais eletroativos, do tipo de eletrólito e das estratégias de engenharia de eletrodos. O contínuo desenvolvimento de novos materiais de inserção e condutores superiônicos vem possibilitando avanços na performance dessas baterias, colocando-as como alternativas frente às tecnologias baseadas em lítio (LI, 2023; WU et al., 2023; TAYOURY et al., 2021).

3.4.2 Eficiência energética e parâmetros críticos de operação

As baterias de sódio vêm se consolidando como alternativas para aplicações estacionárias e veiculares, não apenas por sua disponibilidade e custo reduzido, mas também por apresentarem características operacionais competitivas frente às tecnologias mais consolidadas. A eficiência energética dessas baterias varia conforme o tipo de sistema adotado, sendo geralmente maior nas baterias de íon-sódio, com valores típicos de eficiência coulômbica acima de 95% após os primeiros ciclos de estabilização (WU et al., 2023). Já nas baterias de sódio-enxofre (NaS), a eficiência de ciclo pode variar entre 75% e 90%, em função da temperatura de operação e das perdas térmicas envolvidas no processo (VINS; SIROVY, 2019).

A densidade energética dos sistemas Na-ion alcança valores superiores a 140 Wh/kg a nível de célula, com potencial para atingir patamares ainda mais altos com o aprimoramento de materiais catódicos como óxidos em camadas e compostos do tipo *Prussian Blue* (LI, 2023). No caso das baterias NaS, a densidade volumétrica situa-se entre 150 e 400 Wh/L, o que permite sua aplicação em sistemas que demandam maior autonomia por volume ocupado, como em containers modulares conectados à rede elétrica (VINS; SIROVY, 2019).

Entre os principais parâmetros críticos que afetam o desempenho das baterias de sódio, destacam-se a estabilidade térmica, a vida útil de ciclo, a eficiência coulômbica, o comportamento frente a altas taxas de descarga e o controle da formação de fases intermediárias nos eletrodos. Em células com eletrodos de carbono duro, observa-se boa estabilidade de capacidade ao longo de mais de 1000 ciclos, com perdas inferiores a 20% em condições controladas, embora ainda haja limitações no desempenho a baixas temperaturas (WU et al., 2023).

A degradação dos eletrodos é amplamente influenciada por processos de dissolução de elementos, crescimento de resistências interfaciais e formação de produtos secundários, especialmente em sistemas com eletrólitos aquosos. Estratégias como dopagem de materiais catódicos, revestimentos protetores e otimização do perfil de corrente são adotadas para mitigar esses efeitos e aumentar a vida útil das baterias (LI, 2023). Em testes recentes, tecnologias comerciais baseadas em sódio apresentaram durabilidade superior a 4000 ciclos com retenção de até 80% da capacidade inicial, quando submetidas a protocolos de carga e descarga padronizados (XIAO et al., 2018).

3.4.3 Ciclo de vida, degradação e estabilidade de materiais catódicos e anódicos

O desempenho de longo prazo das baterias de sódio está diretamente relacionado à estabilidade dos seus materiais eletroativos e à resistência desses materiais aos processos de degradação ao longo dos ciclos de carga e descarga. Em particular, o ciclo de vida das baterias de íon-sódio é influenciado por fatores como expansão volumétrica dos eletrodos, estabilidade estrutural dos materiais e reações colaterais no eletrólito (WU et al., 2023; LI, 2023).

Os ânodos de carbono duro, amplamente utilizados em baterias Na-ion, apresentam boa capacidade reversível e alta eficiência coulômbica, mas enfrentam desafios relacionados à expansão volumétrica durante o processo de inserção e desinserção de sódio. Essa expansão pode provocar microfraturas na estrutura do material, levando à perda de contato elétrico, aumento da resistência interna e redução da capacidade útil ao longo do tempo (WU et al., 2023). Para mitigar esses efeitos, estratégias como a modificação da estrutura do carbono e a utilização de ligantes mais resilientes têm sido exploradas.

No caso dos cátodos, compostos baseados em estrutura NASICON e materiais do tipo *Prussian Blue* demonstram boa estabilidade eletroquímica e resistência à deformação estrutural ao longo dos ciclos. No entanto, ainda podem sofrer degradação progressiva devido à dissolução de elementos na interface eletrodo/eletrólito e à formação de camadas passivas que dificultam a difusão dos íons de sódio (TAYOURY et al., 2021; WU et al., 2023).

As baterias de sódio-enxofre operam em temperaturas elevadas, geralmente

entre 300 °C e 350 °C, o que impõe desafios adicionais à estabilidade dos materiais. Nessas condições, a resistência à corrosão dos compartimentos internos e a integridade dos eletrólitos cerâmicos são determinantes para o tempo de vida útil do sistema. Estudos indicam que essas baterias podem atingir até 4500 ciclos de operação com degradação inferior a 20% da capacidade inicial, desde que a temperatura seja rigidamente controlada (NGUYEN et al., 2018; VINS; SIROVY, 2019).

Além disso, fatores operacionais como a profundidade de descarga, a taxa de corrente aplicada e as flutuações térmicas impactam diretamente a estabilidade dos eletrodos. Altas taxas de descarga e DoD elevadas aceleram os processos de degradação, especialmente a fragmentação dos materiais do ânodo e a redução da área ativa disponível para reação eletroquímica. A degradação dos eletrodos pode ser mitigada com o uso de revestimentos protetores, aditivos funcionais no eletrólito e controle inteligente dos ciclos de carga e descarga (LI, 2023; TAYOURY et al., 2021).

3.4.4 Comportamento térmico, segurança e gerenciamento térmico em aplicações práticas

O comportamento térmico das baterias de sódio varia significativamente conforme o tipo de tecnologia adotada. Nas baterias de íon-sódio, os desafios térmicos são comparáveis aos enfrentados por sistemas de lítio, com riscos de aquecimento excessivo durante operações de alta potência, embora a maioria dos materiais utilizados apresente estabilidade superior sob temperaturas elevadas. Estudos indicam que células cilíndricas apresentam boa estabilidade térmica até aproximadamente 100 °C, com desempenho confiável em ciclos contínuos (ZHOU et al., 2021).

Por outro lado, as baterias de sódio-enxofre operam a temperaturas elevadas, a fim de manter o sódio e o enxofre em estado líquido. Essa condição torna o gerenciamento térmico um requisito fundamental para a operação segura e eficiente do sistema. Caso a temperatura caia abaixo da faixa ideal, ocorre o aumento da resistência interna, o que pode prejudicar a mobilidade iônica e até mesmo levar à falha funcional do sistema (IEEE, 2018).

Para lidar com tais exigências, os sistemas NaS utilizam aquecedores resistivos controlados por sistemas de gerenciamento de bateria, os quais mantêm a

temperatura operacional dentro de limites seguros. O BMS também atua na prevenção de sobrecargas, subdescargas e falhas térmicas, notificando o operador em situações de risco. Em situações extremas, como a falha do eletrólito cerâmico, existe o risco de liberação súbita de calor, que pode ser contido por meio de isolamento térmico e barreiras de proteção internas aos módulos (BENATO et al., 2023).

Diversas medidas estruturais, como o uso de areia em compartimentos internos, contenção metálica de parede dupla e barreiras antifogo são adotadas para limitar a propagação de falhas térmicas entre células e módulos. Ensaios realizados com baterias de sódio-níquel-cloreto demonstram que, mesmo em testes de impacto, submersão e incêndio, os sistemas podem apresentar comportamento seguro, sem propagação de danos críticos, desde que os mecanismos de proteção estejam devidamente instalados e configurados (BENATO et al., 2023; IEEE, 2018).

3.4.5 Análise econômica: custo, abundância do sódio e viabilidade comercial

Uma das principais vantagens econômicas, frente a outras tecnologias de bateria, reside na abundância natural do sódio, cuja concentração média na crosta terrestre é da ordem de 23.000 ppm, valor significativamente superior ao do lítio, que possui apenas cerca de 20 ppm (WU et al., 2023). Essa disponibilidade permite o uso de matérias-primas mais baratas, como o sal comum (NaCl) e compostos derivados de água do mar, o que reduz a dependência de cadeias de suprimentos geopolítica e ambientalmente sensíveis.

Outro aspecto de destaque é o fato de que os cátodos das baterias Na-ion dispensam o uso de metais críticos como cobalto e níquel, amplamente utilizados em baterias de lítio, mas associados a altos custos, instabilidade de oferta e questões socioambientais. Além disso, o sódio permite a utilização de coletores de corrente de alumínio em ambos os eletrodos, enquanto as baterias de lítio exigem cobre no ânodo, material mais caro e pesado (VAALMA et al., 2018).

Estudos recentes de modelagem econômica, do *Argonne National Laboratory*, compararam pacotes de baterias de 53 kWh baseadas em Na-ion com pacotes Li-ion. Os resultados mostraram que os custos totais estimados foram de USD 5.925 para o sistema Na-ion e USD 5.875 para o sistema Li-ion, ou seja, ainda muito próximos, apesar das diferenças na densidade energética. No entanto, o estudo aponta que há grande margem para redução de custos nas baterias de sódio à medida que novos

materiais são otimizados e os processos de produção se tornam mais eficientes (LI, 2023).

Embora a densidade energética das baterias Na-ion ainda seja inferior à das tecnologias Li-ion, variando entre 100 e 160 Wh/kg, dependendo da configuração, esse fator pode ser compensado em aplicações onde o volume e o peso não são restritivos, como no armazenamento estacionário de energia. Além disso, o custo nivelado de energia (LCOE) tende a ser favorável ao sódio em contextos de larga escala, graças à maior estabilidade de preços e menor complexidade tecnológica (BAUER et al., 2018).

3.4.6 Sustentabilidade, descarte e potencial para reciclagem

A sustentabilidade das baterias de sódio está diretamente associada à sua composição química mais simples e ao uso de matérias-primas amplamente disponíveis e de menor impacto ambiental. Ao contrário das baterias de íons de lítio, que frequentemente dependem de metais críticos, os sistemas baseados em sódio podem ser produzidos utilizando ferro, manganês, alumínio e carbono duro, elementos menos tóxicos e com maior distribuição geográfica (VAALMA et al., 2018; LI, 2023). Isso contribui não apenas para reduzir os impactos socioambientais da mineração, mas também para facilitar o cumprimento de diretrizes internacionais voltadas à sustentabilidade de cadeias produtivas.

Do ponto de vista ambiental, os resíduos gerados ao final da vida útil de uma bateria de sódio são menos agressivos do que aqueles encontrados em outras tecnologias, principalmente pela ausência de metais pesados altamente poluentes. No entanto, o descarte inadequado ainda representa risco, especialmente em sistemas que utilizam eletrólitos orgânicos inflamáveis ou operam a altas temperaturas. Nestes casos, a decomposição térmica de componentes internos pode liberar gases tóxicos ou causar reações exotérmicas, exigindo procedimentos específicos para a desmontagem e o acondicionamento seguro (IEEE, 2018; BENATO et al., 2023).

A viabilidade da reciclagem das baterias de sódio ainda está em fase inicial de desenvolvimento, mas as perspectivas são favoráveis. A ausência de componentes críticos complexos, facilita os processos de separação eletroquímica e recuperação de materiais ativos. Somado a isso, o uso de coletores de corrente de alumínio em

ambos os eletrodos permite maior reaproveitamento de metais leves, reduzindo a geração de resíduos metálicos e promovendo maior circularidade no ciclo produtivo (WU et al., 2023).

Projetos-piloto de reciclagem tem avaliado métodos hidrometalúrgicos e térmicos adaptados às características químicas do sódio, com destaque para técnicas de separação seletiva de eletrodos e regeneração de eletrólitos. Ainda que esses processos estejam menos avançados do que os aplicados às baterias de lítio, espera-se que, com a consolidação comercial da tecnologia, a infraestrutura de reaproveitamento acompanhe o crescimento da produção e do descarte programado dessas baterias (BAUER et al., 2018; LI, 2023).

3.5 BATERIAS DE CHUMBO-ÁCIDO: ANÁLISE TÉCNICA E AMBIENTAL DE UMA TECNOLOGIA CONSOLIDADA

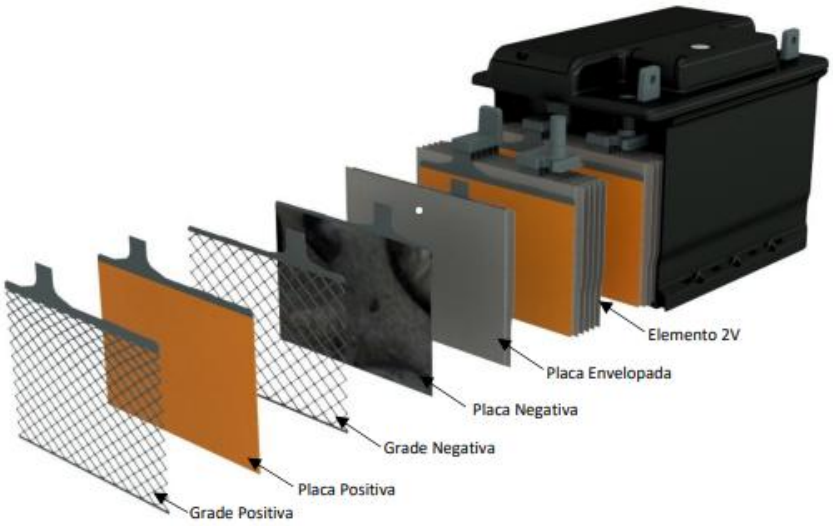
3.5.1 Reações eletroquímicas e estrutura típica das células de chumbo-ácido

As baterias de chumbo-ácido operam por meio de reações eletroquímicas reversíveis que envolvem a conversão entre chumbo metálico, dióxido de chumbo e sulfato de chumbo, todos imersos em uma solução eletrolítica de ácido sulfúrico. Durante o processo de descarga, o eletrodo negativo de chumbo metálico e o eletrodo positivo de dióxido de chumbo reagem com os íons presentes no eletrólito, resultando na formação de sulfato de chumbo em ambas as placas e na liberação de energia elétrica. Na recarga, essas reações são revertidas, regenerando os materiais ativos e restabelecendo a composição inicial do eletrólito. A eficiência e a reversibilidade desses processos são fortemente influenciadas pela pureza dos materiais, pela densidade do eletrólito e pela morfologia da massa ativa empregada nas placas (PRASAD, 2023; MUNOZ; LIMA, 2020).

A estrutura típica de uma célula de chumbo-ácido é composta por múltiplas placas positivas e negativas dispostas em paralelo e separadas por materiais porosos que evitam o curto-circuito e permitem a livre circulação de íons. As placas positivas são geralmente formadas por dióxido de chumbo aderido à grades de liga de chumbo-antimônio ou chumbo-cálcio, enquanto as placas negativas são constituídas por chumbo esponjoso com estrutura otimizada para maximizar a área de reação. Essas placas são imersas em eletrólito líquido, embora existam variantes como baterias

VRLA (*Valve Regulated Lead-Acid*), nas quais o eletrólito é imobilizado em gel ou mantido por absorção em separadores de microfibra de vidro (KASHKAROV et al., 2020; CARVALHO et al., 2019). Podemos observar essa estrutura na figura 11 abaixo:

Figura 11 - Estrutura interna de uma célula de bateria chumbo-ácido.



Fonte: MOURA SOLAR (2021).

A eficiência da conversão eletroquímica depende da manutenção da integridade física e química desses componentes ao longo dos ciclos. Fatores como a compactação inadequada da massa ativa, a corrosão das grades e a estratificação do eletrólito comprometem a performance da célula, levando à perda gradual de capacidade e à redução da vida útil. Além disso, a temperatura de operação e a profundidade de descarga influenciam diretamente a cinética das reações, sendo considerados parâmetros críticos no projeto e na gestão desses sistemas (CHAVES et al., 2020; KIM et al., 2022).

A padronização da arquitetura das células e o desenvolvimento de formulações otimizadas para os materiais ativos têm permitido avanços na densidade energética e na durabilidade das baterias de chumbo-ácido, especialmente em aplicações estacionárias e de ciclo profundo. Embora apresentem menor densidade energética se comparadas às baterias de lítio, sua robustez, baixo custo e capacidade de entrega de altas correntes ainda garantem relevância comercial em diversos setores (SANTOS; DUTRA; WANG, 2021).

3.5.2 Eficiência, tensão, taxa de descarga e limitações de profundidade de descarga

A eficiência energética das baterias de chumbo-ácido gira em torno de 75% a 90%, variando conforme o tipo de tecnologia e as condições de operação. Perdas ocorrem devido à resistência interna, formação de gases, corrosão dos eletrodos e polarização dos materiais ativos, fatores que se agravam com o envelhecimento da célula (KITARONKA, 2022). A tensão nominal de cada célula é de 2 V, sendo que arranjos em série são utilizados para compor bancos de 12 V, 24 V ou 48 V, conforme a aplicação. Durante a descarga, a queda de tensão é acentuada em altas taxas de corrente, limitando a quantidade de energia efetivamente extraída da bateria (KEBEDE et al., 2021).

A taxa de descarga tem impacto direto na capacidade disponível. Altas taxas de corrente provocam maior aquecimento e maior perda de tensão interna, o que reduz a energia utilizável e acelera a degradação do sistema. Estudos demonstram que a descarga em correntes elevadas resulta em um tempo de operação significativamente menor e em uma eficiência inferior, enquanto taxas mais baixas permitem maior aproveitamento da capacidade nominal (KEBEDE et al., 2021).

Outro aspecto essencial é a profundidade de descarga, que define o quanto da capacidade total da bateria pode ser utilizada antes de uma nova recarga. A *DoD* está diretamente relacionada à vida útil: descargas mais profundas resultam em menor número de ciclos, enquanto ciclos rasos, com *DoD* abaixo de 50%, podem aumentar significativamente a durabilidade. Podemos observar esse fenômeno na figura 12 a seguir, que apresenta a curva típica de descarga de uma bateria de 12 V, destacando a queda acentuada de tensão quando o *DoD* se aproxima de 100%. Esse comportamento reforça a importância de manter os ciclos de operação dentro de faixas moderadas para preservar a integridade dos materiais ativos e prolongar a vida útil do banco de baterias.

Figura 12 - Variação da tensão da bateria de chumbo-ácido em função da profundidade de descarga.

Fonte: MOURA SOLAR (2021).

A relação entre profundidade de descarga e vida útil é descrita pela Lei de *Peukert*, segundo a qual o tempo de descarga não é linear com a corrente aplicada, e a capacidade efetiva diminui conforme a descarga se intensifica. Essa limitação é uma das principais razões pelas quais o uso das baterias de chumbo-ácido requer cuidadosa gestão de carga e descarga para evitar perdas irreversíveis na capacidade de armazenamento (KITARONKA, 2022).

Em aplicações onde a confiabilidade e o ciclo profundo são exigências, como em sistemas *off-grid* ou fontes de energia de reserva, essas limitações precisam ser compensadas com estratégias de controle que evitem a operação em extremos. Embora seu custo inicial seja inferior ao de outras tecnologias, a limitação da profundidade de descarga e da eficiência em altas cargas ainda restringe a competitividade das baterias de chumbo-ácido em sistemas que exigem maior densidade energética e flexibilidade operacional (CHAVES et al., 2020).

3.5.3 Mecanismos de envelhecimento, sulfatização e manutenção preventiva

O envelhecimento das baterias de chumbo-ácido é um processo multifatorial que compromete progressivamente sua capacidade de armazenar e fornecer energia. Entre os principais mecanismos de degradação estão a corrosão das grades condutoras, a perda da massa ativa, o desprendimento de materiais eletroquímicos e a formação de cristais de sulfato de chumbo irreversíveis (TOWNSEND; GOUWS,

2022). A degradação das grades ocorre principalmente no eletrodo positivo, reduzindo a condutividade elétrica e levando ao colapso físico da estrutura. Já a perda de massa ativa pode resultar da expansão e contração durante os ciclos de carga e descarga, afetando diretamente a eficiência eletroquímica da bateria (PRASAD et al., 2023).

A sulfatização é considerada uma das falhas mais comuns e críticas em baterias de chumbo-ácido. Esse fenômeno consiste na formação e crescimento de cristais de sulfato de chumbo ($PbSO_4$) sobre os eletrodos durante a descarga. Quando a bateria permanece em estado de carga parcial ou é mantida descarregada por longos períodos, os cristais tornam-se densos e de difícil reversão, reduzindo a área ativa disponível para as reações eletroquímicas e, consequentemente, a capacidade total da bateria. A sulfatização crônica leva à elevação da resistência interna, queda de tensão sob carga e falhas prematuras (CATHERINO; FERES; TRINIDAD, 2004).

Para mitigar esses efeitos, a manutenção preventiva desempenha papel crucial na extensão da vida útil das baterias. A inspeção periódica do nível e da densidade do eletrólito, a aplicação de cargas equalizadoras e a prevenção do sobreaquecimento são medidas fundamentais para evitar a degradação acelerada. No caso das baterias ventiladas, a reposição de água destilada é uma tarefa essencial para manter o volume adequado do eletrólito e prevenir a exposição das placas (YANAMANDRA et al., 2023). Adicionalmente, o uso de aditivos de carbono nas placas negativas tem se mostrado eficaz na redução da sulfatização sob condições de operação em estado parcial de carga, especialmente em veículos (VALENCIANO et al., 2006).

A correta gestão da carga e o uso de algoritmos inteligentes para balanceamento entre os módulos também têm sido utilizados como estratégia preventiva. Tecnologias de monitoramento em tempo real permitem identificar rapidamente alterações no comportamento eletroquímico da célula, possibilitando intervenções precoces antes da falha crítica do sistema (PRASAD et al., 2023).

3.5.4 Segurança operacional, liberação de gases e estabilidade térmica

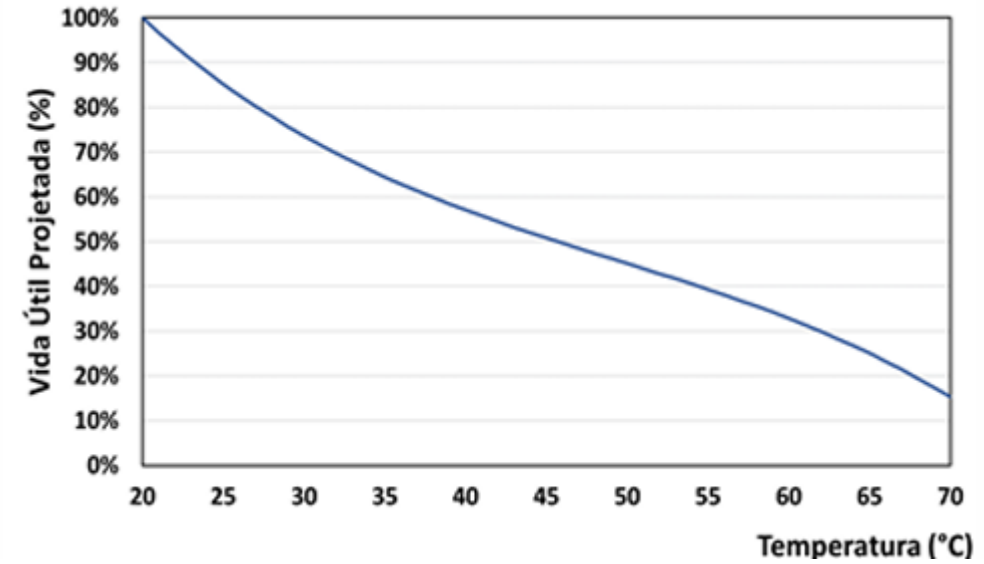
As baterias de chumbo-ácido apresentam riscos operacionais que exigem atenção cuidadosa quanto à ventilação, temperatura e manutenção. Durante o processo de carga, especialmente quando a tensão ultrapassa determinado limite, ocorre eletrólise da água do eletrólito, gerando gases hidrogênio e oxigênio. Essa liberação é inevitável em baterias inundadas (*flooded*), exigindo ambientes bem

ventilados para evitar o acúmulo de gases inflamáveis e o risco de explosão (YANAMANDRA et al., 2023). Em sistemas modernos do tipo VRLA, parte desses gases é recombinada internamente por meio de válvulas unidirecionais, porém não elimina completamente o risco (LEAD ACID BATTERY, 2022).

A estabilidade térmica é outro ponto crítico, pois quando a bateria está em operação, as temperaturas elevadas podem acelerar processos de corrosão, evaporação do eletrólito e deterioração da massa ativa, levando à redução da vida útil e aumento do risco de falhas térmicas. Em contrapartida, temperaturas muito baixas reduzem a capacidade disponível e dificultam a reação eletroquímica, exigindo maior corrente para fornecer a mesma potência (TULLO, 2018). Em ambas as situações, sistemas de gerenciamento térmico, como ventiladores, dissipadores de calor e sensores de temperatura, são fundamentais para manter a operação em uma faixa segura.

A figura 13 abaixo, ilustra a relação inversamente proporcional entre a temperatura de operação e a durabilidade projetada da bateria, evidenciando o impacto crítico do controle térmico no prolongamento da vida útil do sistema.

Figura 13 - Redução da vida útil projetada da bateria chumbo-ácido em função da elevação da temperatura.



Fonte: MOURA SOLAR (2021).

A literatura técnica também destaca que sobrecargas ou descargas excessivas podem agravar os riscos de superaquecimento e vazamento de ácido sulfúrico, especialmente em baterias envelhecidas ou com manutenção inadequada

(TOWNSEND; GOUWS, 2022). O monitoramento contínuo das variáveis críticas, como tensão por célula, temperatura e pressão interna nas VRLA, é essencial para prevenir situações de risco e garantir a confiabilidade dos sistemas.

3.5.5 Custo de produção, disponibilidade de chumbo e desempenho comparativo

As baterias de chumbo-ácido se destacam historicamente por apresentarem um dos menores custos iniciais por quilowatt-hora armazenado. Esse baixo custo está relacionado à maturidade do processo produtivo, ao uso de matérias-primas acessíveis e à ampla infraestrutura industrial instalada em diversos países. O chumbo metálico, principal insumo dessas baterias, é amplamente reciclado e comercializado a custos estáveis, o que garante previsibilidade no planejamento de projetos que utilizam esse tipo de tecnologia (PINISETTY et al., 2023).

A disponibilidade do chumbo é outro fator que favorece a manutenção dessa tecnologia no mercado. Estima-se que mais de 85% do chumbo utilizado na indústria de baterias provenha de reciclagem, o que reduz a pressão sobre fontes primárias e diminui a pegada ambiental do ciclo de vida. Países como China, Estados Unidos e Índia mantêm cadeias de fornecimento estabelecidas que integram a extração, o refino, a fabricação e o reprocessamento do chumbo, consolidando um sistema economicamente circular em torno desse material (WANG et al., 2022).

Contudo, a vantagem no custo inicial não se reflete automaticamente em melhor custo-benefício ao longo da vida útil. Estudos comparativos com baterias de íons de lítio indicam que, apesar do menor investimento inicial, o LCOE de sistemas com baterias de chumbo-ácido pode ser mais elevado, principalmente em aplicações que exigem alta ciclagem, profundidade de descarga constante e desempenho térmico estável (KEBEDE et al., 2021).

Em relação ao desempenho eletroquímico, as baterias de chumbo-ácido possuem densidade energética inferior, geralmente entre 30 e 50 Wh/kg, e eficiência média de ciclo em torno de 80%, valores abaixo dos observados em baterias de lítio, que frequentemente superam os 90%. Essa limitação implica maior volume e peso dos sistemas de armazenamento, além da necessidade de sobredimensionamento do banco de baterias para atender a demandas energéticas mais intensas (CARROQUINO et al., 2021).

A durabilidade operacional também representa um diferencial importante. Enquanto baterias de íons de lítio suportam entre 2000 e 5000 ciclos com degradação moderada, as baterias de chumbo-ácido frequentemente atingem entre 300 e 1000 ciclos úteis, dependendo das condições de operação (LUJANO-ROJAS et al., 2016). Essa diferença impacta diretamente nos custos de manutenção e reposição, que se tornam mais significativos ao longo do tempo.

Do ponto de vista ambiental e logístico, o chumbo se mostra uma vantagem e uma preocupação simultaneamente. Por um lado, sua alta reciclabilidade reduz o volume de resíduos perigosos em aterros e a necessidade de novas extrações. Por outro, os riscos toxicológicos associados ao manuseio inadequado e à disposição incorreta continuam sendo uma preocupação em países com sistemas de coleta e reaproveitamento deficientes (WANG et al., 2022).

Comparativamente, as baterias de chumbo-ácido continuam sendo mais competitivas em aplicações onde os requisitos energéticos são baixos ou intermediários e o custo inicial representa o principal critério decisório, como em sistemas de backup, iluminação de emergência e telecomunicações (KITARONKA, 2022).

3.5.6 Potencial de reciclagem e impacto ambiental da cadeia do chumbo

A cadeia de produção das baterias de chumbo-ácido é amplamente difundida e consolidada no mercado global, porém carrega implicações ambientais relevantes. Os impactos mais significativos estão concentrados nas etapas de formação e montagem final, que respondem por mais de 60% da carga ambiental associada à produção total, considerando fatores como consumo de energia, emissão de poluentes e geração de resíduos perigosos. Isso se deve, em parte, à elevada temperatura empregada nos processos de fundição do chumbo e ao uso de ácido sulfúrico concentrado como eletrólito (GAO et al., 2021).

Durante a produção, são geradas emissões atmosféricas de partículas finas de chumbo e vapores ácidos que, se não forem adequadamente tratados, podem causar contaminação do solo e da água, afetando negativamente ecossistemas e a saúde humana. A exposição ocupacional ao chumbo metálico e seus compostos está associada a distúrbios neurológicos e hematológicos, sendo reconhecida como um problema de saúde pública em instalações com controle ambiental precário

(YUDHISTIRA et al., 2022). Além disso, o processo de reciclagem informal, ainda comum em países em desenvolvimento, amplia o risco de contaminação em comunidades próximas a fundições não regulamentadas (GAO et al., 2021).

Estudos realizados na China mostram que, entre os modelos de reciclagem disponíveis, o sistema conduzido por empresas fabricantes é o mais eficiente, tanto em termos logísticos quanto ambientais. Isso se deve à maior rastreabilidade das baterias e ao compromisso com o reprocessamento seguro dos resíduos gerados. O modelo de responsabilidade estendida do produtor (EPR), já implementado em diversos países, tem contribuído para aumentar as taxas de retorno e garantir a destinação adequada desses resíduos eletroquímicos (XIANGYANG CITY et al., 2022).

Entretanto, a reciclagem em si não é isenta de impactos. A etapa de fundição consome energia em grande escala e pode liberar gases como dióxido de enxofre, dióxido de carbono e compostos de chumbo se não forem adotadas tecnologias de controle de emissões. A substituição de fornos convencionais por sistemas fechados e a aplicação de filtros de alta eficiência são recomendadas para mitigar esses efeitos adversos (GAO et al., 2021).

Do ponto de vista regulatório, há tendência crescente de tornar obrigatória a rastreabilidade das baterias desde a sua fabricação até o descarte final. Essa rastreabilidade permite que as cadeias de reaproveitamento se tornem mais robustas e seguras, promovendo práticas industriais alinhadas aos princípios da sustentabilidade (XIANGYANG CITY et al., 2022).

No balanço entre impactos e benefícios, as baterias de chumbo-ácido permanecem como uma alternativa viável em setores que valorizam o custo acessível e a infraestrutura de suporte. Porém, sua permanência no mercado dependerá da capacidade da indústria em modernizar os processos de reciclagem e em atender às crescentes exigências ambientais e sanitárias, sem as quais o risco ambiental poderá superar seus benefícios técnicos e econômicos (YUDHISTIRA et al., 2022).

3.6 SISTEMAS HÍBRIDOS DE GERAÇÃO E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

3.6.1 Introdução aos sistemas híbridos

Os sistemas híbridos de energia são uma abordagem inovadora e eficiente para

a geração e distribuição de energia, combinando diferentes fontes de energia, como solar, eólica, biomassa e hidrogênio, com o objetivo de superar as limitações individuais de cada tecnologia. A principal vantagem desses sistemas é a capacidade de integrar fontes intermitentes de energia renovável com tecnologias de armazenamento ou fontes complementares, garantindo maior confiabilidade e eficiência energética. Como resultado, os sistemas híbridos emergem como uma solução promissora para atender à crescente demanda energética global, ao mesmo tempo em que contribuem para a redução de emissões de gases de efeito estufa e mitigam os impactos das mudanças climáticas (THOMASI; SILUK, 2022).

A relevância dos sistemas híbridos está diretamente ligada ao cenário de transição energética em curso, no qual há um esforço global para reduzir a dependência de combustíveis fósseis e aumentar a participação de fontes renováveis na matriz energética. A intermitência característica de energias que dependem das condições climáticas, pode ser mitigada por meio da combinação com tecnologias de armazenamento, como baterias, ou fontes complementares. Esse equilíbrio não apenas aumenta a estabilidade do sistema, mas também permite o aproveitamento mais eficiente dos recursos disponíveis (PASKA; BICZEL; KŁOS, 2009).

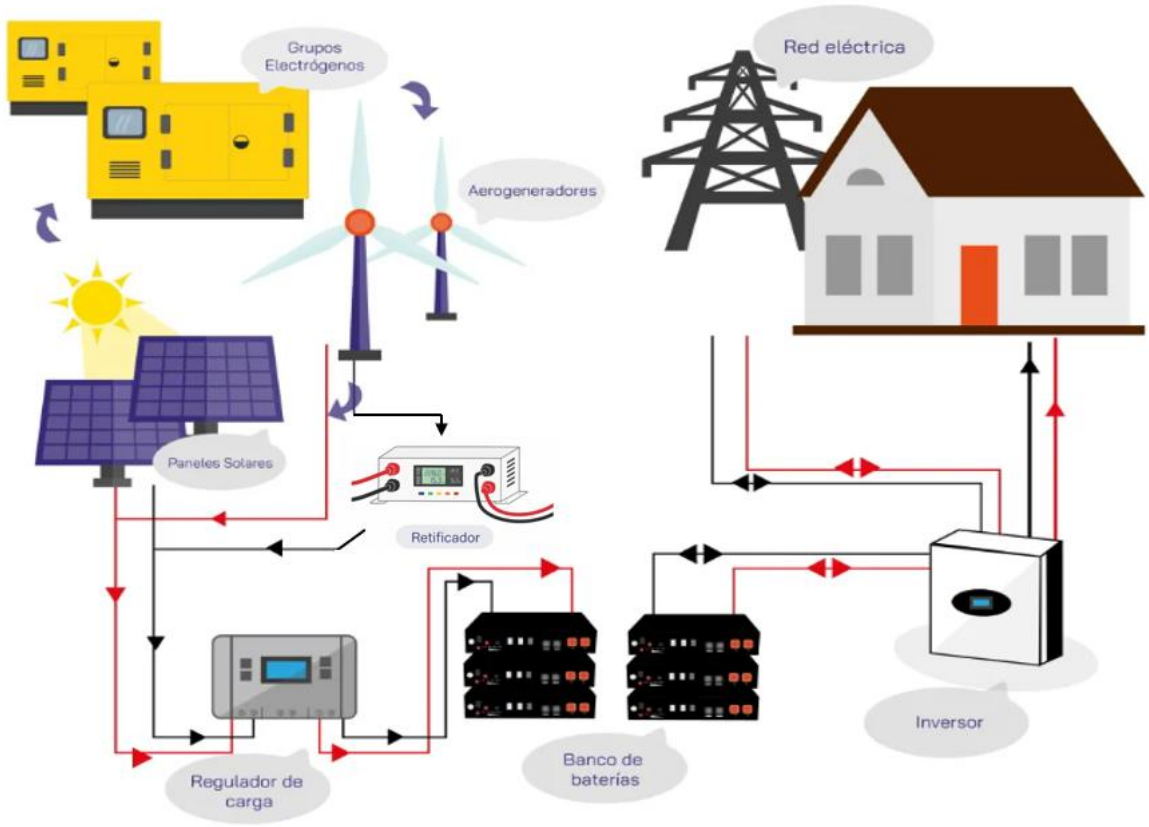
A evolução dos sistemas híbridos reflete o avanço da pesquisa e desenvolvimento nesse campo. Segundo análises bibliométricas, o número de publicações científicas sobre o tema cresceu significativamente nas últimas décadas, impulsionado por preocupações com a segurança energética e a sustentabilidade. Estudos apontam que as principais palavras-chave associadas a sistemas híbridos incluem “energia renovável”, “otimização” e “armazenamento de energia”, demonstrando o foco em soluções que aumentem a eficiência e minimizem os custos operacionais (ELLEGAARD; WALLIN, 2015; THOMASI; SILUK, 2022).

Outro ponto crucial, os sistemas híbridos encontram aplicações em uma ampla gama de contextos, desde sistemas *off-grid* para comunidades remotas até projetos de grande escala conectados à rede elétrica. Em áreas isoladas, esses sistemas são fundamentais para garantir o fornecimento de energia confiável e sustentável, enquanto, em escalas maiores, eles auxiliam na estabilização da rede e no atendimento às demandas de pico (LI; HUI; LAI, 2013).

Como podemos observar na figura 14 adiante, a estrutura típica de um sistema híbrido combina diferentes fontes de geração de energia, tecnologias de armazenamento e componentes de controle inteligente para otimizar a produção e o

consumo de energia. Essa configuração demonstra a versatilidade e a adaptabilidade desses sistemas em diversos cenários, reforçando seu papel como uma solução chave para o futuro da energia sustentável.

Figura 14 - Esquema de funcionamento de um sistema híbrido.



Fonte: Adaptado de DRAGON SOLAR, 2020.

3.6.2 Armazenamento em baterias em sistemas híbridos

O armazenamento em baterias desempenha um papel essencial na operação de sistemas híbridos, permitindo o equilíbrio entre geração e consumo de energia. A principal função das baterias nesses sistemas é armazenar o excedente de energia gerado pelas fontes renováveis, como solar e eólica, durante períodos de baixa demanda e disponibilizá-lo quando a geração não é suficiente. Além disso, as baterias oferecem uma resposta rápida a flutuações na rede elétrica, aumentando a estabilidade e a confiabilidade do sistema (KHAN et al., 2021).

Nos sistemas híbridos, as baterias de íons de lítio destacam-se como a tecnologia de armazenamento mais amplamente utilizada, devido à sua alta

densidade energética, longa vida útil e capacidade de resposta rápida. Elas são especialmente eficazes em configurações que exigem ciclos frequentes de carga e descarga, como aplicações industriais. No entanto, outras tecnologias, como baterias de chumbo-ácido, também são empregadas em sistemas híbridos específicos, dependendo das necessidades de custo, capacidade e durabilidade (MEIER et al., 2019).

Uma das vantagens do uso de baterias em sistemas híbridos é a possibilidade de desacoplar a geração da demanda em tempo real. Em regiões remotas ou sistemas *off-grid*, as baterias permitem que a energia gerada durante o dia por painéis solares ou turbinas eólicas seja utilizada à noite ou em períodos de baixa geração. Isso reduz a dependência de fontes não renováveis (BAGHAI et al., 2020).

Além do mais, os avanços em tecnologias de baterias diversas, têm ampliado sua eficiência e viabilidade econômica em sistemas híbridos. O desenvolvimento de baterias com maior densidade energética e ciclos de vida prolongados tem sido fundamental para sua integração em sistemas híbridos modernos (YANG et al., 2023).

3.6.3 Estratégias de controle

Os sistemas híbridos de energia exigem estratégias de controle eficientes para garantir sua operação otimizada, principalmente devido à diversidade de fontes de energia e tecnologias de armazenamento envolvidas. As estratégias de controle são projetadas para equilibrar a geração e o consumo, minimizar perdas, e maximizar a eficiência e a confiabilidade do sistema. Essas estratégias tornam-se ainda mais cruciais em sistemas que integram fontes intermitentes, cujas variações podem impactar diretamente a estabilidade do fornecimento energético (THOMASI; SILUK, 2022).

Uma das abordagens mais utilizadas é a gestão da demanda, que define hierarquias de fornecimento de energia com base na disponibilidade das fontes. Por exemplo, em um sistema híbrido solar-eólico-diesel, a energia gerada pelas fontes renováveis é priorizada, enquanto o gerador a diesel é ativado apenas em situações de baixa geração renovável. Essa estratégia reduz os custos operacionais e as emissões de carbono, ao mesmo tempo em que garante um fornecimento confiável (U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION, 2020).

Outro método amplamente adotado é o controle preditivo baseado em modelos,

que utiliza algoritmos para prever a geração de energia e a demanda com base em dados históricos e condições ambientais em tempo real. Essa abordagem permite que os sistemas híbridos ajustem sua operação de forma dinâmica, alocando energia de maneira eficiente entre diferentes componentes, como baterias, geradores e cargas críticas. Além disso, o controle preditivo ajuda a evitar sobrecargas e degradação excessiva das baterias, prolongando sua vida útil (KHAN et al., 2021).

O controle em tempo real, por sua vez, é outra estratégia fundamental em sistemas híbridos, especialmente em aplicações que exigem respostas rápidas a mudanças na demanda ou na geração. Esse tipo de controle utiliza sensores e dispositivos de comunicação para monitorar continuamente os parâmetros do sistema, como tensão, corrente e estado de carga das baterias. Esses dados são processados em tempo real por sistemas de gerenciamento de energia, que ajustam automaticamente a distribuição de energia para maximizar a eficiência e evitar interrupções (BAGHAI et al., 2020).

Além das estratégias baseadas em *software*, os sistemas híbridos frequentemente utilizam dispositivos de *hardware*, como inversores e conversores, para implementar o controle de fluxo de energia. Esses dispositivos são projetados para converter e regular os níveis de tensão e corrente, garantindo a compatibilidade entre diferentes componentes do sistema. Em configurações mais avançadas, os inversores também desempenham funções de monitoramento e proteção, como desconexão automática em caso de falhas na rede elétrica (MEIER et al., 2019).

O controle hierárquico é outra abordagem relevante, que divide o sistema em diferentes níveis de operação, como geração, armazenamento e distribuição. Cada nível é gerenciado de forma independente, mas conectado a uma camada superior que coordena o sistema como um todo. Essa estrutura hierárquica é particularmente eficaz em sistemas híbridos de grande escala, onde múltiplos componentes precisam operar de forma integrada para atender às demandas de forma confiável e eficiente (YANG et al., 2023).

A tabela 1 a seguir, resume as principais estratégias utilizadas, destacando suas características, vantagens e aplicações específicas, conforme discutido no texto.

Tabela 1 - Principais Estratégias de Controle em Sistemas Híbridos.

Estratégia de Controle	Descrição	Vantagens	Aplicações Principais
Controle de carga prioritária	Prioriza o uso de fontes renováveis, ativando geradores fósseis apenas quando necessário.	Redução de custos operacionais e emissões de carbono.	*Microgrids* e sistemas *off-grid*.
Controle preditivo baseado em modelos	Utiliza algoritmos para prever demanda e geração de energia, ajustando a operação dinamicamente.	Maximiza a eficiência, reduz a degradação de baterias e melhora o planejamento.	Sistemas híbridos avançados e industriais.
Controle em tempo real	Monitora parâmetros continuamente e ajusta a distribuição de energia instantaneamente.	Resposta rápida a flutuações na rede, maior estabilidade.	Sistemas críticos ou sensíveis à demanda.
Controle hierárquico	Divide o sistema em níveis de operação (geração, armazenamento e distribuição).	Coordenação eficiente de sistemas híbridos complexos.	Sistemas híbridos de grande escala.
Controle por hardware	Utiliza inversores e conversores para regular tensão, corrente e fluxo de energia.	Compatibilidade entre componentes e proteção contra falhas.	Qualquer sistema híbrido com múltiplas fontes.

Fontes: THOMASI; SILUK (2022); U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION (2020); KHAN et al. (2021); BAGHAI et al. (2020); MEIER et al. (2019); YANG et al. (2023).

3.6.4 Hibridização entre diferentes tecnologias de baterias

A hibridização de tecnologias de baterias refere-se ao uso combinado de dois ou mais tipos de sistemas de armazenamento com características complementares, com o objetivo de aproveitar as vantagens de cada tecnologia e mitigar suas limitações individuais. Essa abordagem tem sido aplicada em diversas arquiteturas de armazenamento em sistemas de energia elétrica, tanto em escalas utilitárias quanto em aplicações residenciais (REDELES-MIRANDA et al., 2024).

Uma das motivações centrais para a hibridização é a necessidade de conciliar alta densidade de energia, propriedade típica de baterias de íons de lítio, com

capacidade de resposta rápida e longa duração de ciclo, características de tecnologias alternativas, como baterias chumbo-ácido. Nesse contexto, sistemas híbridos de armazenamento de energia são projetados para otimizar desempenho dinâmico, prolongar a vida útil do conjunto e melhorar a eficiência energética geral (RAMESH et al., 2024).

Estudos experimentais demonstram que a combinação direta de baterias de íons de lítio com baterias de chumbo-ácido pode resultar em vantagens operacionais significativas quando controlada adequadamente, como em um sistema híbrido diretamente conectado composto por baterias de íons de lítio e chumbo-ácido, mostrando que estratégias de controle que alocam cargas transitórias à bateria de chumbo-ácido podem reduzir o estresse de ciclos profundos na bateria de íons de lítio, prolongando sua vida útil sem comprometimento substancial da capacidade energética total (DASCALU et al., 2024).

A hibridização envolvendo baterias de íons de lítio, baterias de chumbo-ácido e baterias de íons de lítio de segunda vida também tem sido estudada como alternativa de arquitetura de alto desempenho com custo potencialmente reduzido. Nesse modelo, as baterias de segunda vida operam junto com baterias novas em uma topologia híbrida, resultando em um sistema que combina alta energia utilitária com maior sustentabilidade econômica e ambiental (KHAZALI et al., 2024).

A literat ura também vem explorando combinações emergentes entre tecnologias de baterias diferentes, como baterias de íons de sódio e de íons de lítio. Esses estudos indicam que configurações híbridas podem proporcionar equilíbrio entre custo e desempenho, visto que baterias de íons de sódio tendem a ser mais abundantes e menos onerosas que as de íons de lítio, enquanto estas últimas ainda oferecem maior densidade energética. A análise comparativa de desempenho e configuração de pacotes híbridos revela que a conexão entre as duas químicas pode resultar em características de potência únicas (ZHU et al., 2025).

A segurança operativa é outro aspecto crítico da hibridização de baterias, pois a fuga térmica e propagação em pacotes híbridos de íons de sódio e íons de lítio mostram que a interação térmica entre tecnologias pode influenciar a segurança geral do sistema. Esses resultados apontam para a necessidade de estratégias de gerenciamento térmico integradas e controle ativo (ZHU et al., 2025).

Nesse sentido, a escolha da combinação de tecnologias para um sistema híbrido depende fortemente do perfil de carga, das condições ambientais, dos

requisitos de potência/energia e da estratégia de controle adotada. A literatura aponta que métodos de gerenciamento de energia que considerem características de degradação, custo e necessidades operativas são essenciais para maximizar os benefícios de um sistema híbrido de baterias (FANG; SHEK; SUN, 2025).

3.7 MODELAGEM E SIMULAÇÃO DE BATERIAS

3.7.1 Tipos de modelos de baterias

A modelagem precisa de baterias é essencial para simulações confiáveis e otimização do desempenho de sistemas de armazenamento de energia. Os modelos de baterias são categorizados conforme sua abordagem matemática e nível de fidelidade ao comportamento real da bateria. Diferentes modelos são utilizados dependendo do objetivo da simulação, podendo focar em características elétricas, químicas ou térmicas (YAO et al., 2013).

Os modelos elétricos equivalentes são amplamente utilizados devido à sua simplicidade e capacidade de representar a dinâmica da bateria com precisão suficiente para diversas aplicações. Um dos modelos mais comuns é o Modelo de Thevenin, que utiliza uma fonte de tensão, uma resistência interna e um ou mais circuitos RC (resistência-capacitância) para representar o comportamento dinâmico da bateria. Esse modelo é adequado para simulações rápidas, mas pode apresentar limitações ao representar variações não-lineares de tensão durante os ciclos de carga e descarga. Já o Modelo de Segunda Ordem, que inclui dois pares de circuitos RC, melhora a precisão ao capturar melhor os efeitos transitórios e a polarização da bateria (YAO et al., 2013).

Outro modelo amplamente utilizado é o Modelo Shepherd, que descreve a tensão da bateria como uma função do estado de carga e da corrente de descarga. Esse modelo tem a vantagem de ser baseado em equações analíticas simples e ser facilmente implementado em Simulink. No entanto, sua precisão pode ser limitada para representar fenômenos dinâmicos, como a histerese de tensão e o efeito da taxa de carga (*C-rate*) na capacidade da bateria (DAOWD et al., 2010).

A modelagem por circuito equivalente avançado busca resolver algumas dessas limitações, incluindo parâmetros variáveis, como o SoC e a temperatura da bateria. Modelos baseados em circuitos equivalentes com múltiplas redes RC

conseguem prever variações de tensão mais realistas ao longo dos ciclos de carga e descarga, tornando-os ideais para aplicações que exigem maior precisão, como o controle avançado de baterias em veículos elétricos (THAKKAR et al., 2020).

Além dos modelos elétricos, os modelos térmicos são essenciais para prever o comportamento da temperatura da bateria sob diferentes condições de operação. Esses modelos são fundamentais para prever o superaquecimento da bateria e desenvolver estratégias de resfriamento. Os modelos térmicos podem ser combinados com modelos elétricos para criar simulações mais abrangentes, capturando os efeitos da temperatura sobre a resistência interna e a degradação da capacidade (POONSUK; PONGYUPINPANICH, 2016).

3.7.2 Parâmetros na modelagem de baterias

A precisão da modelagem de baterias depende diretamente da definição de seus parâmetros elétricos, térmicos e dinâmicos. Esses parâmetros determinam o comportamento da bateria em diferentes condições operacionais, sendo essenciais para a simulação de ciclos de carga e descarga. A escolha adequada dos parâmetros permite prever com maior fidelidade a resposta da bateria a variações de corrente, tensão e temperatura, garantindo que a simulação seja representativa do sistema real (POONSUK; PONGYUPINPANICH, 2016).

Um dos principais parâmetros é a capacidade da bateria (Ah), que define a quantidade total de carga elétrica que pode ser armazenada e liberada durante um ciclo de operação. A capacidade efetiva de uma bateria varia conforme fatores como temperatura e profundidade de descarga, ajustando os valores conforme os efeitos da taxa de descarga e o envelhecimento da célula (KURNIAWAN et al., 2016).

Outro parâmetro crítico é a resistência interna (R), responsável pelas perdas ôhmicas e pela queda de tensão durante a operação da bateria. A resistência interna pode ser modelada por circuitos equivalentes, variando de acordo com o estado de carga, a corrente aplicada e a temperatura da célula (THAKKAR; RAO; SAWANT, 2020). A presença de múltiplas redes RC no modelo elétrico permite capturar a resposta transitória da bateria e melhorar a precisão da simulação.

O estado de carga é outro parâmetro fundamental na modelagem de baterias, pois representa a quantidade de energia disponível em relação à capacidade total. Métodos de estimativa de SOC, como *Coulomb Counting* e *Kalman Filter*, são

amplamente utilizados para prever a variação do SOC ao longo do tempo. A precisão da estimativa impacta diretamente a confiabilidade do gerenciamento da bateria, especialmente em aplicações de armazenamento de energia (POONSUK; PONGYUPINPANICH, 2016).

A tensão em circuito aberto (OCV) é um dos parâmetros mais utilizados na modelagem, pois define a relação entre o SOC e a tensão terminal da bateria quando nenhuma carga está conectada. A curva OCV-SOC pode ser caracterizada por equações polinomiais, permitindo uma melhor representação do comportamento da bateria sob diferentes estados de carga. A OCV é amplamente utilizada em modelos baseados em MATLAB/Simulink para calcular a tensão real da célula durante ciclos de carga e descarga (DAOWD et al., 2010).

A influência da temperatura na resposta elétrica da bateria também deve ser considerada. O aumento da temperatura reduz a resistência interna e melhora a capacidade de descarga da bateria, mas pode acelerar o processo de degradação química. Modelos térmicos são empregados para prever a dissipação de calor e seu impacto na eficiência da bateria ao longo dos ciclos de operação (SHIRGUPPE; HUGAR, 2023).

3.7.3 Modelagem e simulações de baterias de lítio utilizando Matlab/Simulink

Os modelos desenvolvidos no MATLAB/Simulink podem ser aplicados a diferentes contextos, como sistemas híbridos e redes inteligentes, permitindo a integração da bateria com inversores e sistemas de controle de potência. A flexibilidade da plataforma permite a implementação de estratégias avançadas de carregamento e descarregamento, ajustando parâmetros como tempo de resposta, eficiência energética e impacto do carregamento rápido no envelhecimento da célula. As simulações realizadas com modelos dinâmicos permitem avaliar o comportamento da bateria em cenários de variação de carga e prever sua vida útil de forma mais precisa (THAKKAR; RAO; SAWANT, 2020).

A integração da bateria com sistemas de controle também pode ser modelada no MATLAB/Simulink, permitindo a simulação de algoritmos preditivos e estratégias de otimização de fluxo de energia. A possibilidade de testar diferentes condições operacionais reduz os riscos de falhas em aplicações reais, tornando a simulação um elemento essencial no desenvolvimento de novas arquiteturas para sistemas de

armazenamento. Além disso, a modelagem permite validar estratégias de mitigação de perdas térmicas e prever o desempenho da bateria sob diferentes taxas de carga e descarga (POONSUK; PONGYUPINPANICH, 2016).

Outro aspecto crítico da simulação é a capacidade de prever a degradação da bateria ao longo do tempo. A implementação de modelos que consideram efeitos como a perda de capacidade e aumento da resistência interna proporciona uma estimativa mais realista do tempo de vida útil da bateria. O MATLAB/Simulink oferece ferramentas que permitem validar esses modelos com dados experimentais, garantindo maior confiabilidade na simulação e facilitando a comparação entre diferentes configurações de baterias e perfis de operação (SHIRGUPPE; HUGAR, 2023).

A utilização do MATLAB/Simulink na modelagem e simulação de baterias permite realizar testes avançados sem a necessidade de experimentação física imediata. Essa abordagem reduz custos e acelera o desenvolvimento de novas tecnologias, garantindo que os sistemas de armazenamento sejam projetados com maior eficiência e segurança (MATHWORKS, 2024).

3.7.4 Desafios e limitações na modelagem e simulação

A degradação das baterias ao longo do tempo é um fator crítico na modelagem, pois altera suas características elétricas e reduz sua capacidade útil. A modelagem desses processos requer rigor para coleta de dados, além de algoritmos avançados para prever a evolução da capacidade da bateria ao longo do tempo. A falta de padronização nos testes de envelhecimento e a variação nas condições de uso dificultam a obtenção por modelos generalizáveis e aplicáveis a diferentes sistemas (CEAR, 2024).

A estimativa do estado de saúde da bateria é um dos maiores desafios na simulação, pois a degradação não ocorre de maneira linear e depende de múltiplos fatores externos, como temperatura e perfil de uso. Métodos tradicionais baseados em circuitos equivalentes frequentemente falham em capturar variações não lineares da bateria, levando a erros na previsão da vida útil remanescente. O uso de aprendizado de máquina tem mostrado maior precisão na estimativa do SOH, mas a necessidade de grandes volumes de dados para treinamento dos modelos limita sua aplicabilidade em diversas situações (REIS et al., 2023).

A parametrização dos modelos de baterias exige a determinação de variáveis como resistência interna, coeficientes de difusão e capacitâncias, que podem variar significativamente entre células de diferentes fabricantes e lotes de produção. Pequenas variações nos processos de fabricação impactam os valores desses parâmetros, tornando necessária a calibração frequente dos modelos. Além disso, os métodos de obtenção desses parâmetros, como espectroscopia de impedância eletroquímica e testes de descarga controlada, são demorados e exigem equipamentos laboratoriais sofisticados (UFSC, 2023).

A complexidade computacional dos modelos é outro fator limitante. Modelos eletroquímicos detalhados exigem a solução de equações complexas, o que resulta em tempos de simulação elevados. Em aplicações que exigem respostas em tempo real, como gerenciamento de energia em veículos elétricos, simplificações no modelo são necessárias para reduzir a carga computacional. No entanto, a simplificação pode comprometer a precisão da simulação, exigindo um equilíbrio entre fidelidade e eficiência computacional (ARAI et al., 2022).

Superar essas limitações requer avanços na coleta e processamento de dados experimentais, desenvolvimento de algoritmos híbridos que combinem diferentes abordagens de modelagem e aprimoramento dos métodos de calibração. O uso de simulações para validar estratégias de controle e prever o desempenho da bateria sob diferentes condições operacionais continua sendo essencial para o desenvolvimento de sistemas de armazenamento de energia mais confiáveis e eficientes (UFSC, 2023).

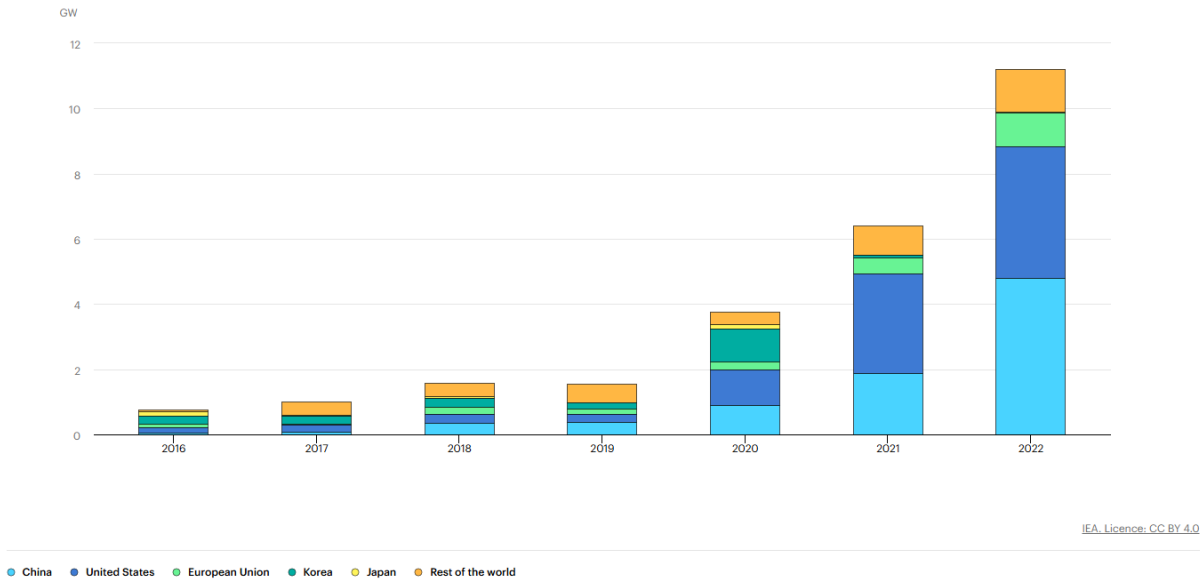
3.8 PANORAMA GLOBAL E NACIONAL DO MERCADO DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

3.8.1 Crescimento do mercado global de baterias e sistemas de armazenamento

O mercado global de baterias e sistemas de armazenamento de energia por baterias tem apresentado crescimento acelerado na última década, segundo a Agência Internacional de Energia (IEA), o armazenamento por baterias consolidou-se como uma das tecnologias de crescimento mais rápido no setor energético global. A partir de 2018, observa-se aceleração significativa na adição de capacidade instalada, com recordes sucessivos nos anos mais recentes (IEA, 2023).

Como pode ser observado na Figura 15, as adições anuais de armazenamento em escala de rede elétrica apresentaram crescimento expressivo no período entre 2017 e 2022, com aumento particularmente acentuado a partir de 2020.

Figura 15 - Adições anuais globais de capacidade de armazenamento em baterias em escala de rede elétrica (2017–2022).

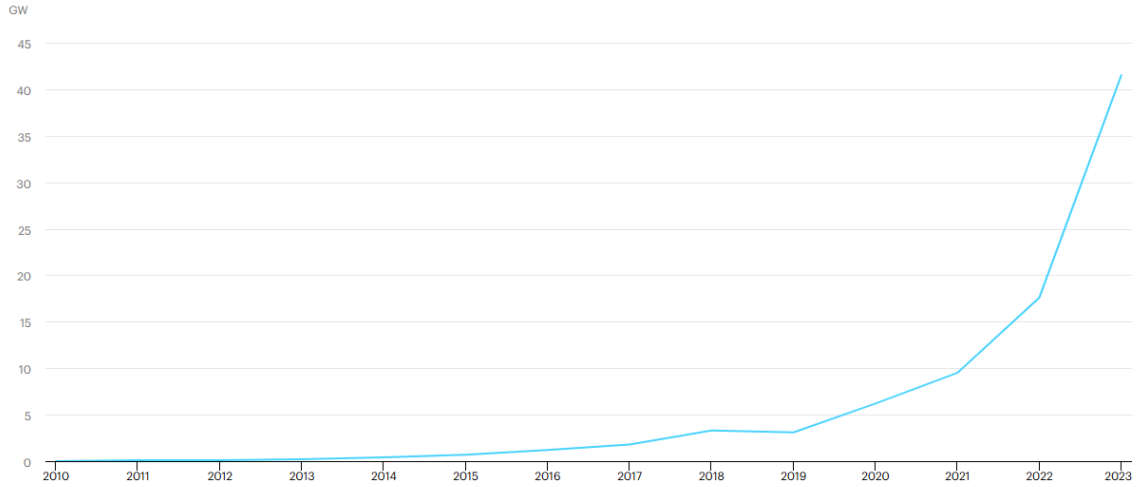


Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2023).

A Figura 15 evidencia que, após um período inicial de crescimento gradual, o mercado passou por expansão acelerada nos anos de 2021 e 2022, refletindo tanto o amadurecimento tecnológico quanto o fortalecimento de políticas públicas voltadas à descarbonização e à segurança energética. Esse avanço também está associado ao aumento da demanda por serviços ancilares, como o controle de frequência (IEA, 2023).

Paralelamente à expansão anual, observa-se crescimento consistente da capacidade acumulada global de armazenamento por baterias ao longo da última década. A trajetória histórica demonstra que o armazenamento, anteriormente restrito a aplicações pontuais, passou a ocupar papel estrutural nos sistemas elétricos modernos. A Figura 16 apresenta a evolução da capacidade global adicionada entre 2010 e 2023, evidenciando comportamento exponencial, principalmente a partir de 2018 (IEA, 2023).

Figura 16 - Evolução da capacidade global adicionada de armazenamento por baterias (2010–2023).



Fonte: INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA) (2023).

O crescimento da capacidade instalada apresenta um aumento significativo a partir de 2020, período marcado por maior competitividade econômica das baterias de íons de lítio e pela consolidação de projetos em larga escala. A forte expansão entre 2021 e 2023 reflete não apenas a redução dos custos tecnológicos, mas também a integração cada vez mais intensa entre armazenamento e geração renovável (IEA, 2023).

A redução de custos desempenha papel central nesse processo. Estudos indicam que o custo dos sistemas de baterias de íons de lítio apresentou queda superior a 80% desde 2010, resultado de ganhos de escala, inovação tecnológica e expansão da cadeia produtiva global. Essa tendência ampliou a viabilidade econômica do armazenamento tanto em aplicações conectadas à rede quanto em sistemas híbridos (NYKVIST; NILSSON, 2015; SCHMIDT et al., 2017).

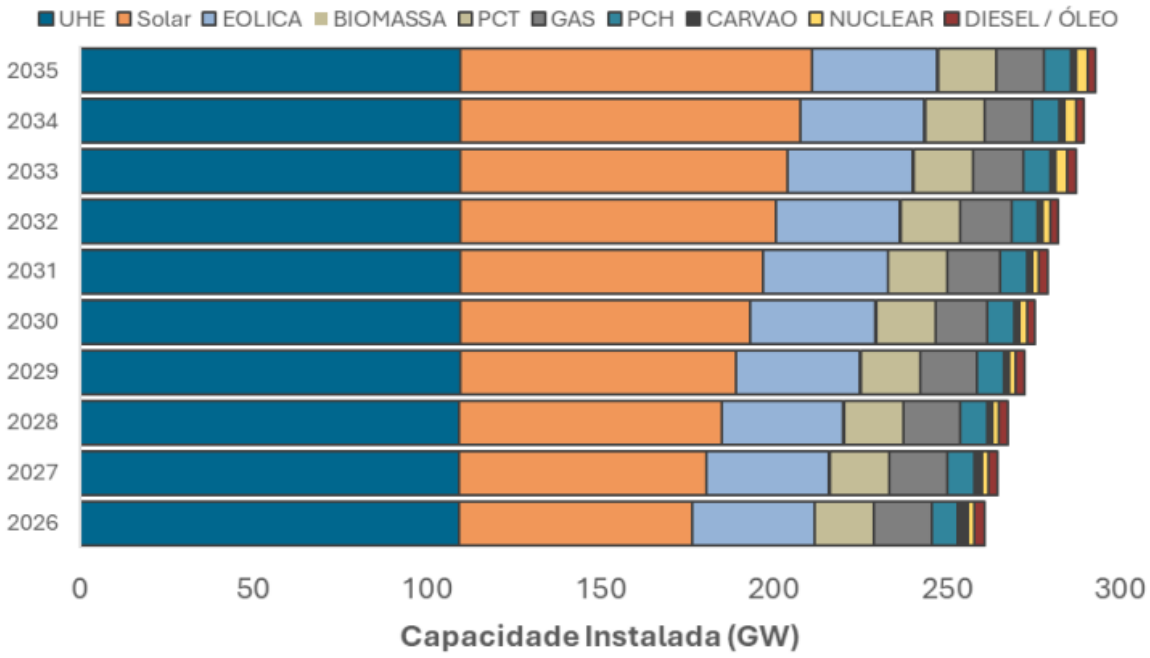
Outro ponto importante que resultou nesse crescimento, foi o mercado de veículos elétricos, pois contribuiu para o fortalecimento da cadeia global de produção de baterias, promovendo economias de escala e acelerando investimentos em pesquisa e desenvolvimento. Esse efeito cruzado entre mobilidade elétrica e armazenamento estacionário tem sido apontado como fator estratégico para a consolidação do setor em âmbito mundial (IEA, 2023).

3.8.2 Panorama do mercado brasileiro de armazenamento de energia

O setor elétrico brasileiro encontra-se em processo contínuo de transformação estrutural, caracterizado pela ampliação da participação de fontes renováveis variáveis e pela expansão significativa da minigeração distribuída. Essa dinâmica altera o perfil operativo do Sistema Interligado Nacional (SIN), ampliando a necessidade de mecanismos adicionais de flexibilidade e controle sistêmico. Nesse contexto, o armazenamento de energia por baterias passa a assumir papel estratégico no planejamento energético nacional (EPE, 2026).

Conforme apresentado no Plano Decenal de Expansão de Energia 2035, a evolução da capacidade instalada existente e contratada do SIN demonstra crescimento expressivo das fontes solar e eólica ao longo dos próximos 10 anos. A Figura 17 ilustra essa expansão, evidenciando aumento consistente da participação dessas fontes na matriz elétrica brasileira (EPE, 2026).

Figura 17 - Evolução da Capacidade Instalada Existente e Contratada do SIN (2026–2035).



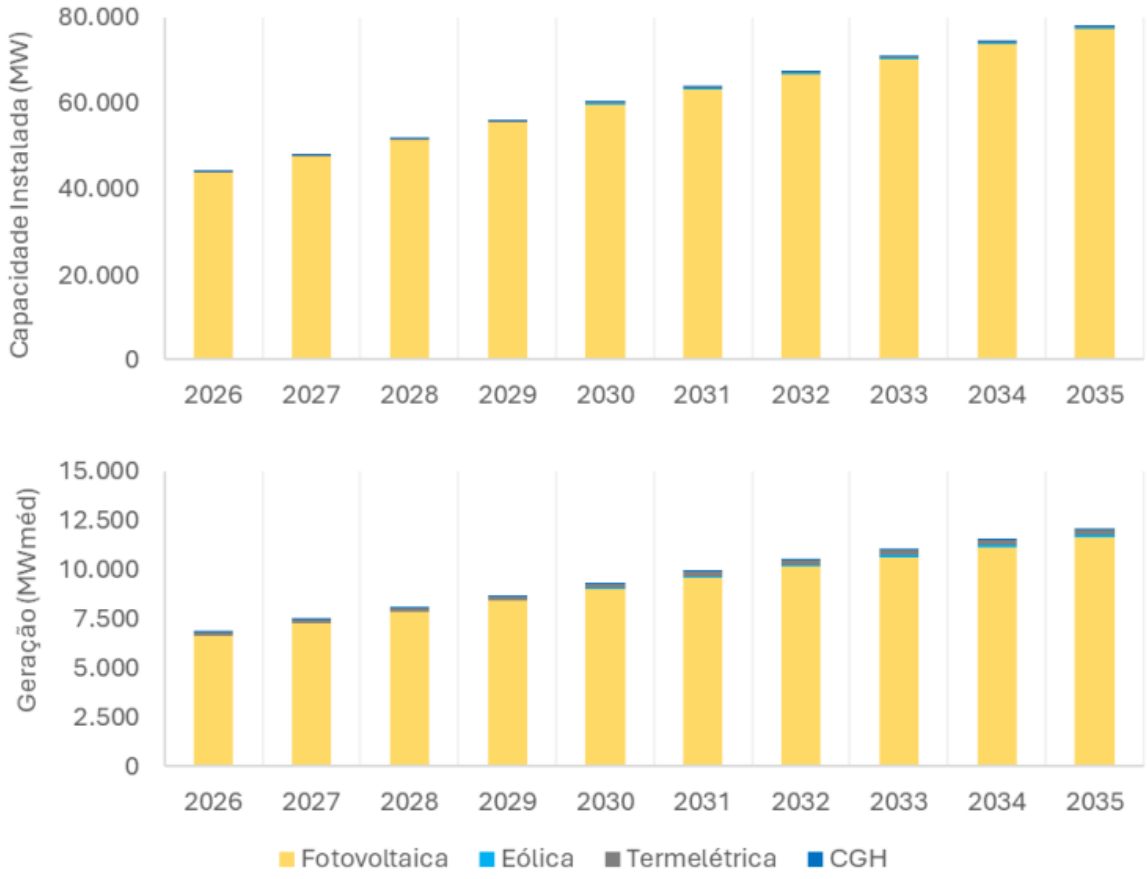
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2026)

Observa-se que, embora a geração hidrelétrica permaneça relevante, há progressiva diversificação da matriz com incremento da capacidade solar e eólica.

Essa transição, ainda que positiva sob questões ambientais, intensifica desafios associados à variabilidade da geração e à necessidade de maior coordenação operacional (EPE, 2026).

Além da expansão da geração centralizada, destaca-se o crescimento acelerado da minigeração distribuída, predominantemente fotovoltaica. A Figura 18 apresenta a expansão projetada em capacidade instalada e energia gerada no período de 2026 a 2035, demonstrando trajetória ascendente consistente.

Figura 18 - Expansão em capacidade e em energia da minigeração distribuída (2026–2035).



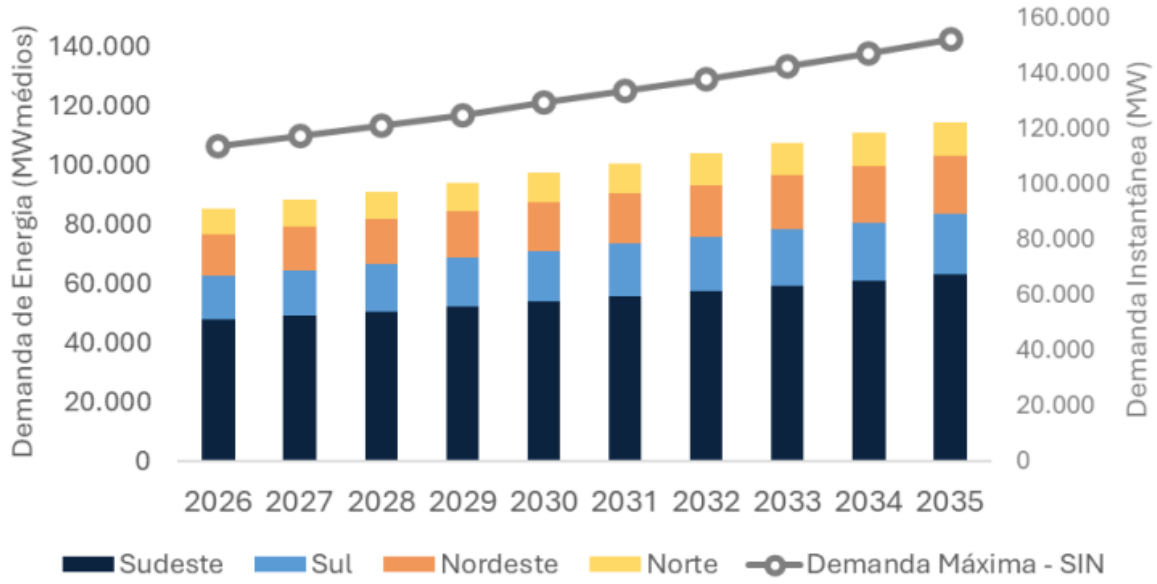
Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2026).

A predominância da fonte solar, acentua a concentração da geração no período diurno, gerando descompassos entre produção e consumo ao longo do dia. Esse fenômeno tende a ampliar a necessidade de soluções de armazenamento para aproveitamento mais eficiente da energia gerada, reduzindo perdas e minimizando

sobrecargas locais na rede de distribuição (EPE, 2026).

Paralelamente, a projeção de crescimento da demanda do SIN indica elevação progressiva tanto do consumo total quanto da demanda máxima instantânea. Conforme ilustrado na Figura 19, observa-se tendência contínua de aumento da demanda no cenário de referência até 2035.

Figura 19 - Projeções de Demanda do Cenário de Referência (2026–2035).



Fonte: Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2026)

O crescimento da demanda máxima, associado à maior participação de fontes intermitentes, amplia a relevância de tecnologias capazes de fornecer serviços ancilares, como regulação de frequência, controle de tensão e suporte em momentos de pico. Nesse cenário, os sistemas de armazenamento em baterias configuram-se como solução técnica adequada para aumentar a flexibilidade operativa do sistema elétrico brasileiro, contribuindo para a redução de cortes de geração renovável, postergando investimentos em expansão de transmissão e reforçando a confiabilidade do sistema (EPE, 2026).

Dessa forma, ainda que o mercado brasileiro de armazenamento esteja em estágio inicial quando comparado aos principais mercados internacionais, os dados de expansão da matriz elétrica, crescimento da minigeração distribuída e elevação da demanda indicam ambiente estruturalmente favorável à incorporação progressiva de sistemas BESS. O planejamento energético oficial reconhece implicitamente essa

necessidade ao destacar o papel da flexibilidade e da modernização do setor elétrico no horizonte decenal, reforçando a relevância do armazenamento como elemento estratégico na transição energética nacional (EPE, 2026).

3.9 ASPECTOS REGULATÓRIOS E NORMATIVOS APLICÁVEIS A SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO NO BRASIL

A inserção de sistemas de armazenamento de energia no setor elétrico brasileiro vem sendo objeto de discussão regulatória nos últimos anos, especialmente diante da crescente participação de fontes renováveis variáveis na matriz elétrica nacional. Historicamente, as normas brasileiras foram estruturadas para agentes de geração, transmissão, distribuição e comercialização, não contemplando de forma específica ativos com natureza híbrida. Essa lacuna regulatória passou a ser mais evidente à medida que aplicações práticas começaram a ser testadas no Sistema Interligado Nacional (SILVERA et al., 2018).

A ausência de enquadramento regulatório específico gera incertezas quanto à classificação do armazenamento como carga, geração ou ativo de rede, impactando diretamente a incidência de encargos, tarifas e obrigações setoriais. Os autores destacam que a definição conceitual é fundamental para evitar distorções econômicas, especialmente no que se refere à dupla cobrança de tarifas de uso do sistema quando o BESS opera em ciclos de carga e descarga (SILVERA et al., 2018).

No âmbito institucional, a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) iniciou processo estruturado de discussão regulatória por meio da Consulta Pública nº 39/2023, que teve como objetivo avaliar alternativas de enquadramento regulatório para sistemas de armazenamento no Brasil. Conforme discutido na própria Consulta Pública (CP), o armazenamento apresenta características distintas dos modelos tradicionais de geração e consumo, exigindo definição específica quanto à sua participação nos ambientes de contratação regulado e livre, bem como quanto à prestação de serviços ancilares (ANEEL, 2023).

A análise regulatória reconhece que o armazenamento pode desempenhar múltiplas funções sistêmicas, incluindo arbitragem temporal de energia, controle de frequência, suporte de tensão e mitigação de congestionamentos (ANEEL, 2023). Esse entendimento encontra respaldo em estudos técnicos aplicados ao contexto brasileiro, que demonstram, por meio de estudos de caso no sistema de transmissão,

a viabilidade técnica do uso de BESS para prestação de serviços de flexibilidade e reforço operacional da rede (FALCÃO et al. 2024).

No que se refere à participação em mercados de energia, espera-se que o desenho regulatório deve permitir que sistemas de armazenamento atuem de forma competitiva tanto na comercialização de energia quanto na prestação de serviços ancilares, evitando barreiras artificiais à entrada. A definição clara de direitos e obrigações dos agentes de armazenamento é condição necessária para viabilizar investimentos privados e garantir previsibilidade regulatória (SATO, 2025).

Do ponto de vista do planejamento energético, o Plano Decenal de Expansão de Energia 2035 reconhece o armazenamento como tecnologia estratégica para a modernização do setor elétrico brasileiro. Embora o documento não estabeleça regulamentação específica, ele reforça a importância da flexibilidade sistêmica diante da expansão da geração solar e eólica, criando base técnica para o aprimoramento normativo futuro (EPE, 2026).

Com isso, observa-se que o marco regulatório brasileiro para armazenamento de energia encontra-se em processo de construção, caracterizado por avanços institucionais recentes, mas ainda dependente de consolidação normativa definitiva. A definição clara quanto ao enquadramento jurídico, tratamento tarifário e participação em mercados de energia constitui etapa fundamental para viabilizar a expansão estruturada no Brasil (SATO, 2025).

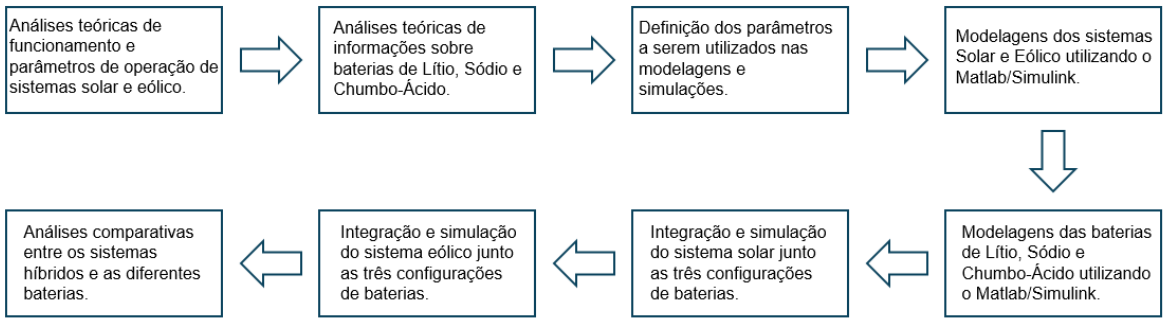
4 METODOLOGIA

O desenvolvimento deste trabalho baseou-se na análise, modelagem e simulação de sistemas híbridos de geração e armazenamento de energia, integrando fontes renováveis e diferentes tecnologias de baterias. Considerando a complexidade dos sistemas estudados, foi necessária a utilização de ferramentas computacionais, aliadas à fundamentação teórica previamente apresentada, de forma a permitir a avaliação do comportamento energético e operacional das diferentes configurações analisadas.

Dessa forma, a metodologia adotada envolveu etapas sequenciais que compreendem desde o estudo teórico dos sistemas e tecnologias envolvidas, até a modelagem, simulação e análise comparativa dos resultados obtidos. Essas etapas foram estruturadas de modo a garantir coerência entre os modelos desenvolvidos e

os objetivos propostos no trabalho. Na figura 20 a seguir, apresenta-se o fluxograma da metodologia adotada.

Figura 20 - Fluxograma da metodologia utilizada no desenvolvimento do estudo.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

A etapa inicial do trabalho consistiu nos estudos dos sistemas de geração solar fotovoltaica e eólica, incluindo seus princípios de funcionamento, parâmetros operacionais e influência de variáveis ambientais, como irradiância solar, temperatura e velocidade do vento, fundamentais para a representação dos sistemas.

Em seguida, foram realizadas análises teóricas das tecnologias de baterias de íons de lítio, íons de sódio e chumbo-ácido, considerando seus mecanismos de funcionamento, características operacionais, eficiência, ciclo de vida e limitações, de forma a embasar as etapas posteriores de modelagem e simulação.

Com base nos estudos teóricos, foram definidos os principais parâmetros utilizados nas modelagens, incluindo variáveis elétricas, condições operacionais, limites de funcionamento das baterias e características dos sistemas de geração, garantindo consistência nas simulações realizadas.

A modelagem dos sistemas solar e eólico foi realizada no ambiente MATLAB/Simulink, utilizando blocos representativos dos principais componentes, como arranjos fotovoltaicos, turbinas eólicas e sistemas de conversão de energia, permitindo a simulação do comportamento dinâmico da geração.

De forma complementar, foram desenvolvidos modelos das baterias de íons de lítio, íons de sódio e chumbo-ácido no MATLAB/Simulink, considerando seus parâmetros elétricos e operacionais, bem como os processos de carga e descarga ao longo do tempo.

Após a modelagem individual dos sistemas, foi realizada a integração do sistema fotovoltaico com as diferentes tecnologias de baterias, possibilitando a simulação de sistemas híbridos e a análise do desempenho energético em diferentes condições operacionais.

De maneira análoga, foi realizada a integração do sistema eólico com as três tecnologias de baterias estudadas, permitindo avaliar o comportamento dos sistemas híbridos sob condições de geração variável. As simulações realizadas possibilitaram a obtenção de dados como tensão, corrente e estado de carga das baterias, permitindo a análise do desempenho dos sistemas ao longo do tempo.

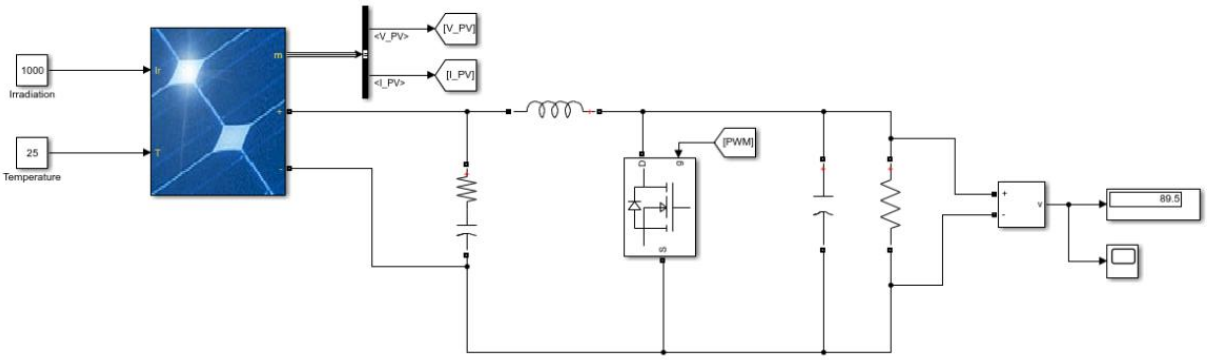
Por fim, foi realizada a análise comparativa entre os sistemas híbridos, considerando os diferentes tipos de baterias, com o objetivo de avaliar parâmetros como tempo de carregamento, estabilidade do sistema e comportamento do estado de carga, permitindo a identificação das tecnologias mais adequadas para aplicação em sistemas híbridos de energia.

4.1 MODELAGEM DE UM SISTEMA SOLAR

A presente seção apresenta a estrutura completa de um sistema fotovoltaico isolado, com o objetivo de analisar a eficiência energética e a estabilidade do sistema frente a condições padrão de irradiância e temperatura.

A figura 21, representa o modelo de um sistema fotovoltaico construído no ambiente Simulink, composto por um painel solar, um conversor CC-CC do tipo *boost*, um circuito de controle por modulação por largura de pulso (PWM) e uma carga resistiva conectada ao barramento de saída. O sistema foi simulado para operar com condições ambientais fixas, sendo a irradiância ajustada para 1000 W/m² e a temperatura da célula fixada em 25 °C, representadas por blocos constantes na parte esquerda do diagrama.

Figura 21 - Diagrama do sistema fotovoltaico com conversor boost e MPPT no Simulink.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O primeiro bloco visual representa o arranjo fotovoltaico (*PV Array*), no qual as entradas de irradiância (Ir) e temperatura (T) são conectadas. Esse arranjo simula o comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos, fornecendo como saída os sinais de tensão (V_PV) e corrente (I_PV). Esses sinais são encaminhados para medições e controle posterior. A saída do painel é conectada a um circuito indutivo, representado por um indutor, fundamental para o funcionamento do conversor *boost,* uma vez que é o componente responsável por armazenar energia temporariamente durante o chaveamento.

Em seguida, o circuito inclui um diodo retificador, posicionado após o indutor, que permite a condução de corrente apenas em um sentido, garantindo que a energia armazenada na fase *ON* do chaveamento seja transferida corretamente para o capacitor de saída durante a fase *OFF*. Logo após o diodo, observa-se o bloco do transistor MOSFET, chave principal do conversor, controlado por um sinal de PWM proveniente do sistema de controle.

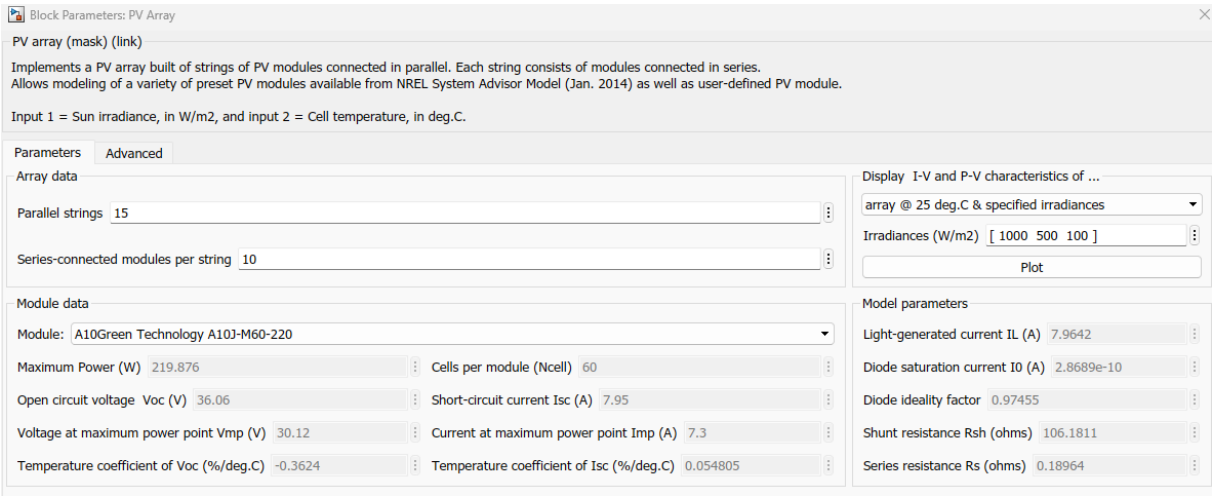
O conversor é complementado por dois capacitores de filtragem, o primeiro está posicionado antes da carga, e o segundo está localizado após o MOSFET, atuando como filtro para suavizar as ondulações da tensão e garantir uma saída estável. Após os capacitores, a energia elétrica é aplicada sobre uma carga resistiva, representando o consumo simulado do sistema.

A tensão de saída do sistema é medida por um bloco de medição conectado entre os terminais da carga e, posteriormente, essa tensão é encaminhada para um bloco display, onde o valor final da tensão aparece na simulação. Além disso, a malha

de controle PWM, que será abordada posteriormente, é conectada ao terminal de controle do transistor MOSFET, sendo responsável por ajustar o ciclo de trabalho do conversor com base nos algoritmos de MPPT e PI apresentados nas figuras seguintes.

A figura 22 a seguir, apresenta a parametrização do bloco *PV Array*, responsável por representar matematicamente o arranjo de módulos fotovoltaicos no ambiente Simulink. O bloco permite simular o comportamento elétrico de uma matriz de painéis solares em função da irradiância (W/m²) e da temperatura da célula (°C), possibilitando avaliar a geração de energia sob diferentes condições ambientais e configurações estruturais.

Figura 22 - Parâmetros do arranjo fotovoltaico configurado no bloco *PV Array.*



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

No campo *Array data*, observa-se que foram definidas 15 *strings* em paralelo, cada uma composta por 10 módulos conectados em série, totalizando 150 módulos fotovoltaicos. Essa organização influencia diretamente na tensão e na corrente do arranjo: a conexão em série eleva a tensão total, enquanto a conexão em paralelo aumenta a corrente disponível. Essa estrutura é comum em aplicações de médio porte, onde se busca um equilíbrio entre nível de tensão e capacidade de corrente para alimentar cargas em corrente contínua ou sistemas híbridos.

Na seção *module data*, o modelo selecionado foi o A10Green Technology A10J-M60-220, um painel comercial cujas especificações incluem: potência máxima de 219,876 W, tensão de circuito aberto de 36,06 V, tensão no ponto de máxima potência (Vmp) de 30,12 V, corrente de curto-circuito (Isc) de 7,95 A e corrente no ponto de

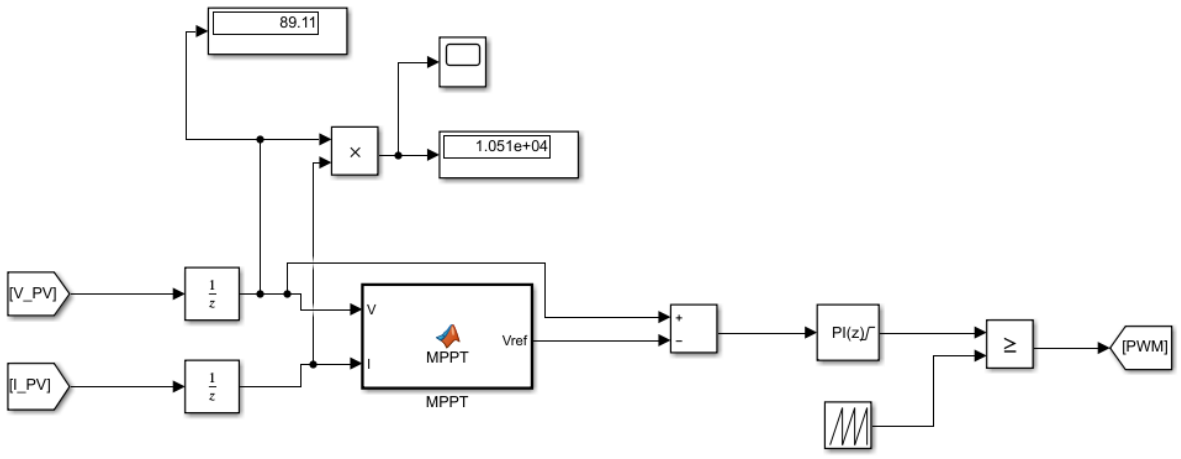
máxima potência (Imp) de 7,3 A. Os coeficientes de temperatura também estão incluídos, sendo o de tensão de circuito aberto igual a –0,3624%/°C, indicando a sensibilidade da saída de tensão frente ao aumento da temperatura da célula.

À direita do painel, estão os parâmetros elétricos do modelo de diodo equivalente, utilizados internamente pelo Simulink para representar com fidelidade o comportamento não linear da célula solar. Os campos incluem: corrente gerada pela luz (IL), corrente de saturação do diodo (I0), fator de idealidade do diodo, resistência de *shunt* (Rsh) e resistência série (Rs). Esses valores, obtidos a partir de dados reais do fabricante ou estimativas, são fundamentais para simular curvas I-V e P-V que refletem o desempenho real do módulo.

A configuração apresentada permite ao usuário visualizar as curvas características I-V e P-V para diferentes condições de irradiância, como indicado no campo "*Irradiances* [W/m²]" com os valores 1000, 500 e 100 W/m². Isso facilita a análise do comportamento dinâmico do sistema em regimes típicos de operação e auxilia na validação da eficiência do controle MPPT implementado.

A figura 23 abaixo, apresenta o diagrama do subsistema responsável pelo controle de rastreamento do ponto de máxima potência, fundamental para maximizar a eficiência de conversão da energia solar no sistema. A estrutura é baseada no método Perturbação e Observação (P&O), que realiza variações incrementais na tensão de referência (Vref) com base nas medições instantâneas de potência, tensão e corrente da saída do arranjo fotovoltaico.

Figura 23 - Diagrama do sistema de controle MPPT baseado no método P&O.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

As entradas do subsistema são os sinais de tensão (V_PV) e corrente (I_PV) do painel solar, que passam por dois blocos de atraso unitário (1/z) para armazenamento dos valores anteriores. Essa operação é essencial para o cálculo da derivada da potência em relação à tensão (ΔP/ΔV), permitindo identificar se o sistema se aproxima ou se afasta do ponto de máxima potência.

O núcleo do controle é o bloco identificado como MPPT, implementado por meio de uma função personalizada em MATLAB (detalhada na figura 21). Esse bloco recebe os sinais de tensão e corrente e devolve como saída o valor de Vref, tensão de referência a ser perseguida pelo conversor *boost*. A lógica do algoritmo é baseada na comparação entre os valores atuais e anteriores de potência e tensão. Caso a perturbação cause aumento de potência, a tensão de referência é ajustada na mesma direção da perturbação; caso contrário, o ajuste ocorre na direção oposta.

A saída Vref gerada pelo bloco MPPT é comparada com a tensão medida do sistema por meio de um bloco somador com sinal invertido. O erro resultante é enviado a um controlador PI discreto, que suaviza as respostas e melhora a estabilidade do sistema. A ação do controlador define o valor do ciclo de trabalho necessário para acionar o conversor *boost* de forma que a tensão de entrada seja regulada até alcançar o valor ótimo.

Por fim, o sinal resultante é enviado a um bloco comparador (modulador PWM), que gera o pulso de acionamento para o interruptor do conversor. O modulador baseia-se na comparação entre o sinal de controle e uma forma de onda que define a largura do pulso. Esse controle é fundamental para ajustar dinamicamente a tensão de entrada do painel, otimizando a extração de energia em tempo real.

Essa estrutura completa garante que o sistema fotovoltaico opere continuamente em seu ponto de máxima eficiência, mesmo sob variações na irradiância ou temperatura, características típicas de ambientes reais.

A figura 24 adiante, exibe o código-fonte utilizado para implementar o algoritmo de rastreamento do MPPT baseado no método de Perturbação e Observação. Esse código foi desenvolvido em linguagem MATLAB e integrado ao Simulink por meio de um bloco de função. Ele é responsável por calcular, a cada ciclo de amostragem, o valor atualizado da tensão de referência a ser seguida pelo conversor *boost*.

Figura 24 - Código MATLAB implementando o algoritmo de rastreamento MPPT.

```
function Vref = MPPT(V, I)

Vrefmax = 450;
Vrefmin = 0;
Vrefinit = 400;
deltaVref = 1;
persistent Volt PoIt Vreffolt;

dataType = 'double';

if isempty (Volt)
    Volt = 0;
    PoIt = 0;
    Vreffolt = Vrefinit;
end
P = V*I
dV = V-Volt;
dP = P-PoIt;

if dP ~= 0
    if dP<0
        if dV<0
        Vref = Vreffolt + deltaVref;
        else
            Vref = Vreffolt-deltaVref;
        end
    else
        if dV<0
            Vref = Vreffolt - deltaVref;
        else
            Vref = Vreffolt + deltaVref;
        end
    end
else Vref = Vreffolt;
end

if Vref >= Vrefmax || Vref <= Vrefmin
    Vref = Vreffolt;
end

Vreffolt = Vref;
Volt = V;
PoIt = P;
```

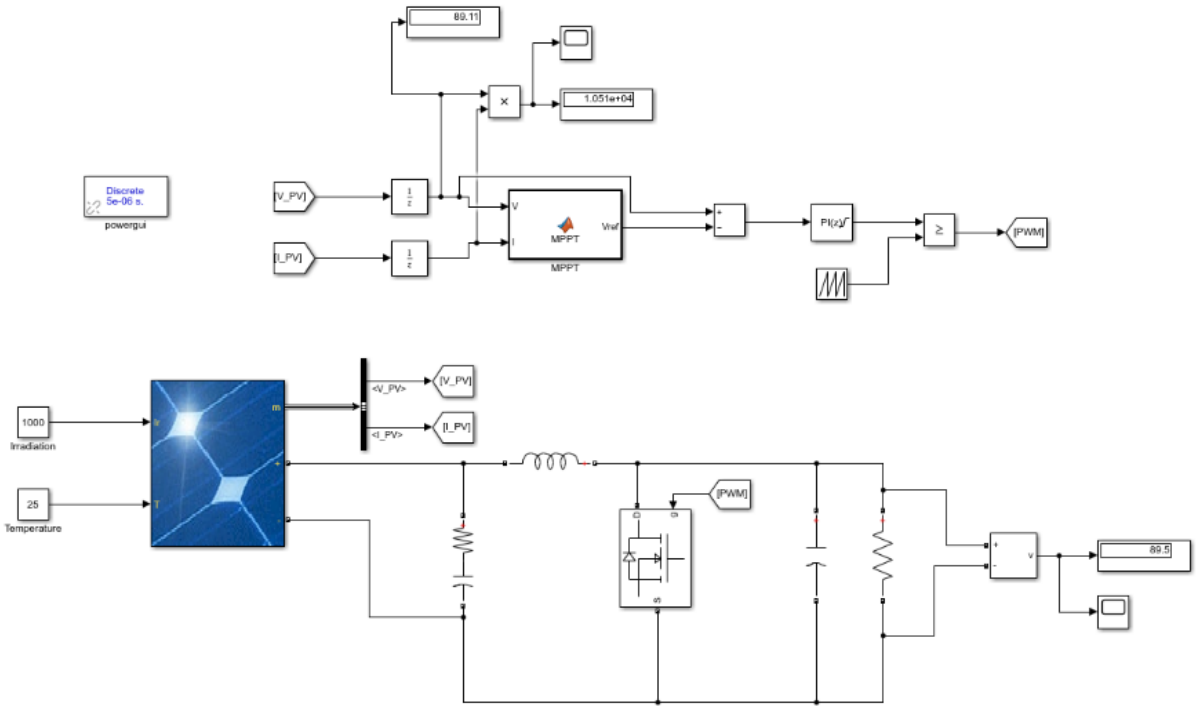
Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

No início do código, o valor de potência elétrica (P) é obtido pela multiplicação da tensão (V) e da corrente (I) geradas pelo arranjo fotovoltaico. Em seguida, o algoritmo compara esse valor com a potência anterior (P_ant) e analisa a diferença de tensão entre os ciclos (V - V_ant). Com base nesses dois critérios, o código decide se deve aumentar ou diminuir Vref em pequenos incrementos de 0,5 V, buscando se aproximar do ponto de máxima potência.

Para garantir a operação segura do sistema, o valor de Vref é limitado entre 0 V e 450 V. Ao final da execução, os valores atuais de P e V são armazenados como variáveis internas, sendo utilizados como base para o próximo ciclo de decisão. Essa estrutura permite ao controle se adaptar continuamente às variações ambientais, como irradiância ou temperatura, sem necessidade de sensores adicionais.

Por fim, a figura 25 abaixo, apresenta o sistema fotovoltaico completo, com todos os blocos interligados no ambiente Simulink. É possível observar a integração entre o bloco de geração *PV Array*, o conversor *boost*, o sistema de controle MPPT e a carga resistiva, formando um circuito fechado que simula as condições reais de operação de um sistema solar isolado. Os sinais de tensão e corrente são constantemente monitorados e utilizados pelo algoritmo de controle, garantindo que o ponto de máxima potência seja continuamente rastreado.

Figura 25 - Sistema completo modelado no Simulink, integrando geração, conversão e controle.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O valor de tensão de saída fica em torno de 90 V, com uma baixa variação a cada segundo. A indicação no display conectado ao barramento final, confirma que o sistema responde corretamente às condições padrão de irradiância e temperatura impostas no modelo. Isso demonstra que tanto o conversor quanto o controlador PI estão ajustando adequadamente o ciclo de trabalho da chave eletrônica, conforme definido pelo algoritmo MPPT.

A integração entre os elementos de geração, conversão e controle evidencia a

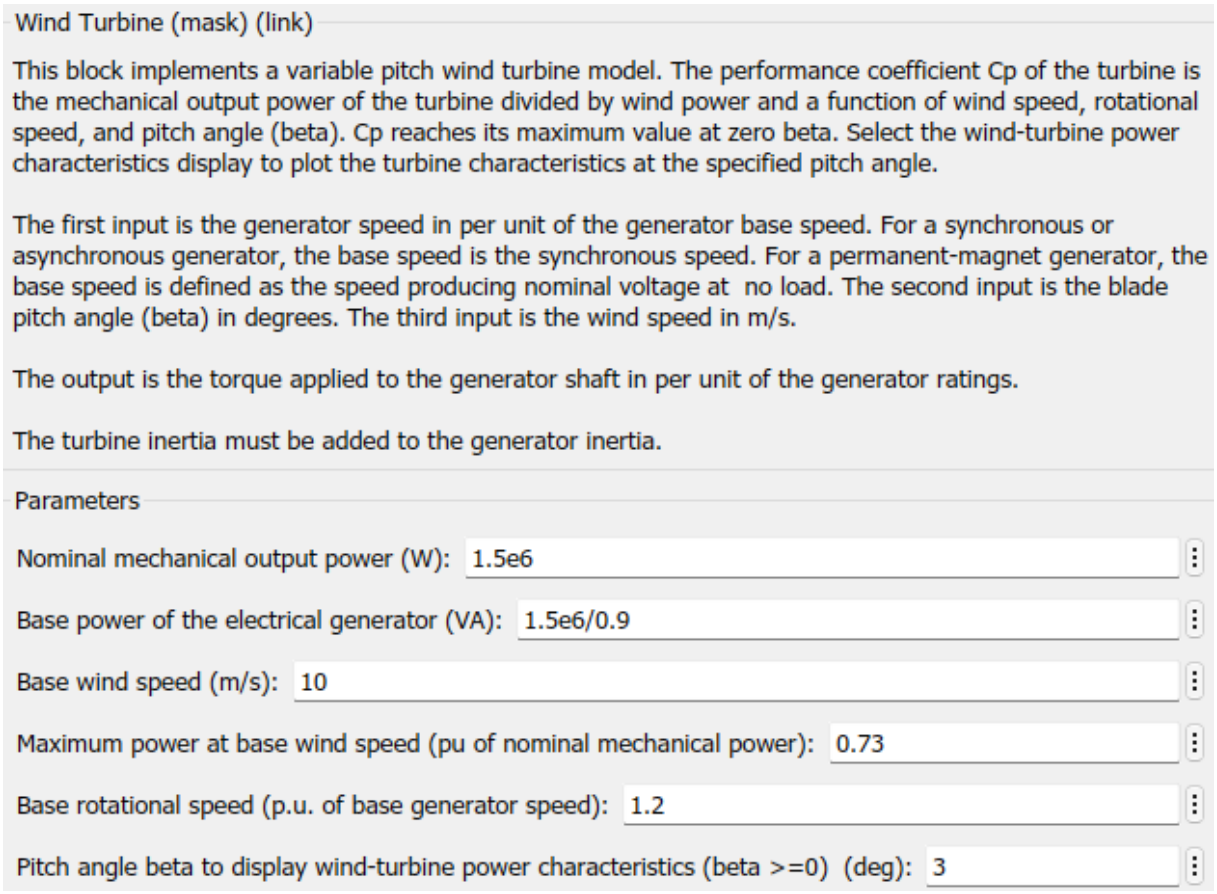
capacidade do modelo simulado de representar com fidelidade o comportamento dinâmico de um sistema solar real. O uso do método P&O se mostrou eficiente para rastrear o ponto de máxima potência em tempo real, com baixo custo computacional e rápida resposta. Essa modelagem fornece uma base sólida para futuras análises, como variações climáticas, dimensionamento de bancos de baterias e integração com outras fontes renováveis, sendo um passo essencial na construção de sistemas híbridos de armazenamento energético.

4.2 MODELAGEM DE UM SISTEMA EÓLICO

Nesta seção, é apresentada a simulação de um sistema eólico isolado, implementado no ambiente Simulink, com o objetivo de analisar o comportamento do conjunto turbina-gerador sob condições nominais de operação.

A figura 26 a seguir, apresenta a configuração do bloco *Wind Turbine*, responsável por modelar o comportamento aerodinâmico da turbina eólica em função da velocidade do vento, velocidade do gerador e ângulo das pás (*pitch*). Este bloco implementa um modelo de passo variável, embora nesta simulação o *pitch* seja mantido constante, com o objetivo de isolar a análise do desempenho eletromecânico sob condições fixas de operação.

Figura 26 - Parâmetros do bloco *Wind Turbine*.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Entre os principais parâmetros definidos, destaca-se a potência mecânica nominal da turbina, configurada como 1,5 MW. Essa potência representa o valor máximo que a turbina pode transferir mecanicamente ao gerador, sob condições ideais. A potência base do gerador foi ajustada em 1,5 MVA dividido por 0,9, refletindo a conversão de potência aparente em potência ativa considerando um fator de potência típico.

A velocidade do vento de base foi definida em 10 m/s, valor que representa o ponto de operação ideal da turbina, geralmente associado ao máximo coeficiente de extração de potência do aerogerador. A rotação base foi ajustada para 1,2 pu, ou seja, 120% da rotação de base do gerador, valor compatível com o ponto de operação mais eficiente segundo as curvas características.

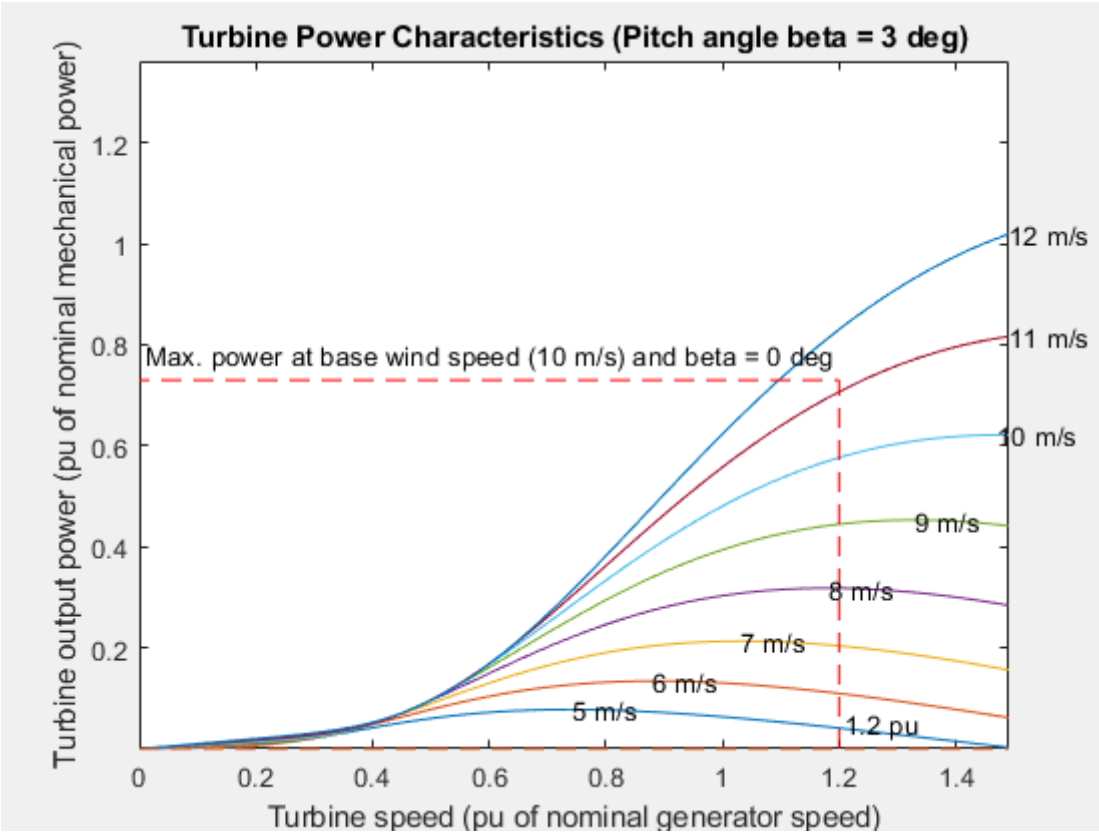
Outro parâmetro relevante é o coeficiente de potência no ponto nominal, ajustado para 0,73 pu, valor que corresponde ao rendimento típico de uma turbina de três pás operando com controle ótimo de *pitch* e velocidade. Por fim, o ângulo de *pitch*

está fixado em 3 graus.

Essa parametrização é coerente e permite simular com fidelidade o comportamento da turbina sob condições estáveis, servindo como base para o gráfico de potência apresentado na figura 27. O ajuste preciso desses parâmetros garante que a energia captada do vento seja transferida ao gerador com alto grau de realismo, possibilitando a análise de eficiência do sistema eólico completo.

A figura 27 adiante, apresenta as curvas características de potência da turbina eólica utilizada na simulação, relacionando a potência extraída com a velocidade de rotação do rotor (em pu), para diferentes valores de velocidade do vento. Essas curvas são fundamentais para compreender o comportamento aerodinâmico da turbina e a eficiência da conversão de energia cinética em energia mecânica sob condições variadas de operação.

Figura 27 - Curvas características de potência da turbina eólica.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Nota-se que, para cada valor de velocidade do vento (variando de 5 m/s a 12 m/s), existe uma curva distinta com um ponto de potência máxima, o qual depende da

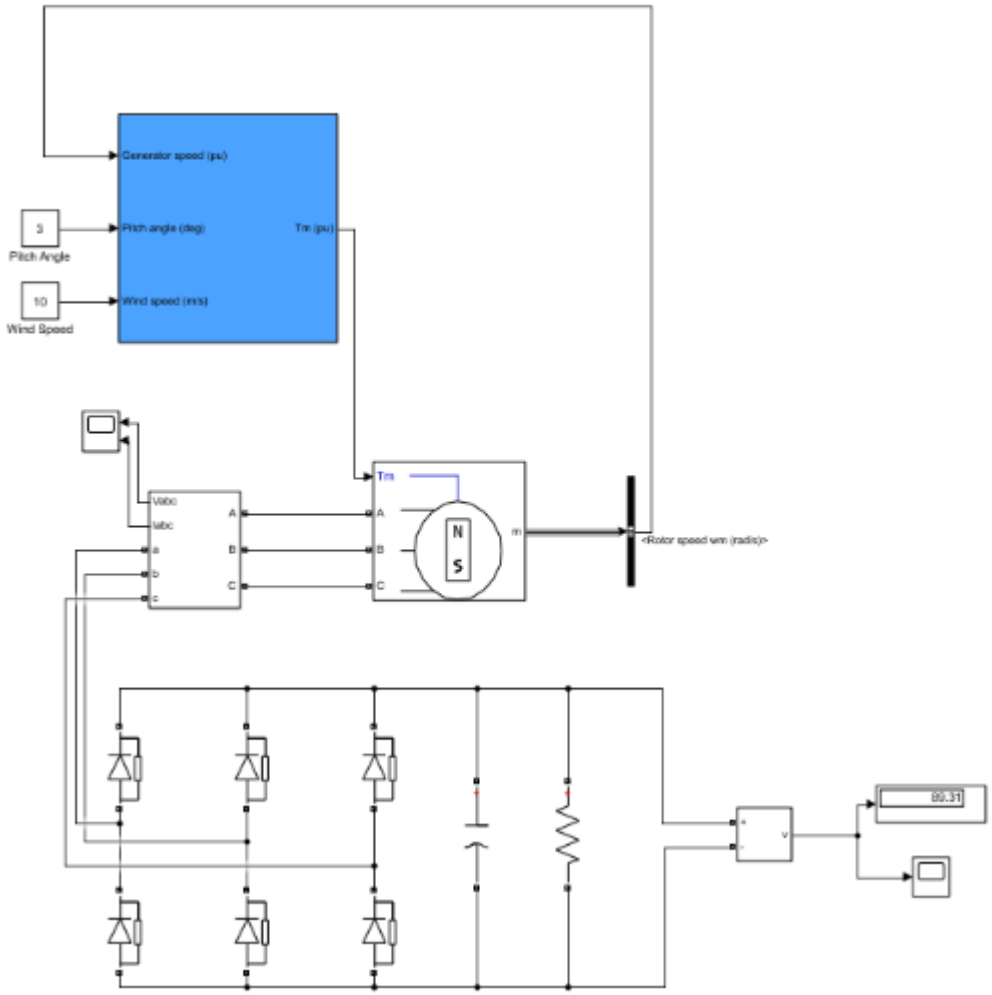
rotação da turbina. Para a condição de 10 m/s, que corresponde à velocidade nominal configurada na simulação, a turbina atinge sua máxima potência com rotação de 1,2 pu, compatível com o valor ajustado nos parâmetros do modelo. No entanto, observa-se que a potência extraída com *pitch* de 3° é ligeiramente inferior à potência ideal que seria obtida com *pitch* zero, conforme indicado pela linha de referência tracejada.

Esse comportamento é esperado, pois o aumento do ângulo de *pitch* reduz a área efetiva de captação do vento pelas pás da turbina, o que impacta diretamente o coeficiente de potência e, consequentemente, a energia mecânica disponível no eixo do gerador. Ainda assim, a forma geral das curvas se mantém consistente: quanto maior a velocidade do vento, maior a potência extraída até o ponto ótimo de rotação, após o qual ocorrem perdas por efeito de arrasto.

Portanto, a curva atual, com *pitch* fixo em 3°, confirma que o modelo está operando em condições realistas e coerentes com turbinas modernas que utilizam controle de passo. O gráfico reforça a importância do ajuste fino desse parâmetro, pois pequenas variações no ângulo das pás podem impactar significativamente a eficiência da conversão de energia em regimes de vento específicos.

O diagrama completo do sistema pode ser observado na figura 28 abaixo, modelado com uma abordagem simplificada, porém funcional, para fins de análise de desempenho energético. À esquerda do esquema, encontram-se os blocos de entrada que definem as condições ambientais e operacionais da turbina: o bloco "*Wind Speed*", fixado em 10 m/s, representa a velocidade do vento incidente, enquanto o bloco "*Pitch Angle*", determina o ângulo das pás da turbina. Esses parâmetros são enviados ao bloco *Wind Turbine* (azul), que simula o comportamento aerodinâmico do rotor e calcula o torque mecânico (Tm) gerado com base nos dados inseridos e na rotação do gerador.

Figura 28 - Sistema eólico com PMSG e retificador trifásico modelado no Simulink.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O torque resultante é aplicado ao gerador síncrono com ímã permanente (PMSG), representado no modelo pelo símbolo com os polos N e S. Esse tipo de gerador foi escolhido devido à sua alta eficiência e boa resposta dinâmica, características que o tornam ideal para aplicações em sistemas eólicos de pequeno e médio porte. A energia mecânica fornecida ao eixo do gerador é convertida em tensão alternada trifásica nas saídas A, B e C.

A energia elétrica gerada passa então por um retificador trifásico de diodos, responsável por converter a tensão alternada para corrente contínua. A configuração de seis diodos em ponte garante retificação completa, adequada para alimentar sistemas de corrente contínua ou acoplamento a barramentos DC. Após a retificação, a corrente é estabilizada por meio de capacitores de filtragem, posicionados em

paralelo com a carga.

A energia convertida e filtrada é dissipada em uma carga resistiva, utilizada aqui como modelo simplificado de consumo. A tensão contínua na saída é monitorada por um bloco de medição, com valor exibido no display, que durante a simulação registra valores de aproximadamente 90 V. Esses valores confirmam a estabilidade do sistema sob as condições impostas, validando o funcionamento correto da turbina, do gerador e do circuito de retificação.

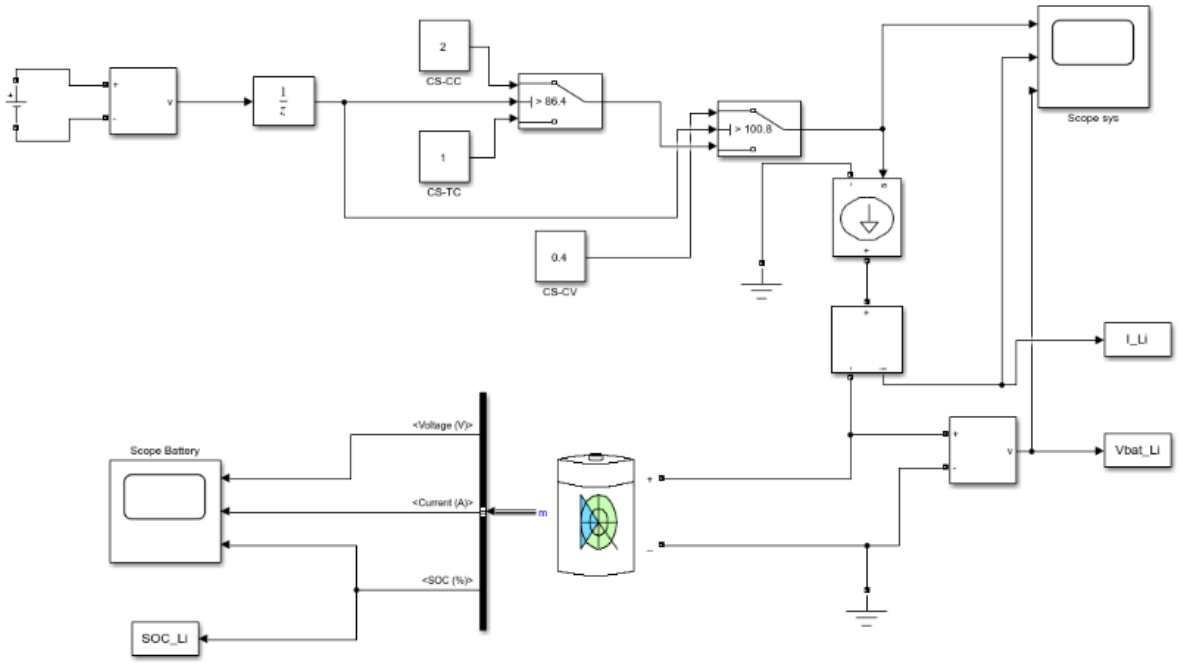
Complementarmente, o modelo conta com um bloco de medição de tensão e corrente, que permite a análise em tempo real das grandezas elétricas trifásicas, útil para estudos de desempenho e eficiência. Embora o sistema não utilize controle ativo de *pitch* ou de velocidade, ele representa com precisão o comportamento eletromecânico de uma turbina eólica operando sob vento constante, sendo uma base sólida para simulações posteriores com integração a baterias ou sistemas híbridos.

4.3 MODELAGEM DAS BATERIAS

4.3.1 Bateria de Íons de Lítio

A modelagem de um sistema de carregamento de uma bateria de íons de lítio desenvolvida no ambiente Simulink, pode ser observada na figura 29 abaixo, com foco na representação fiel das três fases clássicas de carregamento dessa tecnologia: corrente constante, corrente decrescente intermediária (*intermediate current* - TC) e tensão constante.

Figura 29 - Modelagem do sistema de carregamento em três estágios para bateria de íons de lítio no Simulink.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Essa modelagem foi estruturada para garantir o controle preciso do processo de carga, respeitando os limites operacionais de tensão por célula e permitindo a avaliação do comportamento dinâmico da bateria ao longo do tempo. A estrutura inclui blocos lógicos de comparação, seleção de corrente por chaveamento condicional, medição de variáveis elétricas fundamentais e parametrização da bateria conforme valores típicos encontrados em bancos com 24 células em série. Com isso, torna-se possível analisar a eficiência do carregamento e as respostas do sistema em diferentes pontos do ciclo.

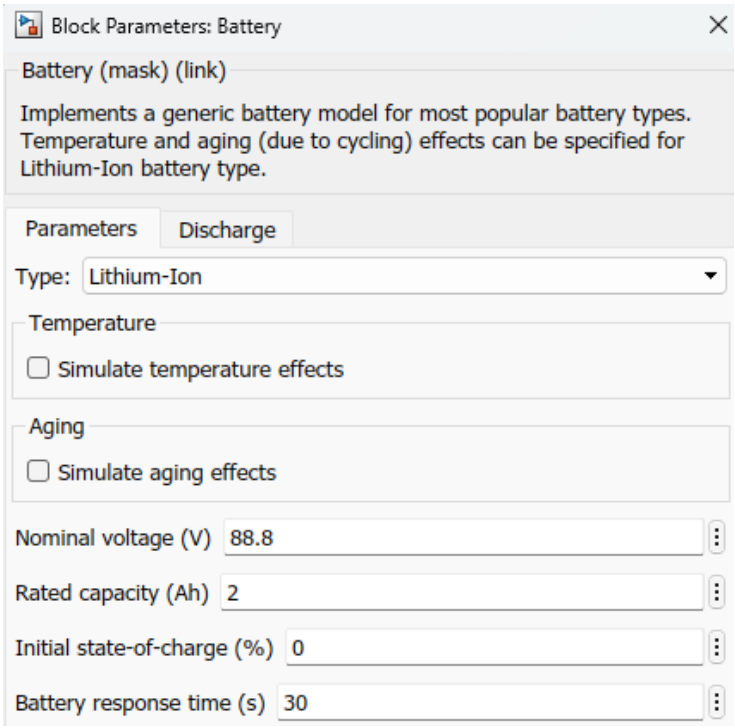
Na entrada do sistema, há uma fonte de tensão conectada a um bloco somador, que calcula a diferença de potencial aplicada à bateria. Essa diferença é processada por um bloco de atraso discreto (1/z), que representa a lógica de atualização em tempo discreto do sistema de controle. O sinal resultante é então distribuído para três blocos distintos que definem os níveis de corrente de carga, de acordo com a etapa em que o carregamento se encontra. O primeiro valor de corrente, controlado pelo bloco CS-TC, aplica 1 A durante a fase inicial do carregamento. Ao atingir 86,4 V, correspondente a 3,6 V por célula, o sistema parte para o segundo estágio de carga, ativando o bloco CS-CC, que fornece uma corrente de 2 A. Essa comutação é feita

por um bloco lógico de comparação conectado a um switch. Posteriormente, ao ultrapassar 100,8 V, que representa o limite seguro de carga completa (4,2 V por célula), o segundo switch é acionado e o carregamento entra na fase final, com corrente reduzida para 0,4 A, controlada pelo bloco CS-CV. Esse modelo em três estágios reproduz de forma precisa o comportamento de carregadores reais para baterias de íons de lítio, protegendo as células e garantindo estabilidade eletroquímica durante o ciclo.

A corrente selecionada conforme a lógica de carregamento é enviada a um bloco de fonte de corrente controlada, que injeta essa corrente no circuito de carga da bateria. A partir da corrente aplicada, o modelo simula a evolução da tensão da bateria e do estado de carga, cujos valores são extraídos e enviados a três canais de monitoramento. O bloco *Scope Battery* registra, em tempo real, a variação de tensão, corrente e SOC. Em paralelo, as saídas Vbat_Li, I_Li e SOC_Li são também conectadas a um display externo e a um escopo adicional para visualização integrada do desempenho da bateria no sistema.

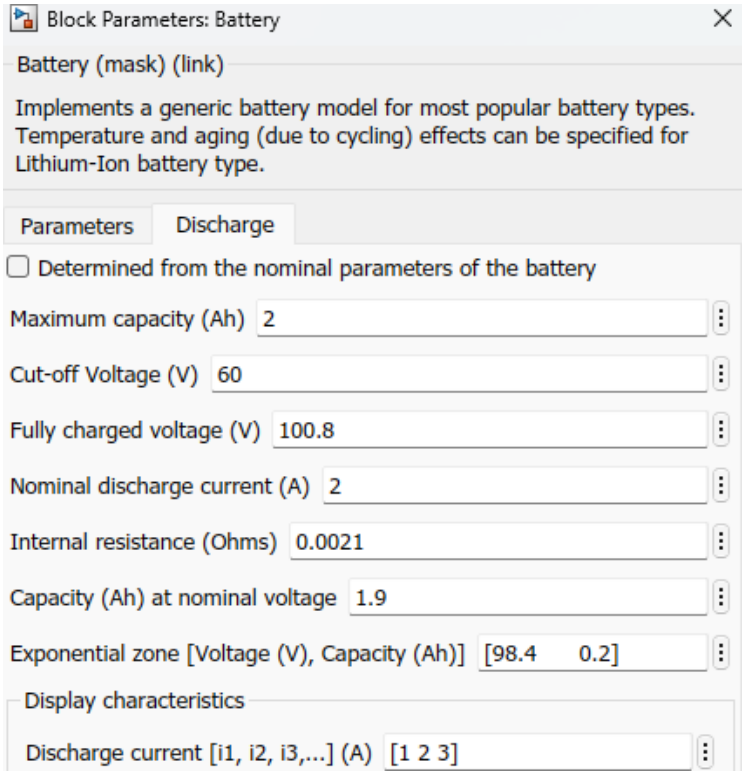
As figuras 30 e 31 a seguir, ilustram de forma complementar, a configuração detalhada do bloco de bateria de íons de lítio utilizado na modelagem do sistema de armazenamento. Esses parâmetros são essenciais para garantir a coerência entre a simulação e o comportamento físico real das baterias, permitindo análises precisas de desempenho, eficiência de carregamento e resposta dinâmica frente às condições impostas pelo sistema.

Figura 30 - Definição dos parâmetros gerais da bateria de íons de lítio no bloco *Battery*.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Figura 31 - Configuração dos parâmetros de descarga e limites operacionais da bateria de íons de lítio.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Na figura 30, observa-se a aba “*Parameters*”, onde são definidos os parâmetros gerais do modelo. A tensão nominal da bateria foi configurada como 88,8 V, valor que corresponde a 24 células de íons de lítio em série, cada uma com tensão nominal de 3,7 V. Essa configuração assegura compatibilidade com os demais componentes do sistema, especialmente com o carregador dimensionado para operar na faixa de até 100,8 V. A capacidade nominal foi definida como 2 Ah, valor típico para bancos de baterias utilizados em sistemas de pequeno porte, o que também facilita comparações com outras tecnologias simuladas sob as mesmas condições. O estado de carga inicial foi ajustado para 0%, permitindo simular o ciclo completo de carregamento desde a condição mínima até a carga total. Já o tempo de resposta da bateria foi configurado como 30 segundos, o que representa a constante de tempo eletroquímica associada à dinâmica interna da célula e assegura uma resposta suavizada e realista às variações de corrente durante a simulação.

Complementando esses ajustes, a figura 31 apresenta a aba “*Discharge*”, responsável pela caracterização do comportamento da bateria em condições de descarga e carregamento. O parâmetro *cut-off voltage* foi definido como 60 V, valor correspondente ao limite inferior de operação segura, equivalente a 2,5 V por célula, abaixo do qual a descarga deve ser interrompida para evitar danos permanentes. A tensão máxima de carregamento (*fully charged voltage*) foi ajustada para 100,8 V, ou 4,2 V por célula, que representa o limite superior seguro e eficiente para baterias de íons de lítio. A resistência interna foi configurada como 0,0021 ohm, valor coerente com a baixa impedância típica dessa tecnologia, especialmente em aplicações de alta eficiência.

Outros parâmetros, como a capacidade disponível na tensão nominal (1,9 Ah) e a zona exponencial de queda de tensão ([98,4 V, 0,2 Ah]), foram definidos para simular a leve redução na capacidade utilizável à medida que a tensão se aproxima do limite superior, comportamento comum em ciclos de carga reais. Por fim, as curvas de corrente de referência foram definidas com os valores de 1 A, 2 A e 3 A, compatíveis com os estágios CS-CV, CS-TC e CS-CC do carregamento simulado no modelo principal.

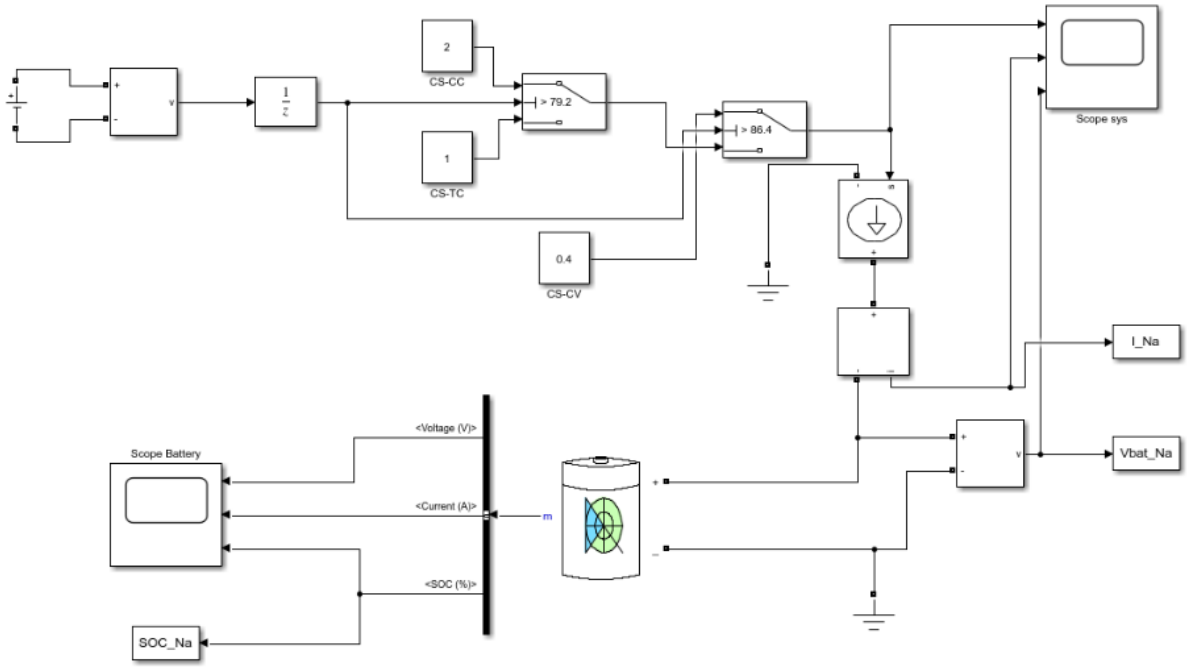
A configuração combinada dessas duas abas permite que o bloco de bateria opere com alto grau de precisão durante o processo de carregamento, refletindo tanto os limites elétricos seguros quanto a resposta eletroquímica do sistema. Essa parametrização garante que os dados extraídos da simulação possam ser utilizados

com confiança em análises comparativas com outras tecnologias de armazenamento e em estudos de dimensionamento de sistemas híbridos.

4.3.2 Baterias de Íons de Sódio

A figura 32 abaixo, representa a modelagem computacional do sistema de carregamento da bateria de íons de sódio, construída no Simulink a partir da mesma lógica de controle desenvolvida para a tecnologia de lítio. Apesar da semelhança estrutural, os valores de tensão de operação, resistência interna e limites de segurança foram ajustados para refletir as propriedades eletroquímicas específicas das células de sódio. O objetivo principal dessa simulação é observar o comportamento da bateria de sódio ao longo do carregamento completo, sob as mesmas condições operacionais aplicadas aos demais sistemas simulados, viabilizando análises comparativas entre as tecnologias.

Figura 32 - Modelagem do sistema de carregamento em três estágios para bateria de íons de sódio no Simulink.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O processo de carregamento é controlado por dois blocos de comparação lógica que atuam sobre valores de tensão distintos dos adotados para o lítio. O primeiro ponto de comutação ocorre em 79,2 V (aproximadamente 3,3 V por célula),

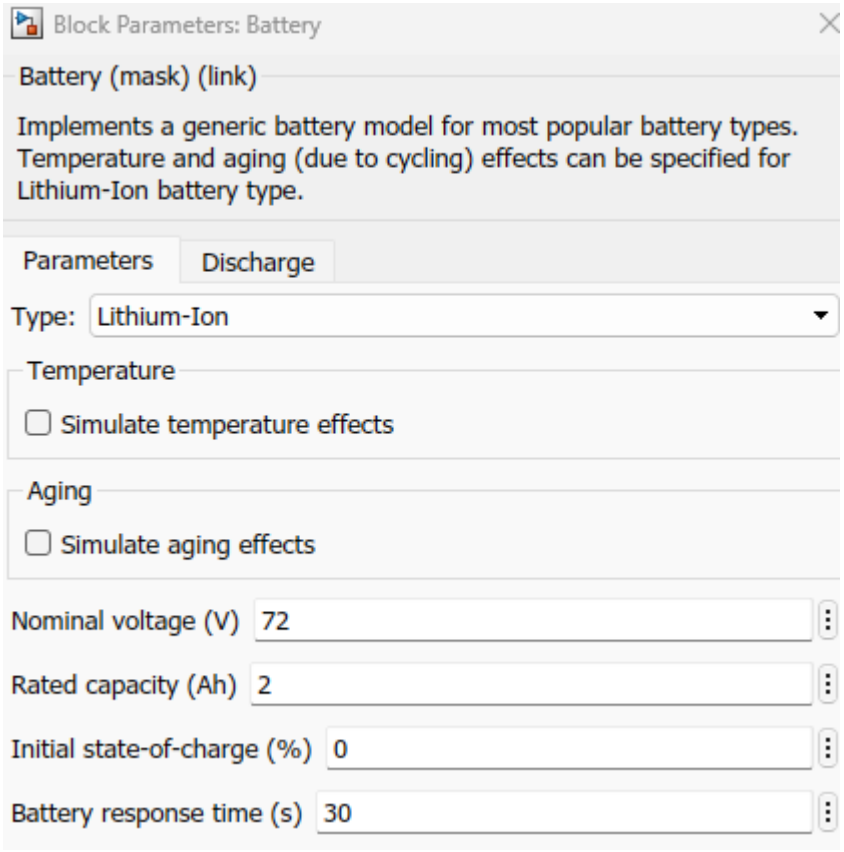
sinalizando a transição para a fase intermediária. A segunda transição ocorre ao se atingir 86,4 V (3,6 V por célula), limite superior da tensão operacional do sistema, que indica o início da fase de estabilização. Esses valores foram definidos com base nos parâmetros característicos das baterias de sódio para garantir o carregamento completo sem ultrapassar os limites eletroquímicos seguros.

Durante o carregamento, a corrente é fornecida por uma fonte controlada conectada à entrada positiva da bateria. O comportamento elétrico resultante, incluindo a evolução da tensão, corrente e estado de carga, é monitorado por blocos de medição dedicados e registrado em escopos gráficos para posterior análise. As saídas Vbat_Na e I_Na armazenam os dados principais da simulação, que serão utilizados para gerar os gráficos comparativos entre as tecnologias simuladas.

Esse modelo ajustado permite avaliar de maneira fiel o desempenho das baterias de sódio frente a diferentes estratégias de carregamento. Além disso, ele preserva a estrutura de controle modular, o que facilita sua integração futura em sistemas híbridos.

A figura 33 a seguir, exibe a aba “*Parameters*” do bloco de bateria utilizado na simulação da tecnologia de íons de sódio. Embora o campo de seleção do tipo de bateria indique *Lithium-Ion*, é importante destacar que esta escolha não implica a simulação direta das propriedades eletroquímicas do lítio. No Simulink, o modelo de bateria utilizado é genérico, e a seleção do tipo serve apenas como ponto de partida para o preenchimento manual dos parâmetros elétricos. Dessa forma, todas as propriedades essenciais da tecnologia de sódio foram definidas de forma personalizada, com base em dados técnicos dessas baterias. Essa abordagem é válida e comum em estudos comparativos, desde que os parâmetros inseridos reflitam fielmente o comportamento específico da bateria em análise, como foi adotado neste trabalho.

Figura 33 - Definição dos parâmetros gerais da bateria de íons de sódio no bloco Battery.



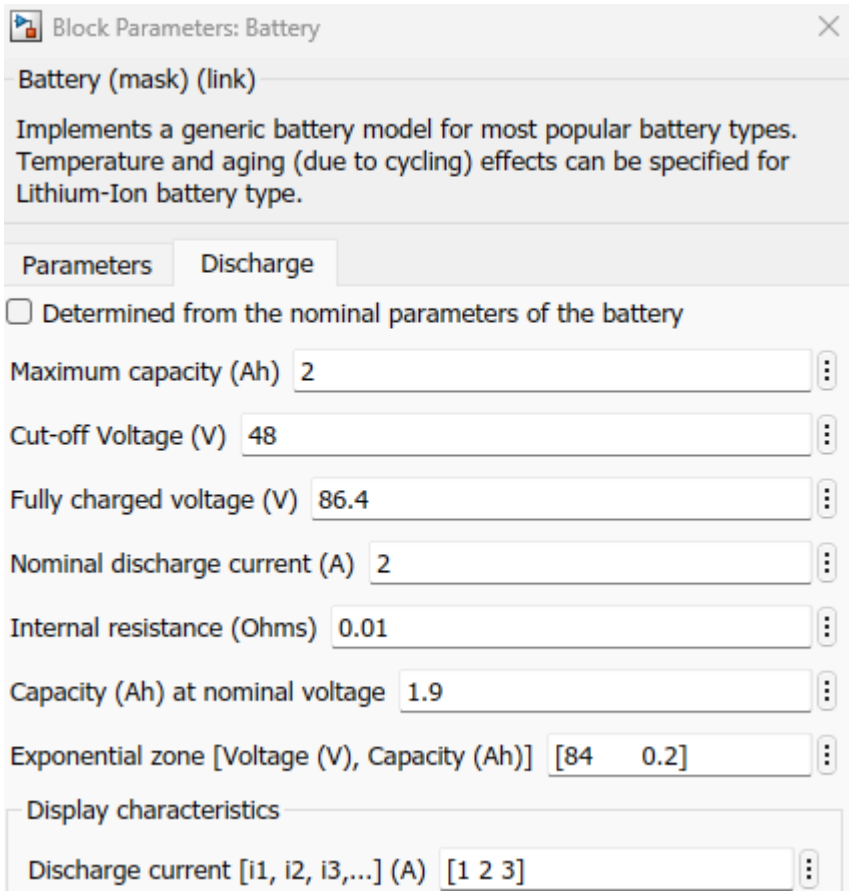
Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

A bateria foi configurada com uma tensão nominal de 72 V, equivalente a 24 células conectadas em série, cada uma com tensão média de 3,0 V, valor típico para baterias de íons de sódio do tipo Na-ion. Essa tensão está de acordo com os limites definidos na modelagem de carregamento e respeita os parâmetros de operação segura da tecnologia. A capacidade nominal foi ajustada para 2 Ah, padronizando as simulações com os demais modelos de bateria analisados, de modo a garantir que as variações observadas nos resultados sejam atribuídas exclusivamente às características da tecnologia e não à dimensão energética do banco. O estado de carga inicial foi fixado em 0%, simulando o processo completo de carregamento, e o tempo de resposta foi ajustado para 30 segundos, representando a inércia eletroquímica da bateria e proporcionando uma resposta dinâmica suavizada e mais realista.

A figura 34 abaixo, apresenta a aba “*Discharge*” do bloco de parametrização da bateria de íons de sódio, complementando a configuração geral realizada na aba

“*Parameters*” (figura 33).

Figura 34 - Configuração dos parâmetros de descarga e limites operacionais da bateria de íons de sódio.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

A tensão de corte foi ajustada para 48 V, correspondendo a aproximadamente 2,0 V por célula, limite inferior de operação segura das células de sódio. A tensão de carga plena foi configurada em 86,4 V, equivalente a 3,6 V por célula, valor amplamente adotado como limite superior seguro para esse tipo de tecnologia. Já a resistência interna foi estimada em 0,01 ohm, compatível com os níveis de impedância observados em baterias de sódio com estrutura comercial consolidada, cuja resistência é, em geral, superior à das células de lítio, refletindo maior dissipação térmica e ligeira queda de desempenho em regimes de alta corrente.

A capacidade nominal foi mantida em 2 Ah, com um valor efetivo de 1,9 Ah a 72 V, representando a pequena perda de capacidade utilizável devido às condições operacionais reais. A zona exponencial de queda de tensão, definida entre 84 V e 0,2 Ah, simula o comportamento característico das baterias de sódio quando operam

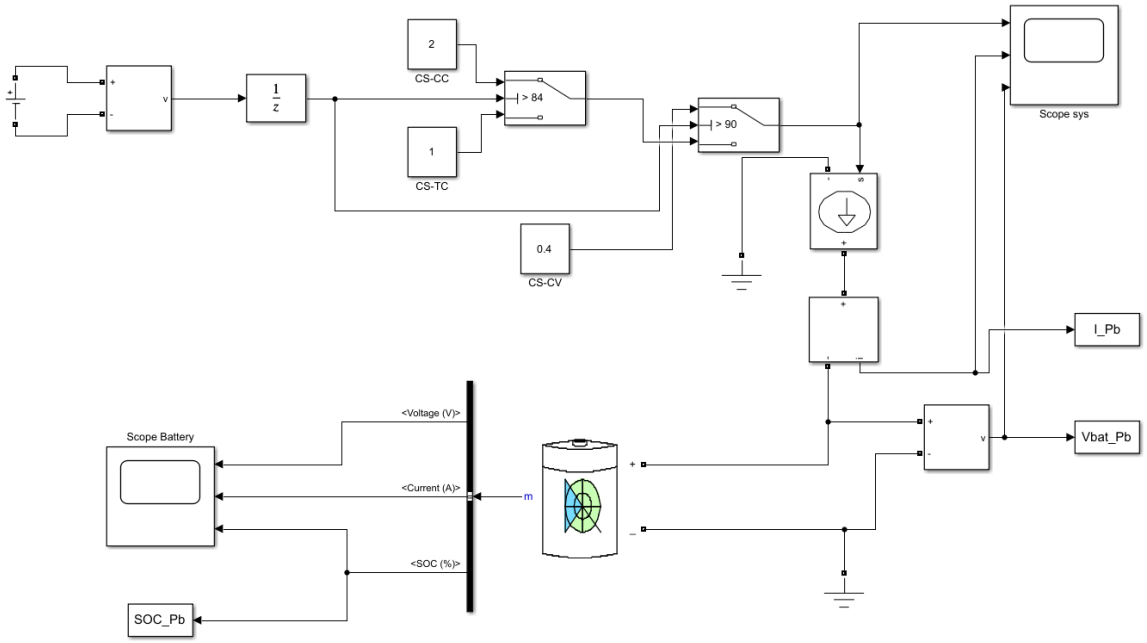
próximo da tensão máxima, fase em que a tensão permanece relativamente estável antes de iniciar a curva de decréscimo mais acentuada.

Essa configuração permite ao modelo reproduzir com precisão as respostas da bateria de íons de sódio sob diferentes condições de carga e descarga, respeitando os limites físico-químicos da tecnologia e assegurando sua coerência com os dados de literatura e de fabricantes. Com isso, é possível avaliar sua estabilidade, eficiência e tempo de carregamento de forma comparável às demais tecnologias simuladas nesta pesquisa.

4.3.3 Baterias de Chumbo-Ácido

A figura 35 adiante, apresenta a modelagem computacional desenvolvida para simular o carregamento de uma bateria do tipo chumbo-ácido. A estrutura do circuito foi mantida semelhante à das tecnologias de lítio e sódio, assegurando uniformidade metodológica e comparabilidade direta entre os modelos. No entanto, os valores de tensão, tempo de resposta e parâmetros de transição entre as etapas de carregamento foram adaptados para refletir as particularidades eletroquímicas e dinâmicas dessa tecnologia, conhecida por apresentar maior resistência interna, menor eficiência energética e maior sensibilidade ao perfil de carga e descarga.

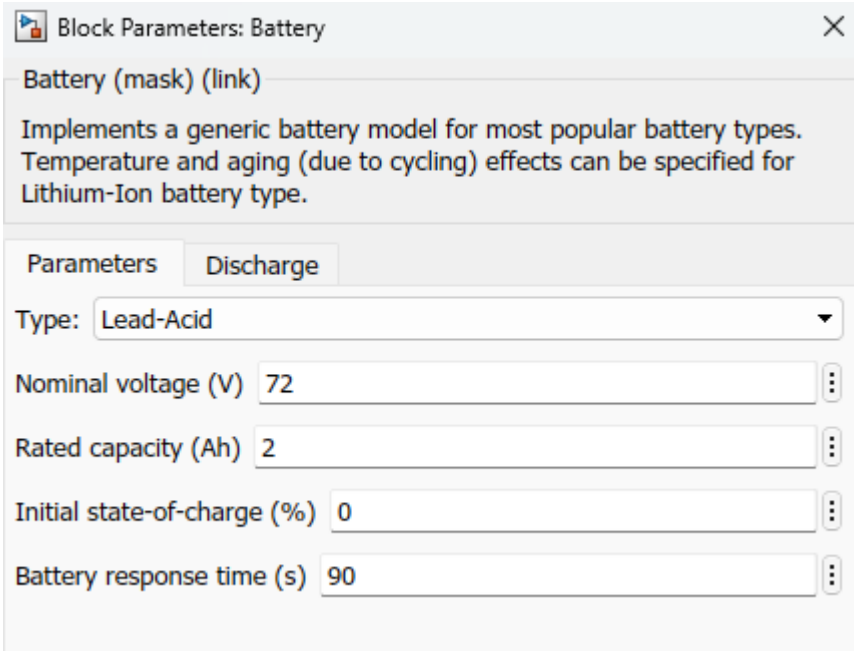
Figura 35 - Modelagem do sistema de carregamento em três estágios para bateria de chumbo-ácido no Simulink.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

A figura 36 abaixo, exibe a aba “*Parameters*” do bloco de bateria configurada para simular o comportamento de baterias de chumbo-ácido. Diferentemente das seções anteriores, nesta modelagem foi possível utilizar diretamente a opção “*Lead-Acid*” no campo de seleção do tipo de bateria, já que o Simulink oferece suporte nativo para essa tecnologia. Essa escolha elimina a necessidade de parametrização a partir de um modelo genérico, como foi o caso da bateria de sódio, permitindo uma representação mais direta e adequada das suas características eletroquímicas específicas.

Figura 36 - Definição dos parâmetros gerais da bateria chumbo-ácido no bloco *Battery.*



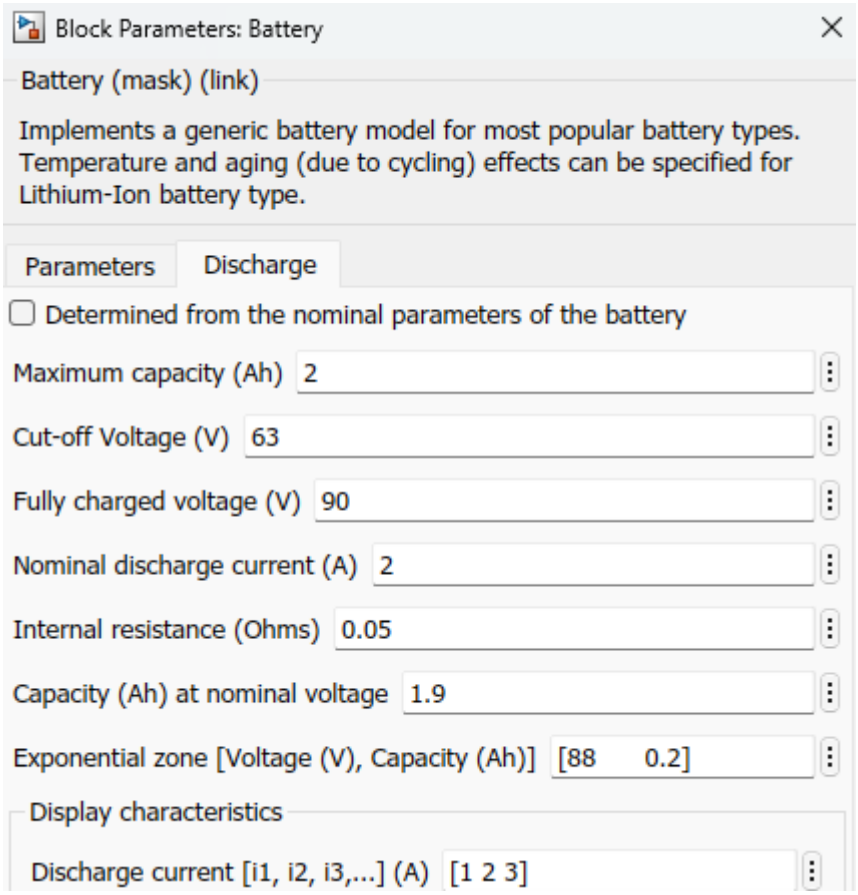
Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O valor da tensão nominal foi definido em 72 V, o que indica um arranjo de 24 células em série, cada uma com tensão média de 3,0 V, valor compatível com aplicações estacionárias e largamente utilizado em bancos de baterias para sistemas fotovoltaicos e de energia de backup. A capacidade nominal foi mantida em 2 Ah, uniformizando a base de comparação com os demais modelos da pesquisa. O estado de carga inicial foi fixado em 0%, simulando um processo completo de recarga desde o esgotamento total. Já o tempo de resposta foi ajustado para 90 segundos, representando o tempo necessário para que o modelo atinja um novo estado de equilíbrio após variações na corrente ou tensão aplicadas. Esse valor é sensivelmente maior do que o utilizado para as baterias de lítio e sódio, refletindo o comportamento mais lento e a maior inércia eletroquímica das baterias de chumbo-ácido.

A escolha desses parâmetros busca preservar a coerência metodológica com as demais tecnologias simuladas, ao mesmo tempo em que respeita as particularidades operacionais do chumbo-ácido, que possui um tempo de resposta mais elevado, menor eficiência de conversão e maior suscetibilidade a ciclos de descarga profunda. Essa configuração é fundamental para garantir que os resultados obtidos no processo de simulação sejam realistas e adequadamente representem o desempenho da tecnologia em contextos reais de aplicação.

A figura 37 a seguir, apresenta a aba *“Discharge*” do bloco de parametrização da bateria de chumbo-ácido, onde são definidas as características operacionais durante os ciclos de descarga, incluindo os limites de tensão, resistência interna e a zona exponencial de descarga. Esses parâmetros foram configurados com base em dados típicos de baterias estacionárias de chumbo-ácido utilizadas em sistemas de armazenamento de energia, assegurando representatividade técnica e compatibilidade com os cenários simulados.

Figura 37 - Configuração dos parâmetros de descarga e limites operacionais da bateria chumbo-ácido.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

A tensão mínima de operação foi ajustada para 63 V, o que corresponde a cerca de 2,63 V por célula, valor compatível com a faixa segura para evitar sulfatação severa e prolongar a vida útil da bateria. Por sua vez, a tensão máxima foi fixada em 90 V, ou 3,75 V por célula, patamar superior aceitável para processos de carga completa em sistemas estacionários, respeitando os limites estabelecidos por fabricantes e normas técnicas. A resistência interna foi estimada em 0,05 ohm, valor significativamente mais

elevado do que nas baterias de lítio e sódio, o que reflete uma das principais limitações dessa tecnologia: maior perda energética e maior aquecimento durante o carregamento e a descarga.

A capacidade nominal foi mantida em 2 Ah, com valor efetivo de 1,9 Ah a 72 V, evidenciando uma perda associada à eficiência do sistema. A zona exponencial de descarga, configurada entre 88 V e 0,2 Ah, representa o trecho da curva em que a tensão da bateria se estabiliza antes de sofrer uma queda acentuada ao final do ciclo, comportamento típico das baterias de chumbo-ácido.

Essa parametrização, aliada à modelagem implementada, permite reproduzir com fidelidade as limitações e o comportamento característico das baterias de chumbo-ácido, sobretudo no que diz respeito à estabilidade da tensão, tempo de resposta e impacto da profundidade de descarga no desempenho geral do sistema.

4.4 MODELAGEM DOS SISTEMAS HÍBRIDOS

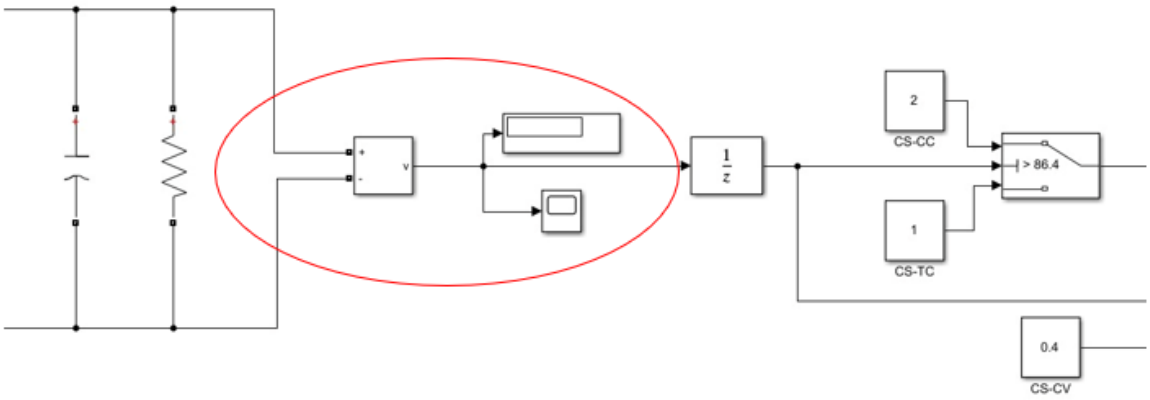
A modelagem dos sistemas híbridos, marca o final do processo, no qual todos os componentes previamente simulados de forma individual, incluindo os sistemas de geração solar e eólica, assim como os diferentes tipos de baterias, serão integrados em arranjos híbridos. Essa etapa tem como objetivo avaliar o desempenho dos sistemas completos de armazenamento e geração em condições de operação realistas, observando a interação dinâmica entre as fontes de energia renovável e os dispositivos de armazenamento. A modelagem conjunta permite investigar não apenas a eficiência energética, mas também a compatibilidade entre as tecnologias e os impactos sobre parâmetros como tempo de carregamento, estabilidade de tensão e variação de corrente.

Cada uma das combinações híbridas descritas nos subtópicos a seguir representa um cenário possível de aplicação, simulando o acoplamento de uma fonte renovável (solar ou eólica) com um dos três tipos de baterias estudadas: íons de lítio, íons de sódio e chumbo-ácido. Ao utilizar os mesmos valores de carga, estratégias de controle e blocos de medição estabelecidos nas seções anteriores, esta etapa garante uniformidade metodológica e permite comparações diretas entre os sistemas. A abordagem adotada contribui para identificar as soluções mais eficazes em termos de desempenho e estabilidade, fornecendo subsídios técnicos para a escolha da configuração ideal em contextos energéticos reais.

A configuração do sistema solar e da bateria de íons de lítio, previamente analisadas de forma isolada, agora são integradas para compor um sistema híbrido capaz de otimizar o aproveitamento da energia solar. Essa integração visa permitir o armazenamento eficiente da energia excedente produzida durante os períodos de maior radiação solar, garantindo sua disponibilização para os momentos em que a demanda energética seja maior ou a radiação solar esteja reduzida. O modelo consolida tanto o comportamento dinâmico do gerador fotovoltaico quanto as características de carregamento da bateria, oferecendo uma visão realista do funcionamento de um sistema híbrido solar com armazenamento.

A figura 38 abaixo, apresenta o diagrama responsável por integrar o sistema solar com a bateria de íons de lítio.

Figura 38 - Integração do sistema fotovoltaico com a bateria de íons de lítio.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

A área circulada em vermelho destaca o ponto de junção entre o sistema de geração solar e o sistema de armazenamento em baterias de íons de lítio. Esse trecho do circuito atua como a interface de transferência de energia, sendo responsável por monitorar, medir e controlar a entrega da tensão gerada pelo arranjo fotovoltaico para o módulo de carregamento da bateria. A medição e o controle de tensão são essenciais para garantir que a energia solar captada seja transferida de maneira eficiente e segura para as baterias, respeitando as características elétricas do banco de armazenamento e evitando sobrecargas.

Vale ressaltar que essa configuração de junção entre o sistema de geração

solar e o módulo de armazenamento não se limita apenas às baterias de íons de lítio, sendo igualmente aplicável às baterias de sódio e de chumbo-ácido. Essa versatilidade permite que o modelo seja adaptado para diferentes tipos de tecnologias de armazenamento, garantindo a mesma eficiência e controle de tensão na alimentação dos bancos de baterias, independentemente da química específica utilizada.

A figura 39 a seguir, apresenta a programação em MATLAB utilizada para gerar os gráficos de tensão, estado de carga e corrente da bateria ao longo do tempo. Nessa codificação, o *script* organiza as variáveis de saída em três *subplots* distintos: um para a evolução da tensão, outro para o SOC e o terceiro para a corrente elétrica durante a operação. O código demonstra a organização dos dados, bem como a configuração das cores e legendas que facilitam a interpretação dos resultados obtidos na simulação.

Figura 39 - Código MATLAB para geração dos gráficos de tensão, SOC e corrente.

```
figure;

% Tensão
subplot(3,1,1);
plot(Vbat_Li.time, Vbat_Li.Data, 'b-');
ylabel('Voltage (V)');
legend('Li-ion');
grid on;

% SOC
subplot(3,1,2);
plot(SOC_Li.time, SOC_Li.Data, 'b-');
ylabel('SOC (%)');
grid on;

% Corrente
subplot(3,1,3);
plot(I_Li.time, I_Li.Data, 'b-');
xlabel('Time (sec)');
ylabel('Current (A)');
grid on;
```

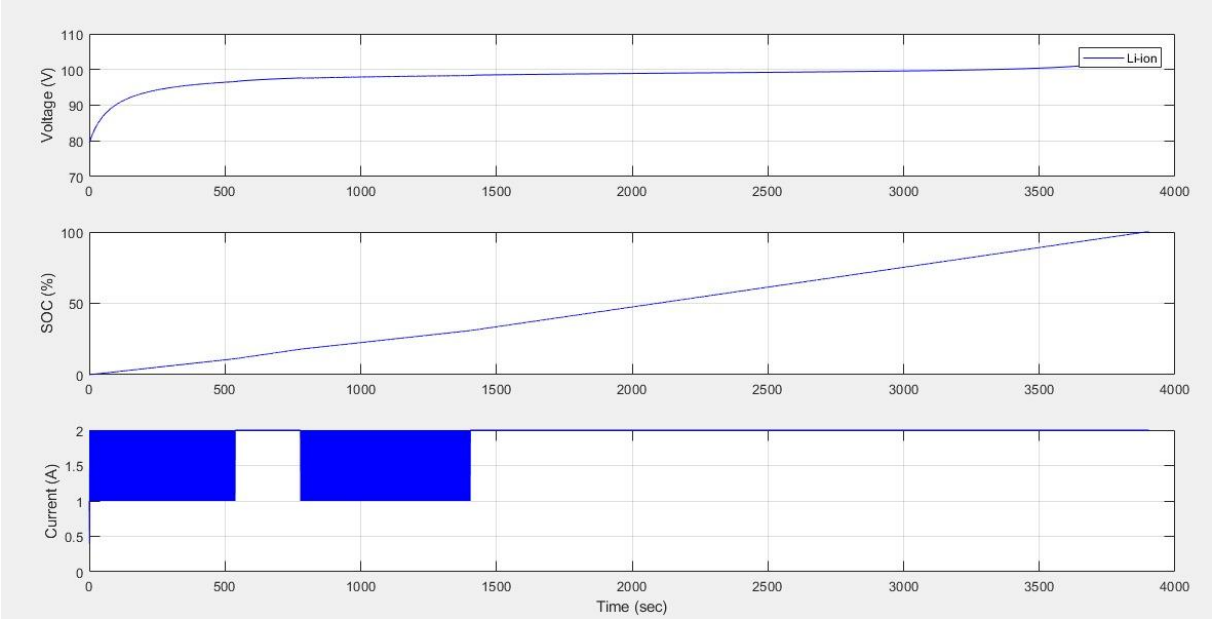
Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

5 ANÁLISE DE RESULTADOS

5.1 SISTEMA SOLAR + BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO

A figura 40 abaixo, apresenta os resultados obtidos a partir da simulação da integração do sistema fotovoltaico com a bateria de íons de lítio, permitindo a avaliação do comportamento dinâmico da tensão, do estado de carga e da corrente elétrica durante o processo de carregamento da bateria. Esses gráficos foram gerados a partir do código apresentado na figura 39.

Figura 40 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Solar + Íon-Lítio).



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O primeiro gráfico apresentado na figura 40, mostra a evolução da tensão de carregamento do sistema, evidenciando um crescimento suave e estável a partir de cerca de 80 V até atingir valores próximos a 105 V ao longo da simulação. Esse comportamento indica que o sistema solar foi capaz de fornecer a tensão necessária para alimentar adequadamente a bateria de íons de lítio, assegurando um carregamento seguro e eficiente. O padrão ascendente do gráfico confirma a capacidade do sistema em regular a tensão de forma consistente, garantindo a estabilidade operacional e prevenindo flutuações que poderiam comprometer a

integridade do processo de carga.

O segundo gráfico, exibe a evolução do estado de carga da bateria, partindo da bateria completamente descarregada e atingindo progressivamente a carga máxima ao longo da simulação. A bateria foi 100% carregada em aproximadamente 3900 segundos, configurando-se um carregamento relativamente rápido. Outro ponto importante, foi a trajetória linear e bem definida, atestando o funcionamento confiável do sistema no fornecimento contínuo de energia, sem apresentar quedas abruptas ou picos indesejados. A coerência dessa curva reforça a ideia de que a transferência energética ocorre de forma controlada, resultando em um carregamento eficiente e estável que preserva a vida útil do banco de armazenamento.

O terceiro gráfico, por sua vez, representa o perfil de corrente de carga durante o processo de carregamento. Nele, observa-se que a corrente se mantém inicialmente entre 1,0 A e 2 A, apresentando pulsos de carregamento que refletem o controle do sistema para manter o carregamento em níveis seguros. Esses pulsos caracterizam o mecanismo de controle dinâmico, que ajusta a potência fornecida para evitar sobrecargas e permitir uma operação suave e consistente. Após aproximadamente 1400 s, a corrente se estabiliza completamente em 2 A, significando que a bateria está sendo carregada em sua potência máxima ideal.

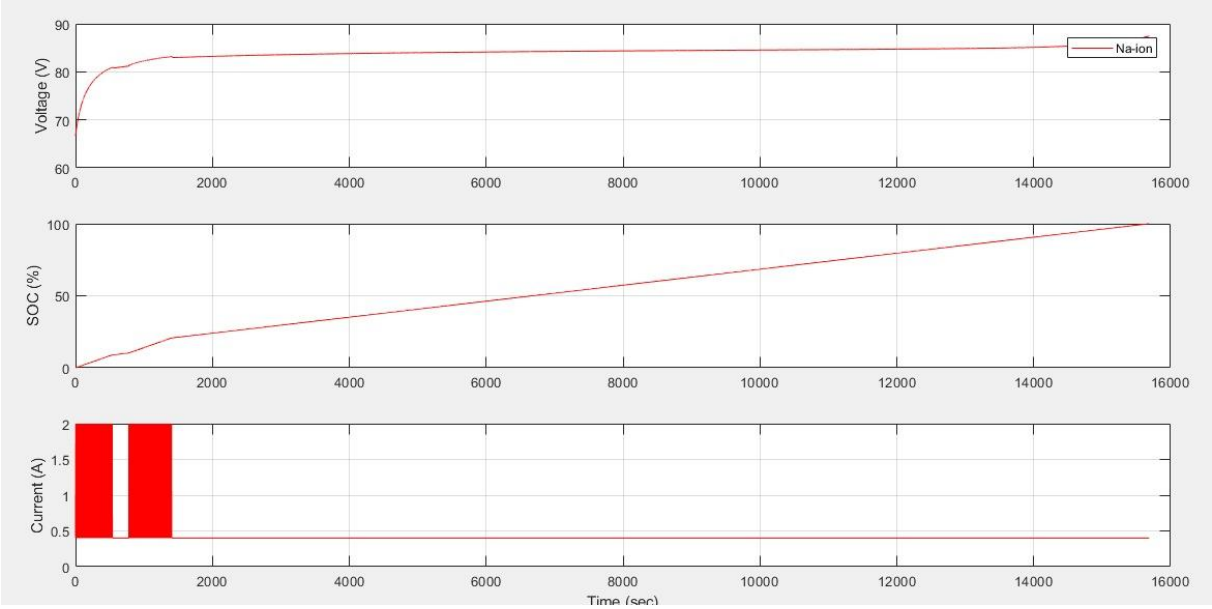
Por fim, ao interpretar esses três gráficos, é possível concluir que o sistema híbrido solar-bateria de íons de lítio apresentou um desempenho eficiente e controlado durante o carregamento. A tensão estabilizou-se em torno de 100 V, o SOC evoluiu de forma linear, e a corrente seguiu um perfil inicialmente pulsante, que refletiu o controle ativo de potência do sistema. Esses resultados evidenciam a viabilidade da configuração simulada, reforçando o potencial do modelo como uma alternativa para aplicações em sistemas híbridos de armazenamento de energia.

5.2 SISTEMA SOLAR + BATERIA DE ÍONS DE SÓDIO

O modelo de integração do sistema solar com a bateria de íons de sódio adota a mesma lógica de conexão apresentada anteriormente para o sistema fotovoltaico acoplado à bateria de íons de lítio, destacada na figura 38. Além disso, a figura 39: Código MATLAB para geração dos gráficos de tensão, SOC e corrente, também se mantém similar, sendo necessária apenas a adaptação ao tipo de bateria para refletir as especificidades do sistema de íons de sódio.

Partindo dessas premissas, vamos analisar diretamente o resultado gráfico da simulação, que reflete o desempenho do sistema híbrido formado pelo sistema fotovoltaico e pela bateria de íons de sódio, que podemos ver na figura 41 abaixo.

Figura 41 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Solar + Íon-Sódio).



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O primeiro gráfico apresentado na figura 41, mostra a evolução da tensão de carregamento do sistema de armazenamento com a bateria de íons de sódio. Nele, observa-se um crescimento inicial bastante acentuado, que parte de aproximadamente 70 V e progride de forma suave até valores próximos de 85 V ao longo do tempo de simulação. Essa evolução gradual, seguida pela estabilidade, demonstra que o sistema fotovoltaico acoplado à bateria foi capaz de fornecer a tensão necessária para o carregamento seguro, evitando flutuações bruscas que poderiam comprometer a integridade do processo.

No segundo gráfico, é possível observar a evolução do estado de carga, que inicia em 0% e progride até 100% ao final da simulação. É notável que, durante o início do carregamento, a trajetória apresenta algumas flutuações e pequenas oscilações, refletindo a não linearidade típica desse estágio inicial. Essas oscilações são resultado de variações no fornecimento de energia pelo sistema solar, que afetam diretamente a velocidade e a estabilidade do processo de carregamento. Após essa fase de

instabilidade inicial, o SOC retoma um padrão de crescimento linear e consistente, indicando a eficiência do sistema em se adaptar e manter o carregamento controlado ao longo do tempo, sem interrupções significativas.

O tempo total de carregamento observado, cerca de 15.800 segundos, é significativamente alto, podendo ser atribuído à menor capacidade de aceitação de carga das baterias de íons de sódio, além das características de seu perfil de carregamento, que é mais gradual. Outro fator que contribui para esse comportamento é o fato de as baterias de sódio apresentarem voltagens nominais mais baixas, assim como um valor de *fully charged voltage* e *cut-off voltage* menores quando comparados à outras baterias. Esses aspectos resultam em um processo de carregamento mais lento, refletindo as limitações físicas e químicas associadas à tecnologia de íons de sódio.

O terceiro gráfico exibe o perfil de corrente durante o carregamento da bateria. Inicialmente, são visíveis pulsos de corrente que atingem valores de 0.5 A até 2 A, indicando o controle dinâmico exercido pelo sistema para regular a potência fornecida. Após o período inicial, observa-se a estabilização da corrente em um patamar de 0.5 A, caracterizando um regime de carregamento controlado e seguro. Essa redução gradual e a posterior estabilização demonstram a capacidade do sistema de ajustar o fornecimento de energia em consonância com as necessidades de carregamento da bateria, assegurando eficiência e segurança operacional.

Por fim, ao analisar esses três gráficos de forma integrada, verifica-se que o sistema híbrido solar e bateria de íons de sódio operou com bom desempenho e estabilidade ao longo do processo de carregamento. A tensão apresentou um crescimento constante, o SOC evoluiu de maneira confiável e a corrente indicou o controle dinâmico do carregamento, validando o funcionamento do modelo proposto.

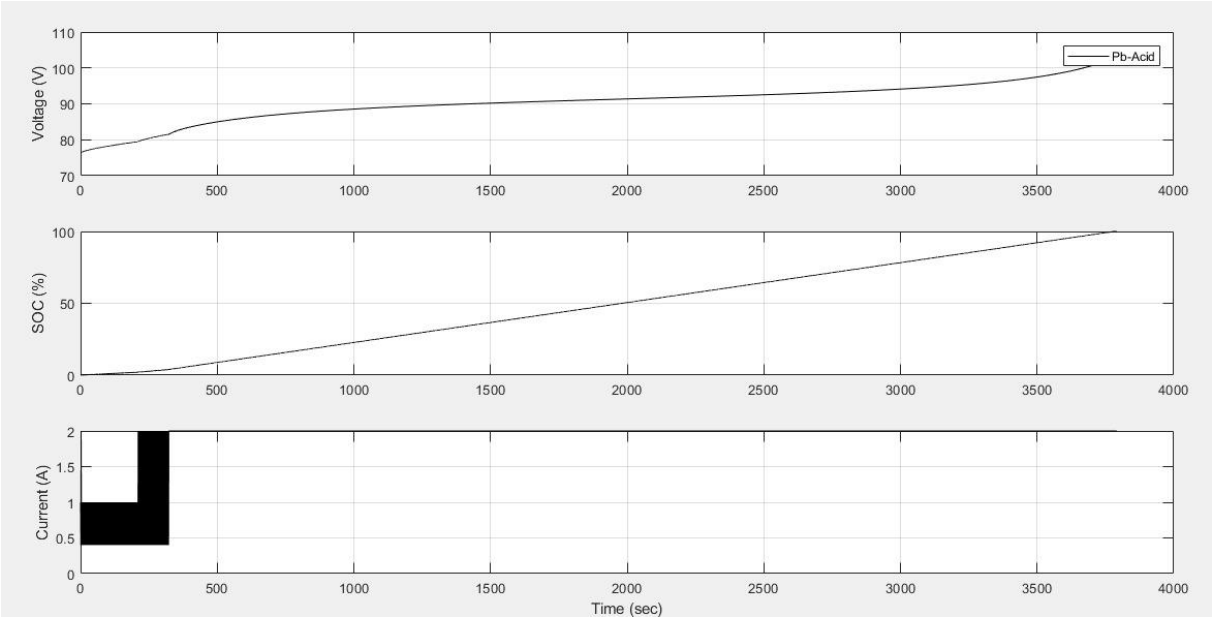
5.3 SISTEMA SOLAR + BATERIA CHUMBO-ÁCIDO

A integração entre o sistema solar e as baterias de chumbo-ácido, assim como a geração e a programação dos gráficos, seguem a mesma estrutura metodológica apresentada para as baterias de íons de lítio, conforme descrito nas figuras 38 e 39 correspondentes. Essa similaridade no modelo de integração demonstra a robustez e a aplicabilidade do método adotado, que permite avaliar diferentes tecnologias de armazenamento com o mesmo nível de confiabilidade. No caso específico das

baterias de chumbo-ácido, a principal diferença está nos parâmetros elétricos e no comportamento dinâmico característico dessas baterias, que influenciam diretamente as respostas obtidas durante a simulação.

A figura 42 a seguir, apresenta os gráficos resultantes da simulação do sistema solar acoplado a uma bateria de chumbo-ácido, fornecendo um panorama abrangente do comportamento elétrico durante o processo de carregamento. Esses gráficos exibem a evolução da tensão, do estado de carga e da corrente ao longo do tempo de simulação, permitindo a avaliação detalhada de como a bateria de chumbo-ácido interage com o sistema fotovoltaico.

Figura 42 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Solar + Chumbo-Ácido).



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Primeiramente, gerou-se o gráfico que ilustra a evolução da tensão de carregamento do sistema. Nele é possível observar um crescimento inicial que, apesar de ser suave e progressivo, apresenta uma leve variação na linearidade logo nos primeiros instantes da simulação. Esse comportamento indica um período de adaptação do sistema, no qual a tensão fornecida pelo sistema fotovoltaico passa por pequenas oscilações até se estabilizar completamente. Após essa fase inicial de ajustes, a curva de tensão mostra um padrão ascendente contínuo, evoluindo de aproximadamente 78 V até valores que se aproximam de 100 V ao longo da

simulação. Essa evolução progressiva e estável demonstra a capacidade do sistema solar em fornecer a tensão necessária para alimentar a bateria de forma confiável e segura, evitando picos ou quedas abruptas que poderiam comprometer o processo de carregamento.

No segundo gráfico, é possível visualizar a evolução do estado de carga da bateria de chumbo-ácido ao longo da simulação. Inicialmente, o SOC apresenta algumas pequenas oscilações que refletem diretamente a variação de tensão observada no primeiro gráfico. Após essa breve fase de flutuações, a curva do SOC se estabiliza e adota um perfil de crescimento linear bem definido, evidenciando a confiabilidade do sistema em garantir o fornecimento de energia contínuo e estável. A trajetória parte de 0% e alcança 100% ao final do carregamento, que ocorre em aproximadamente 3800 segundos. Esse tempo relativamente curto reforça a capacidade do sistema em realizar o carregamento de forma eficiente e controlada, sem interrupções ou variações que poderiam comprometer o desempenho da bateria.

Concluindo, o terceiro gráfico exibe o comportamento da corrente de carregamento ao longo de toda a simulação. Observa-se que, nos primeiros momentos, a corrente apresenta variações significativas, inicialmente oscilando entre 0.5 A e 1 A e, em seguida, ampliando esse intervalo para oscilações entre 0.5 A e 2 A. Essa flutuação inicial é típica de processos de carregamento controlados por sistemas fotovoltaicos, nos quais o fornecimento de energia precisa ser regulado para evitar sobrecargas e assegurar a integridade do banco de armazenamento. Após esse período de adaptação e estabilização, a corrente alcança um valor constante de 2 A por volta dos 300 segundos e permanece nesse patamar até o final do carregamento. Essa estabilização é um indicativo claro de que o sistema alcançou um regime de carregamento controlado e seguro, garantindo que a bateria fosse carregada em sua capacidade máxima de forma estável e eficiente, sem oscilações que pudessem comprometer seu desempenho ou durabilidade.

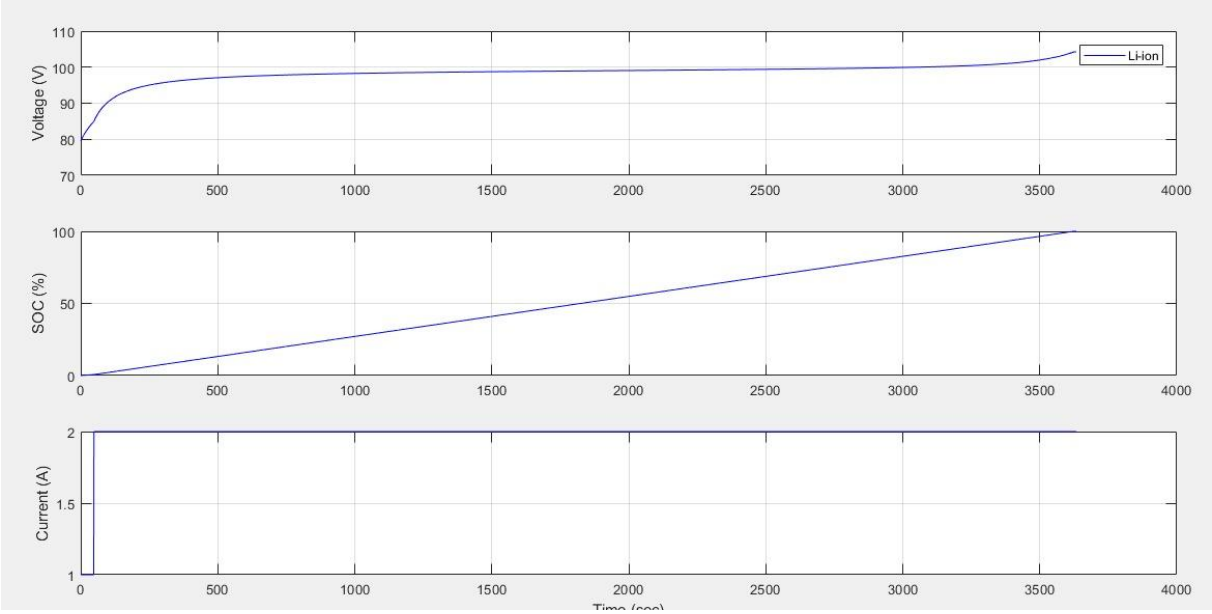
5.4 SISTEMA EÓLICO + BATERIA DE ÍONS DE LÍTIO

A integração entre o sistema eólico e as baterias de íons de lítio segue a mesma lógica metodológica já explicada na figura 38, que detalhou a configuração de carregamento das baterias de íons de lítio com o sistema fotovoltaico. Essa abordagem garante consistência e uniformidade nos parâmetros de controle, com

ajustes específicos para o novo perfil de geração de energia proporcionado pela turbina eólica. Além disso, a figura 38, que apresentou a programação em MATLAB para a geração dos gráficos de tensão, estado de carga e corrente, também se aplica de forma praticamente idêntica neste novo arranjo, necessitando apenas de adaptações para as entradas e saídas do sistema eólico. Esse padrão de integração e análise será seguido igualmente para as próximas configurações de baterias a serem estudadas.

A análise da integração do sistema eólico com baterias de íons de lítio se manifesta de forma clara nos resultados gráficos obtidos na simulação, onde podemos observar a evolução dos parâmetros de tensão, estado de carga e corrente ao longo do tempo. A figura 43 abaixo, sintetiza os resultados e permite avaliar a eficiência e a estabilidade do carregamento da bateria de íons de lítio no contexto eólico, sendo um ponto de partida para discussões comparativas e para o refinamento dos parâmetros de controle do sistema.

Figura 43 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Eólico + Íon-Lítio).



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O primeiro gráfico apresentado na figura 43, mostra a evolução da tensão de carregamento do sistema eólico aliado à bateria de íons de lítio. Nele, verifica-se um crescimento coerente e suave ao longo do tempo, partindo de uma tensão inicial em

torno de 80 V e atingindo valores próximos a 105 V ao final da simulação. Essa evolução gradual é um indicativo do bom desempenho do sistema e da adaptação da tensão fornecida pelo gerador eólico, que se mantém estável e sem apresentar flutuações abruptas que poderiam comprometer o processo de carregamento. Além disso, a curva ascendente demonstra a capacidade do conversor eólico de regular a tensão para atender às necessidades de recarga da bateria, reforçando a viabilidade do sistema híbrido eólico-bateria para aplicações de armazenamento de energia.

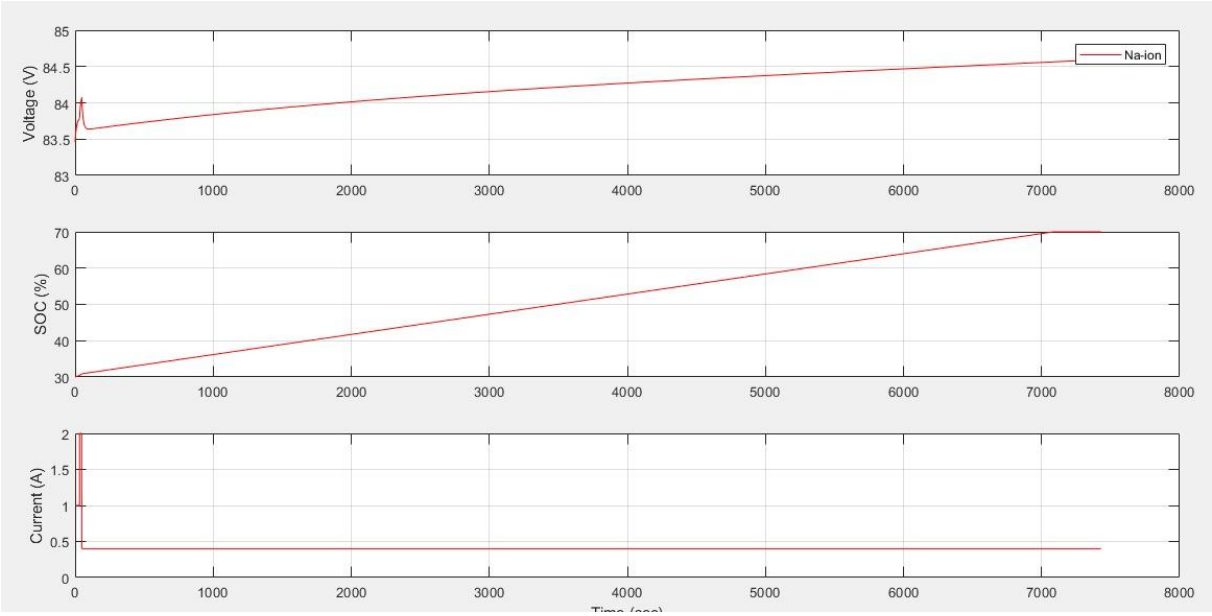
O segundo gráfico apresenta a evolução do estado de carga no processo de carregamento. Observa-se uma trajetória linear e consistente que se inicia em 0% e atinge 100% ao final do período de simulação, que durou aproximadamente 3650 segundos. Esse comportamento linear indica que o sistema foi capaz de fornecer energia de forma estável e contínua, sem interrupções ou quedas abruptas, assegurando um carregamento completo e controlado.

O terceiro gráfico apresenta o perfil da corrente, sendo notável que, logo nos primeiros segundos de carregamento, ocorre uma breve flutuação da corrente entre 1 A e 2 A, reflexo de pequenas variações de potência no início da operação. Após esse curto período inicial, a corrente rapidamente se estabiliza no patamar de 2 A, mantendo-se constante e assegurando um carregamento eficiente e seguro. Essa estabilidade da corrente, aliada ao comportamento linear do SOC e à variação suave da tensão, demonstra que o sistema operou de forma otimizada, com resultados excelentes para todos os parâmetros analisados e reforçando a confiabilidade e a robustez do modelo proposto.

5.5 SISTEMA EÓLICO + BATERIA DE ÍONS DE SÓDIO

Os resultados obtidos para o carregamento da bateria de íons de sódio, integrando-a ao sistema de geração de energia eólica, são ilustrados na figura 44 abaixo. Esse arranjo utiliza a mesma base metodológica e o mesmo algoritmo de programação do MATLAB apresentados anteriormente, apenas com ajustes para as características e parâmetros próprios da tecnologia de sódio.

Figura 44 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Eólico + Íon-Sódio).



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Devido às limitações do hardware utilizado para processar o modelo computacional, foi possível simular apenas o processo de carregamento parcial da bateria, especificamente no intervalo de 30% a 70% do estado de carga. Essa escolha permitiu capturar de maneira eficiente o comportamento do sistema dentro de uma faixa operacional relevante, evitando sobrecarga de processamento e garantindo a precisão dos dados obtidos.

No primeiro gráfico da figura 44, que retrata a evolução da tensão ao longo do tempo, nota-se uma pequena oscilação inicial na tensão, indicando ajustes dinâmicos do sistema nos primeiros segundos. Posteriormente, a curva de tensão estabiliza-se de forma uniforme e crescente, variando de aproximadamente 83.5 V a 84.7 V ao longo da simulação, o que demonstra um carregamento controlado e eficiente mesmo dentro desse intervalo mais restrito.

No segundo gráfico, que apresenta a evolução do estado de carga, observa-se um comportamento bastante estável e linear, refletindo a uniformidade do carregamento. Apesar das limitações de hardware que restringiram o estudo, a curva do SOC demonstra um crescimento contínuo e suave, sem flutuações significativas. Essa característica evidencia que, mesmo no carregamento parcial, o sistema de controle conseguiu manter a operação em níveis consistentes, assegurando uma

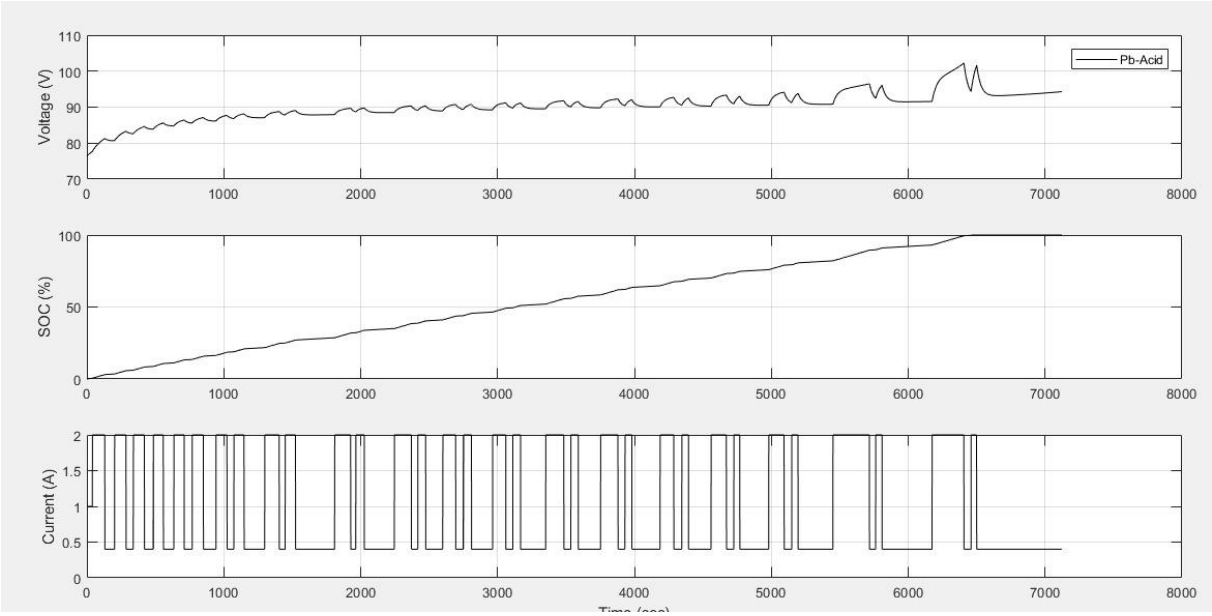
progressão confiável e sem instabilidades.

No terceiro gráfico, que mostra o perfil de corrente, nota-se uma oscilação inicial que varia de 0,5 A até 2 A. Essa oscilação reflete um ajuste dinâmico e rápido do sistema para estabilizar a potência fornecida à bateria nos primeiros segundos do processo. Após essa flutuação inicial, a corrente se mantém estável em 0,5 A, indicando que o sistema encontrou o equilíbrio necessário para a transferência de energia em um regime controlado e seguro. Essa estabilização, embora positiva em termos de segurança, contribuiu diretamente para que o carregamento ocorresse de forma mais lenta, pois o valor de corrente permaneceu constante em um patamar inferior, alongando o tempo total do carregamento dentro do intervalo simulado.

5.6 SISTEMA EÓLICO + BATERIA CHUMBO-ÁCIDO

Finalizando a simulação dos modelos híbridos, temos o modelo que integra o sistema eólico com as baterias de chumbo-ácido. Como observado nos casos anteriores, a modelagem e a metodologia de obtenção dos gráficos são semelhantes, exigindo apenas adaptações pontuais para as especificidades desse novo conjunto. A figura 45 a seguir, apresenta os resultados obtidos, permitindo uma análise detalhada do desempenho do sistema ao longo do processo de carregamento.

Figura 45 - Gráficos de tensão, SOC e corrente ao longo da simulação (Eólico + Chumbo-Ácido).



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

O primeiro gráfico revela uma significativa oscilação nos valores de tensão ao longo do carregamento, destacando um comportamento bastante irregular e flutuante. Essa instabilidade é evidenciada pelas variações que partem de cerca de 78 V e atingem picos de até 102 V, sem um padrão consistente ao longo do tempo. Essas oscilações de grande amplitude comprometem a confiabilidade dos dados obtidos, pois não permitem uma leitura estável ou precisa para a tensão do sistema. O perfil de tensão nesse caso demonstra a dificuldade de controlar a geração eólica em conjunto com as baterias de chumbo-ácido, um aspecto que merece atenção para a melhoria do desempenho e da segurança operacional desse modelo.

O segundo gráfico demonstra claramente como o estado de carga da bateria foi impactado negativamente pelas flutuações significativas da tensão de carregamento. Ao longo do período de simulação, que totalizou aproximadamente 6400 segundos, é possível perceber que o SOC não manteve um crescimento constante e estável, apresentando oscilações e variações em diferentes pontos do carregamento. Essas instabilidades são consequência direta das flutuações na tensão, observadas no gráfico anterior, e das flutuações de corrente que serão discutidas posteriormente.

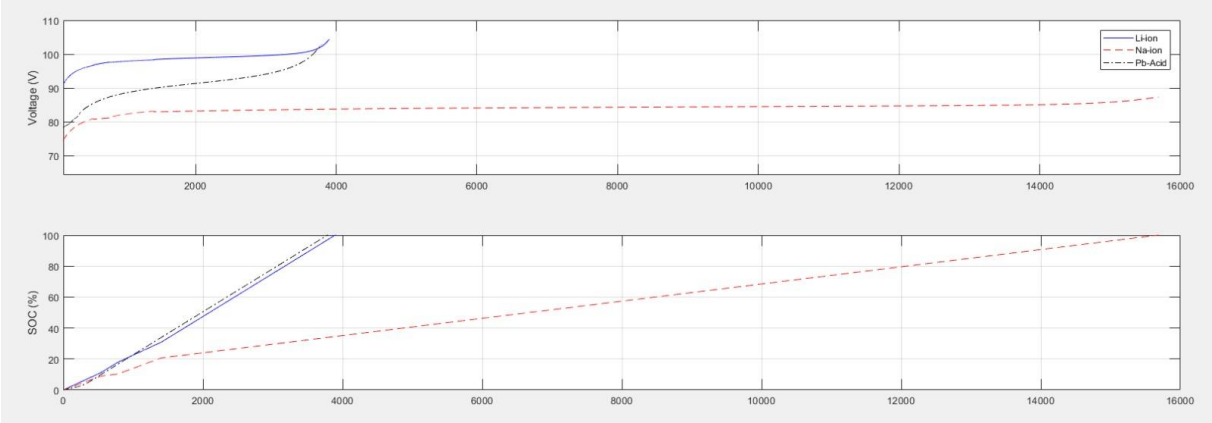
O terceiro gráfico, que representa o perfil de corrente durante o carregamento,

revela uma intensa oscilação ao longo de toda a simulação. Desde o início até o final do carregamento, observa-se que a corrente alterna continuamente entre 0,5 A e 2 A, sem apresentar qualquer período de estabilização significativo. Esse padrão irregular de fornecimento de corrente impacta diretamente a qualidade do processo de carregamento. Esse comportamento evidencia a dificuldade do sistema eólico em fornecer uma energia uniforme e controlada quando integrado com as baterias de chumbo-ácido, resultando em um carregamento menos eficiente e menos confiável.

5.7 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE OS SISTEMAS HÍBRIDOS

A análise comparativa entre as tecnologias de baterias integradas aos sistemas solar e eólico, permite identificar diferenças fundamentais no desempenho de carregamento e na estabilidade operacional de cada configuração. Os gráficos de tensão e de estado de carga ao longo do tempo evidenciam as características distintas de cada tecnologia. Essa comparação fornece informações valiosas sobre a adequação de cada tipo de bateria para diferentes aplicações em sistemas híbridos. A figura 46 a seguir, ilustra esses resultados na configuração solar + baterias.

Figura 46 - Comparação Gráfica do Sistema Solar + Baterias: Desempenho de Tensão e Estado de Carga.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Comparando os gráficos atuais com os que foram apresentados anteriormente de forma isolada para cada bateria, nota-se que existe uma leve discrepância nos valores iniciais das tensões. Isso ocorre em virtude da escala horizontal desse novo

gráfico, que agrupa todas as curvas em uma única visão de longo alcance, resultando em uma menor precisão das curvas iniciais, afetando diretamente os valores. Essa característica exige uma visualização mais abrangente para capturar o comportamento global de todos os sistemas ao mesmo tempo. Ainda assim, o padrão de evolução das tensões ao longo do tempo mantém-se alinhado com o que foi detalhado nos gráficos individuais, garantindo a coerência dos resultados. Essa diferença sutil nos valores iniciais reforça a importância de considerar as particularidades de cada bateria, onde a interação simultânea dos componentes pode afetar o comportamento global do sistema.

O primeiro gráfico apresenta as curvas de tensão ao longo do processo de carregamento das três tecnologias de baterias, evidenciando diferenças significativas nos valores alcançados por cada modelo. Observa-se que as baterias de íons de lítio (linha azul) exibem uma faixa de tensão que parte de cerca de 80 V e progride até aproximadamente 105 V, caracterizando um comportamento ágil e com resposta linear estável. Em contraste, as baterias de chumbo-ácido (linha tracejada preta) iniciam a carga em torno de 78 V, atingindo cerca de 100 V, seguindo uma curva suave e controlada. Já as baterias de íons de sódio (linha vermelha tracejada) apresentam uma faixa de carregamento mais restrita, começando próximo de 70 V e estabilizando-se em torno de 85 V. Essa diferença de valores de tensão reflete diretamente as propriedades eletroquímicas de cada tecnologia, que influenciam diretamente a capacidade de armazenamento e a eficiência do carregamento.

Apesar das diferenças nos valores absolutos, o formato geral das curvas é consistente com os resultados já abordados nas revisões, confirmando a tendência de crescimento inicial mais acentuado seguido por uma estabilização progressiva à medida que o carregamento avança. Essa semelhança de padrão reforça a confiabilidade dos modelos empregados na simulação e sugere que os ajustes realizados para cada tipo de bateria são coerentes com o comportamento real dos sistemas. Dessa forma, o gráfico sintetiza de maneira clara como as especificidades de cada bateria impactam na evolução da tensão de carregamento, sendo uma etapa essencial para compreender as limitações e as vantagens de cada alternativa.

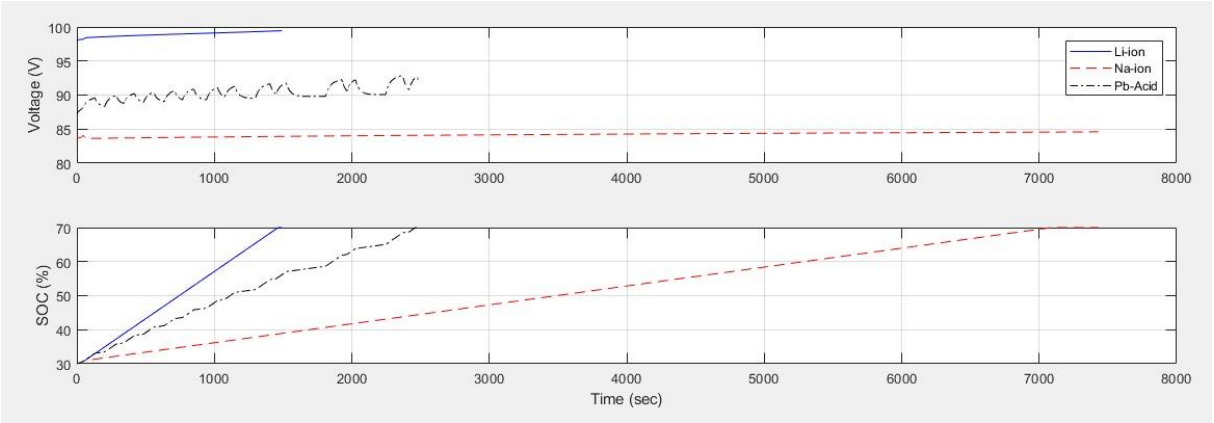
O segundo gráfico, mostra a evolução do estado de carga das três tecnologias de baterias ao longo do processo de carregamento, e é possível notar diferenças nos tempos totais de carregamento. Enquanto as baterias de chumbo-ácido completam o carregamento em aproximadamente 3800 segundos, tempo bem próximo as de íons

de lítio, que o faz em cerca de 3900 segundos. Já as baterias de sódio apresentam um tempo de carregamento consideravelmente maior, estendendo-se até cerca de 15.800 segundos.

Essa diferença no tempo de carregamento está diretamente relacionada às variações de tensão observadas no primeiro gráfico, que afetam diretamente a corrente de carga. Nas baterias de chumbo-ácido e íons de lítio, a tensão mais estável possibilita um carregamento relativamente rápido e eficiente, enquanto nas baterias de sódio, as tensões mais baixas e as variações mais significativas levam a um processo mais lento e menos constante. Essa comparação destaca como as características de tensão e corrente de cada tecnologia impactam diretamente a velocidade de carregamento e, por consequência, a viabilidade de cada bateria para diferentes aplicações híbridas.

Partindo agora para a comparação entre as diferentes tecnologias de baterias atreladas à geração eólica, observa-se a importância de entender como cada uma delas se comporta quando submetida às mesmas condições de carga e geração de energia. Essa etapa visa analisar de maneira clara e objetiva as variações no comportamento dos sistemas de armazenamento de energia, considerando não apenas as diferenças inerentes a cada tipo de bateria, mas também as interações complexas que surgem com o perfil variável e intermitente do sistema eólico. A figura 47 a seguir, ilustra a evolução da tensão e do estado de carga para as baterias de íons de lítio, íons de sódio e chumbo-ácido.

Figura 47 - Comparação Gráfica do Sistema Eólico + Baterias: Desempenho de Tensão e Estado de Carga.



Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Para se obter uma comparação mais justa entre as tecnologias, todos os testes foram realizados no mesmo intervalo de estado de carga, partindo de 30% e finalizando em 70%. Essa escolha foi motivada pelas limitações de hardware já mencionadas, as quais impossibilitaram a realização de simulações completas para todas as baterias. Além disso, essa faixa de SOC representa um intervalo operacional seguro e comum nas aplicações práticas, permitindo avaliar o desempenho realista e comparável entre as diferentes tecnologias quando submetidas ao carregamento por energia eólica.

Outro ponto importante nessa comparação, é o fato de a representação gráfica sofrer o mesmo problema de escala observado na figura 40, em que a escala horizontal extensa comprometeu a precisão dos valores iniciais de tensão, tornando-os menos representativos.

No primeiro gráfico, que mostra a evolução da tensão ao longo do tempo de carregamento, fica evidente a discrepância de comportamento entre as diferentes tecnologias de baterias. A bateria de íons de lítio apresentou uma trajetória de tensão estável e ascendente, partindo de cerca de 80 V, indo até aproximadamente 105V, de maneira constante, evidenciando sua maior estabilidade e consistência operacional.

Em contrapartida, a bateria de chumbo-ácido registrou consideráveis oscilações ao longo de todo o carregamento, com variações de tensão entre 78 V e 102 V, refletindo uma instabilidade acentuada que poderia impactar a confiabilidade do sistema. Por fim, a bateria de íons de sódio se destacou por manter uma linha praticamente reta, com mínima variação de tensão ao redor dos 84 V, indicando um processo de carregamento mais controlado, porém menos dinâmico. Essas diferenças ressaltam não apenas as características intrínsecas de cada tecnologia, mas também sua adequação para operar em conjunto com fontes eólicas, que naturalmente apresentam maior variabilidade na geração.

O segundo gráfico revela as diferenças nos tempos de carregamento entre as três tecnologias de baterias, refletindo diretamente as distintas características de cada uma. A curva da bateria de íons de lítio demonstra um carregamento mais rápido, apresentando uma evolução linear e contínua do estado de carga sem grandes variações ao longo do processo. Já a bateria de chumbo-ácido apresenta um tempo de carregamento intermediário, com a curva do SOC seguindo um crescimento gradual, porém um pouco mais lento e marcado por grandes oscilações, consequência direta das flutuações de tensão e corrente que afetam seu desempenho. Por outro

lado, a bateria de íons de sódio possui o tempo de carregamento mais prolongado, com uma progressão ainda mais suave do SOC, resultado de sua menor capacidade de aceitação de carga e menor *fully charged voltage*, além de suas especificidades químicas.

A comparação gráfica das correntes de carregamento para as três tecnologias de baterias não apresentou resultados visualmente claros e objetivos para análise em conjunto. As diferenças nos perfis de corrente, marcadas por flutuações acentuadas ou estabilizações abruptas, geraram sobreposições e dificultaram a visualização adequada em um mesmo gráfico. Dessa forma, optou-se por apresentar as correntes de cada bateria de forma individualizada, garantindo maior precisão na interpretação dos dados e permitindo uma análise mais detalhada e assertiva do comportamento de cada tecnologia ao longo do processo de carregamento.

Para facilitar a visualização e comparação dos dados, as tabelas 2 e 3 foram elaboradas para resumir os principais resultados obtidos nas simulações. A tabela 2 apresenta os dados referentes aos sistemas híbridos que combinam a geração solar com as diferentes tecnologias de baterias, destacando parâmetros como faixa de tensão, tempo de carregamento, comportamento da corrente e trajetória do SOC. Já a tabela 3 reúne as informações correspondentes aos sistemas híbridos eólicos, permitindo uma análise clara e objetiva das semelhanças e diferenças de desempenho de cada tipo de bateria. Esses resumos numéricos complementam as análises gráficas e oferecem uma visão integrada e comparativa dos modelos propostos.

Tabela 2 - Desempenho das Baterias no Sistema Solar.

Bateria	**Faixa de Tensão (V)**	**Tempo de Carregamento (s)**	**Comportamento da Corrente**	**Trajetória do SOC**
Íons de Lítio	80 – 105	3900	Estável após pulsos iniciais	Linear, rápido e estável
Íons de Sódio	70 – 85	15800	Oscilação inicial antes de estabilizar	Linear após flutuação inicial, mais lento
Chumbo-Ácido	78 – 100	3800	Oscilações constantes até estabilização	Linear após ajustes iniciais, gradual

Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Tabela 3 - Desempenho das Baterias no Sistema Eólico.

Bateria	**Faixa de Tensão (V)**	**Tempo de Carregamento (s)**	**Comportamento da Corrente**	**Trajetória do SOC**
Íons de Lítio	80 – 105	3650	Oscilação inicial, depois estável	Linear, rápido e estável
Íons de Sódio	83.5 – 84.7	7000 (30-70%)	Oscilação inicial antes de estabilizar	Linear após flutuação inicial, mais lento
Chumbo-Ácido	78 – 102	6400	Oscilações constantes ao longo de todo carregamento	Com oscilações, carregamento não-uniforme

Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Após as análises realizadas por meio das figuras e tabelas, referentes as diversas simulações, ficou evidente que as baterias de íons de lítio apresentaram o melhor desempenho tanto nos sistemas solares quanto nos eólicos. Essa

superioridade pode ser atribuída ao seu perfil de carregamento rápido e ao comportamento estável dos parâmetros elétricos ao longo do processo. As baterias de íons de lítio demonstraram uma faixa de tensão bem definida e livre de oscilações abruptas, além de um carregamento consistente, que partiu de valores iniciais adequados e se desenvolveu linearmente até o valor máximo de SOC. Essa estabilidade é fundamental em sistemas híbridos, garantindo maior confiabilidade e menor risco de degradação dos componentes, aspectos cruciais para a viabilidade prática de aplicações em larga escala.

No contexto do carregamento, outro ponto que destaca as baterias de íons de lítio como as mais eficientes é a forma como a corrente se comporta durante o processo. Em ambos os sistemas, a corrente de carregamento apresentou apenas uma breve oscilação inicial, rapidamente estabilizando-se em um valor constante que permitiu um carregamento seguro e previsível. Esse comportamento controlado reflete a capacidade dessas baterias de absorver energia de forma eficiente e gerenciar adequadamente as variações típicas das fontes renováveis, como as flutuações de irradiância solar ou da velocidade do vento. Essa característica reduz consideravelmente as perdas de energia e o tempo de carregamento total, fatores que são fundamentais para o desempenho do sistema como um todo.

Além disso, a química avançada das baterias de íons de lítio confere a elas uma maior densidade energética e menores perdas internas por resistência, o que se traduz em menores flutuações nos perfis de tensão e corrente durante a operação. Esses aspectos são particularmente relevantes nos sistemas híbridos eólicos, onde a intermitência e as oscilações da fonte são mais pronunciadas. A capacidade de lidar com essas variações sem comprometer a estabilidade operacional do sistema reforça ainda mais a superioridade das baterias de íons de lítio em relação às de sódio e chumbo-ácido, que apresentaram flutuações maiores e tempos de carregamento significativamente mais longos, principalmente no caso das baterias de sódio.

Por fim, os resultados das análises mostraram que, apesar das baterias de chumbo-ácido serem competitivas em termos de custo e reciclabilidade, elas apresentaram maiores oscilações de tensão e corrente, além de instabilidades no SOC que comprometem a confiabilidade do sistema híbrido, especialmente no contexto eólico. As baterias de íons de sódio, por sua vez, mesmo demonstrando um carregamento estável após a fase inicial, tiveram tempos de carregamento muito superiores e voltagens de operação mais baixas, limitando sua aplicação em sistemas

que demandam respostas mais dinâmicas. Assim, considerando a soma de fatores como eficiência energética, estabilidade de carregamento, confiabilidade e capacidade de resposta às fontes renováveis intermitentes, as baterias de íons de lítio consolidam-se como a tecnologia mais adequada para integração com sistemas híbridos solares e eólicos.

5.8 ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE A SEGURANÇA TÉRMICA DAS BATERIAS

A segurança térmica constitui um dos critérios centrais na avaliação de tecnologias de armazenamento aplicadas a sistemas híbridos de geração de energia. Os mecanismos de falha térmica, a propagação de calor entre células e a complexidade do combate a incêndios variam significativamente entre baterias de íons de lítio, íons de sódio e chumbo-ácido. Nos resultados obtidos e à luz da literatura apresentada anteriormente, observa-se que cada tecnologia apresenta riscos específicos, associados à sua química, arquitetura construtiva e condições operacionais.

As baterias de íons de lítio destacam-se pela elevada densidade energética, característica que, embora vantajosa do ponto de vista de desempenho, implica maior potencial de liberação de energia em situações de falha. Conforme abordado na revisão, essas baterias estão sujeitas ao fenômeno de fuga térmica, no qual reações exotérmicas internas podem provocar aumento descontrolado de temperatura, liberação de gases inflamáveis e ignição espontânea. Em sistemas de maior porte, a propagação térmica entre células representa um risco relevante, exigindo a adoção de barreiras físicas, sistemas avançados de gerenciamento e estratégias específicas de supressão de incêndio. O combate a eventos críticos envolvendo lítio tende a demandar resfriamento prolongado e monitoramento contínuo, aumentando a complexidade operacional em comparação com outras tecnologias.

No caso das baterias de íons de sódio, o comportamento térmico depende da configuração tecnológica. Sistemas sódio-enxofre operam em temperaturas elevadas de forma controlada, exigindo isolamento térmico constante para manter o eletrólito em estado líquido. Embora essa condição represente um requisito permanente de gerenciamento térmico, tais sistemas apresentam menor suscetibilidade à fuga térmica explosiva típica de células de lítio. Já as baterias de sódio-níquel-cloreto demonstram estabilidade estrutural significativa, com menor tendência à propagação

de falhas térmicas entre módulos. Dessa forma, os riscos associados a incêndios tendem a ser mais previsíveis e controláveis, desde que os mecanismos de proteção estejam devidamente instalados e configurados.

As baterias de chumbo-ácido, por sua vez, não apresentam o mesmo mecanismo de fuga térmica observado nas tecnologias baseadas em lítio. Entretanto, possuem riscos específicos relacionados à liberação de hidrogênio durante sobrecargas, especialmente em modelos inundados. A formação de atmosferas inflamáveis em ambientes mal ventilados constitui o principal risco térmico dessa tecnologia. Por fim, temperaturas elevadas aceleram processos de corrosão e degradação da massa ativa, reduzindo a vida útil do sistema. Apesar desses fatores, o combate a incêndios envolvendo baterias chumbo-ácido tende a ser menos complexo do que em sistemas Li-íon, pois não há reação exotérmica autossustentada de alta intensidade.

Podemos analisar essa comparação na Tabela 4 a seguir, que resume os principais aspectos relacionados à segurança térmica e ao combate a incêndios das três tecnologias avaliadas.

Tabela 4 - Comparativo da segurança térmica entre diferentes tecnologias de baterias

Critério	Íons de Lítio	Íons de Sódio	Chumbo-Ácido
Suscetibilidade à fuga térmica	Alta	Baixa a moderada	Muito baixa
Propagação térmica entre células	Elevada	Moderada	Baixa
Liberação de gases inflamáveis	Sim	Limitada	Hidrogênio em sobrecarga
Complexidade do combate a incêndio	Alta	Moderada	Baixa a moderada
Necessidade de sistemas avançados de proteção	Elevada	Elevada	Moderada

Fonte: Elaborada pelo Autor (2026).

Os resultados indicam que a escolha da tecnologia deve considerar não apenas desempenho energético e custo, mas também o nível de risco térmico aceitável para

a aplicação específica. Em sistemas híbridos estacionários, nos quais segurança operacional e previsibilidade são fatores determinantes, as diferenças entre as tecnologias tornam-se particularmente relevantes para o dimensionamento de sistemas de proteção e mitigação de riscos.

6 CONCLUSÕES

Neste trabalho, foi realizada uma análise comparativa do desempenho de baterias de íons de lítio, íons de sódio e chumbo-ácido aplicadas a sistemas híbridos de geração solar e eólica, por meio de simulações no MATLAB/Simulink. Foram avaliados parâmetros técnicos como faixa de tensão, tempo de carregamento, comportamento da corrente e trajetória do estado de carga, permitindo identificar de forma objetiva as diferenças operacionais entre as tecnologias.

Os resultados obtidos evidenciaram que as baterias de íons de lítio apresentaram o melhor desempenho em ambos os sistemas analisados. No sistema solar, essas baterias atingiram o carregamento em aproximadamente 3.900 s, operando entre 80–105 V, com comportamento de corrente estável após oscilações iniciais e trajetória de SOC linear. No sistema eólico, mantiveram desempenho superior, com tempo de carregamento de aproximadamente 3.650 s, demonstrando rápida resposta e elevada estabilidade mesmo sob condições de geração variável.

As baterias de chumbo-ácido apresentaram desempenho próximo ao das baterias de íons de lítio no sistema solar (≈3.800 s; 78–100 V), porém com oscilações mais evidentes ao longo do carregamento. No sistema eólico, apresentaram tempo de aproximadamente 6.400 s e faixa de operação entre 78–102 V, mantendo comportamento consistente após estabilização, porém com menor eficiência dinâmica em comparação às baterias de íons de lítio.

Por outro lado, as baterias de íons de sódio apresentaram as maiores limitações entre as tecnologias avaliadas. No sistema solar, o tempo de carregamento foi significativamente superior (≈15.800 s), com faixa de tensão mais restrita (70–85 V). No sistema eólico, apresentaram comportamento intermediário, com aproximadamente 7.000 s para atingir 30–70% do SOC e operação em faixa estreita (83,5–84,7 V), além de maior instabilidade inicial e resposta mais lenta.

Além do desempenho energético, a análise de segurança térmica evidenciou diferenças relevantes entre as tecnologias. As baterias de íons de lítio, apesar do melhor desempenho operacional, apresentam maior suscetibilidade à fuga térmica e elevada propagação de calor entre células, o que implica maior complexidade no combate a incêndios e necessidade de sistemas avançados de proteção e gerenciamento térmico. As baterias de íons de sódio demonstraram comportamento térmico mais estável, com menor tendência à propagação de falhas entre células e

riscos mais previsíveis, embora ainda exijam controle térmico contínuo. Já as baterias de chumbo-ácido apresentaram menor risco de fuga térmica e menor propagação de calor, porém com riscos associados à liberação de hidrogênio em condições de sobrecarga, exigindo ventilação adequada para evitar atmosferas inflamáveis.

Com base nesses resultados, observa-se que a tecnologia de íons de lítio é a mais adequada para aplicação em sistemas híbridos de geração solar e eólica, devido à sua combinação de menor tempo de carregamento, maior estabilidade de operação e melhor resposta dinâmica frente às variações das fontes renováveis. No entanto, essa escolha deve ser acompanhada de estratégias robustas de gerenciamento térmico e mitigação de riscos. As baterias de chumbo-ácido podem ser consideradas uma alternativa viável em aplicações menos exigentes e com maior tolerância a oscilações, especialmente quando a simplicidade operacional é um fator relevante. Já as baterias de íons de sódio, apesar de apresentarem potencial tecnológico e maior previsibilidade térmica, ainda não demonstraram desempenho competitivo para as condições analisadas neste estudo.

Dessa forma, conclui-se que, para aplicações que demandam maior eficiência energética, estabilidade e confiabilidade operacional, as baterias de íons de lítio representam a solução mais indicada, enquanto as demais tecnologias podem ser aplicadas de forma complementar, dependendo das restrições técnicas, operacionais, econômicas e dos requisitos de segurança do sistema.

REFERÊNCIAS

ABEEÓLICA. **Boletim anual de dados do setor de energia eólica 2022**. São Paulo: Associação Brasileira de Energia Eólica, 2022.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). *Consulta Pública nº 39/2023 – Armazenamento de Energia*. Brasília: ANEEL, 2023.

AL-DAHIDI, S. et al. Enhancing solar photovoltaic energy production prediction using diverse machine learning models tuned with the chimp optimization algorithm. **Scientific Reports**, v. 14, p. 18583, 2024.

ALMEIDA, F. Energia eólica distribuída e centralizada: uma análise comparativa. **Revista Brasileira de Energias Renováveis**, v. 10, n. 2, p. 58–65, 2021.

ALVAREZ, Genesis; MORADI, Hadis; SMITH, Mathew; ZILOUCHIAN, Ali. **Modeling a Grid-Connected PV/Battery Microgrid System with MPPT Controller**. 2017. Disponível em: https://arxiv.org/abs/1710.00063.

ARAI, Takeshi; KIMURA, Hiroshi; YOSHIDA, Takashi. Advances in lithium-ion battery modeling and simulation. **Journal of Energy Storage**, 2022. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2203.16091.

AYDIN, Aslihan; ZAJONZ, Franziska; GÜNTHER, Till; DERMENCI, Kamil Burak; BERECIBAR, Maitane; URRUTIA, Lisset. Lithium-Ion Battery Manufacturing: Industrial View on Processing Challenges, Possible Solutions and Recent Advances. **Batteries**, v. 9, n. 555, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/batteries9110555>.

AKINYELE, D. O. *et al.,* Review of Energy Storage Technologies for Sustainable Power Networks, **Journal of Sustainable Energy Technologies and Assessments**, Nova Zelandia, Julho, 2014.

BAAZOUZI, Sabri; FEISTEL, Niklas; WANNER, Johannes; LANDWEHR, Inga; FILL, Alexander; BIRKE, Kai Peter. Design, Properties, and Manufacturing of Cylindrical Li-

Ion Battery Cells—A Generic Overview. **Batteries**, v. 9, n. 309, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/batteries9060309.

BAGHAI, H.; KHAN, I.; ASHFAQ, M. Hybrid renewable energy systems: A pathway to a sustainable future. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2020.

BAUER, A. et al. The scale-up and commercialization of nonaqueous Na-ion battery technologies. **Advanced Energy Materials**, v. 8, n. 1702869, 2018.

BENATO, R. et al. **Sodium-nickel chloride ($Na\text{-}NiCl_2$) battery safety tests for stationary electrochemical energy storage**. University of Padova / Fiamm Sonick, 2023.

BEZERRA, F. D. Oportunidades para o Nordeste em Energia Eólica. **Caderno Setorial Etene**, 1 (177), 1-12.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2010.

CARROQUINO, J. et al. **Comparison of Economic Performance of Lead-Acid and Li-Ion Batteries in Standalone Photovoltaic Energy Systems**. Applied Sciences, 2021.

CARVALHO, A. Classificação de turbinas eólicas e aplicações em ambientes urbanos. **RECIMA21**, v. 5, n. 11, p. 60–68, 2020.

CARVALHO, A. Tipos de turbinas eólicas: aplicações e características técnicas. **RECIMA21**, v. 5, n. 11, p. 45–54, 2020.

CARVALHO, M. A. et al. Caracterização do material precursor de placas de baterias de chumbo-ácido. **Revista Eletrônica de Materiais e Processos**, 2019.

CATHERINO, H. A.; FERES, F. F.; TRINIDAD, F. Sulfation in Lead–Acid Batteries. **Journal of Power Sources**, 2004.

CEAR - CENTRO DE ENERGIA ALTERNATIVA E RENOVÁVEL. **Estudo sobre degradação de baterias de lítio para aplicações em mobilidade elétrica**. Universidade Federal da Paraíba, 2024.

CHAVES, M. S. et al. Sistema de hardware para monitoramento de baterias chumbo-ácido em tempo real. **Anais do Congresso Brasileiro de Eletrônica de Potência**, 2020.

CNN Brasil. **Turbinas eólicas offshore no Brasil**: o que muda com os novos projetos? CNN, 2023. Disponível em: https://www.cnnbrasil.com.br.

CONSELHO NACIONAL DO MEIO AMBIENTE (CONAMA). Resolução nº 401, de 4 de novembro de 2008. Estabelece limites máximos de chumbo, cádmio e mercúrio para pilhas e baterias comercializadas no território nacional. **Diário Oficial da União**, Brasília, 2008.

CUNHA, A.; BRITO, F. P.; MARTINS, J.; RODRIGUES, N.; MONTEIRO, V.; AFONSO, J. L.; FERREIRA, **P. Assessment of the use of vanadium redox flow batteries for energy storage and fast charging of electric vehicles in gas stations**. *Energy*, v. 115, p. 1478-1494, 2016.

CUNHA, M. L.; SILVA, R. A.; SILVA, D. F. Desenvolvimento sustentável e a energia eólica no Brasil. **Revista Recima21**, v. 5, n. 10, p. 223–233, 2024.

DANTAS, S. G.; POMPERMAYER, F. M. **Viabilidade econômica de sistemas fotovoltaicos no Brasil e possíveis efeitos no setor elétrico**. Texto para Discussão Ipea, n. 2388, 2018.

DAOWD, Mohamed; OMAR, Noshin; VERBRUGGE, Bavo; VAN DEN BOSSCHE, Peter; VAN MIERLO, Joeri. **Battery models parameter estimation based on Matlab/Simulink®. 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition** (EVS-25), Shenzhen, China, Nov. 5-9, 2010. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/245344619.

DASCALU, A.; CRUDEN, A. J.; SHARKH, S. M. Experimental Investigations into a

Hybrid Energy Storage System Using Directly Connected Lead-Acid and Li-Ion Batteries. ***Energies***, v. 17, n. 18, p. 1-21, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/18/4726.

BIRD, L.; LEW, D.; MILLIGAN, M. Wind and solar energy curtailment: A review of international experience. ***Renewable and Sustainable Energy Reviews***, v. 65, p. 577–586, 2016.

DRAGON SOLAR. **Banco de imagens e diagramas do sistema híbrido solar-eólico com banco de baterias e geradores**. Disponível em: https://dragonsolar.com.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2035* – ***Relatório Preliminar***. Brasília: EPE, 2026.

ENGELHARDT, J.; ZEPTER, J. M.; GABDERAKHMANOVA, T.; MARINELLI, M. Energy Management of a Multi-Battery System for Renewable-Based High Power EV Charging. ***eTransportation***, 2022.

ENGIE. Reve News. Turbinas flutuantes ampliam potencial eólico offshore na Europa. **Reve News**, 2024. Disponível em: https://www.evwind.es.

FALCÃO, D. M. et al. Case Studies of Battery Energy Storage System Applications in the Brazilian Transmission System. ***Energies***, v. 17, n. 22, 2024.

FANG, Z.; SHEK, J. K. H.; SUN, W. **A review of grid-connected hybrid energy storage systems**: Sizing configurations, control strategies, and future directions. *Journal of Energy Storage*, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352152X25009399.

FERNANDES DE LEVA, F. et al. **Modelo de um projeto de um sistema fotovoltaico**. Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, Núcleo de Eletricidade Rural e Fontes Alternativas de Energia, 2016.

GAO, T.; HU, L.; WEI, M. **Life Cycle Assessment (LCA)-based study of the lead-**

acid battery industry. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science, v. 651, 2021.

GÉLIO, L. G.; CÉSAR, F. I. G. Energia solar: um estudo sobre o futuro da geração de energia elétrica. **Revista Científica ACERTTE**, v. 1, n. 5, 2021.

GHODDAMI, H.; DELGHAVI, M. B.; YAZDANI, A. An integrated wind-photovoltaic-battery system with reduced power-electronic interface and fast control for grid-tied and off-grid applications. ***Renewable Energy***, v. 45, p. 128-137, 2012.

GONÇALVES, R.; LANCEROS-MÉNDEZ, S.; COSTA, C. M. Electrode fabrication process and its influence in lithium-ion battery performance: State of the art and future trends. **Electrochemistry Communications**, v. 135, p. 107210, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.elecom.2022.107210.

HANIFI, A. et al. **Advanced hyperparameter optimization of deep learning models for wind power forecasting**. Applied Energy, v. 356, p. 121–131, 2024.

IBERDROLA. **Como funciona a energia eólica?** In: Nossa Energia. 2024. Disponível em: https://nossaenergia.petrobras.com.br.

IEEE. IEEE Std 1679.2-2018: **IEEE Guide for the Characterization and Evaluation of Sodium-Beta Batteries in Stationary Applications**. New York: IEEE Standards Association, 2018.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). ***Energy Storage Tracking Report 2023***. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). ***Annual grid-scale battery storage additions, 2017–2022***. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/data-and-statistics/charts/annual-grid-scale-battery-storage-additions-2017-2022.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). ***Global battery storage capacity additions, 2010–2023***. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/data-and-

statistics/charts/global-battery-storage-capacity-additions-2010-2023.

INSTITUTO DE PESQUISA ECONÔMICA APLICADA (IPEA). ***Novas tecnologias e infraestrutura do setor elétrico brasileiro***. Brasília: IPEA, 2022.

ISLAM, Towhida; IYER-RANIGA, Usha. Developing a framework for zero carbon built environment in Australia: An analysis of zero carbon policies and practices. Renewable and Sustainable **Energy Reviews**, v. 143, p. 110879, 2022. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.110879.

JIN, T. et al. High-Energy Aqueous Sodium-Ion Batteries. **Angewandte Chemie International Edition**, v. 60, p. 11943–11948, 2021.

JUST LITHIUM BATTERY. **3.2V LiFePO4 Cell Voltage Chart**. Disponível em: https://justlithiumbattery.com.

KASHKAROV, E. B. et al. Lead–acid battery SOC prediction using improved AdaBoost algorithm. **Journal of Energy Storage**, 2020.

KEBEDE, A. A. et al. Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application. **Journal of Energy Storage**, 2021.

KHAN, M. et al. Hybrid power systems: Advances and applications. **Energy Reports**, 2021.

KHAZALI, A. et al. Planning a Hybrid Battery Energy Storage System for Supplying Electric Vehicle Charging Station Microgrids. ***Energies***, v. 17, n. 15, 2024. Disponível em: https://www.mdpi.com/1996-1073/17/15/3631.

KIM, H. et al. Techno-economic analysis of lithium-ion and lead-acid batteries in stationary energy storage application. **Energy Reports**, 2022.

KIM, S.; KANG, B.; BAE, S.; PARK, J. **Application of SMES and grid code compliance to wind/photovoltaic generation system**. *IEEE Transactions on*

Applied Superconductivity, v. 23, p. 5000804, 2013.

KITARONKA, S. **Lead_Acid_Battery**. Institute of Sciences, Electrical and Electronics Engineering Department, Siirt University, 2022.

KOONDHAR, M. A. et al. Reviewing floating photovoltaic (FPV) technology for solar energy generation. **Energy Strategy Reviews**, v. 54, p. 101449, 2024.

KURNIAWAN, Ekki; RAHMAT, Basuki; MULYANA, Tatang; ALHILMAN, Judi. **Data analysis of Li-Ion and lead acid batteries discharge parameters with Simulink-MATLAB**. Fourth International Conference on Information and Communication Technologies (ICoICT), 2016. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9879046.

LARCO, D. O mercado brasileiro da energia eólica: impactos sociais e ambientais. **Revista Ambiente Água**, v. 12, n. 6, p. 1085–1096, 2017.

LEAD_ACID_BATTERY. Lead_Acid_Battery. Technical overview, 2022.
LI, M. Elevating the Practical Application of Sodium-Ion Batteries through Advanced Characterization Studies on Cathodes. **Energies**, v. 16, n. 8004, p. 1–23, 2023.

LI, X.; HUI, D.; LAI, X. Battery energy storage station (BESS) based smoothing control of photovoltaic (PV) and wind power generation fluctuations. ***IEEE Transactions on Sustainable Energy***, v. 4, p. 464-473, 2013.

LIMA, A. A. et al. Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 42, e20190191, 2020.

LIN, Zhangqi; et al. Recent advancements in lithium–sulfur batteries. **Materials Today**, v. 57, p. 50-68, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.09.012.

LIU, Yangtao; ZHANG, Ruihan; WANG, Jun; WANG, Yan. Current and future lithium-ion battery manufacturing. ***iScience***, v. 24, p. 102332, 2021. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.isci.2021.102332.

LUJANO-ROJAS, J. M. et al. **Comparison of Lead-Acid and Li-Ion Batteries Lifetime Prediction Models in Stand-Alone Photovoltaic Systems**. Applied Energy, 2016.

MACHIN, Esteban; et al. **Advanced anode materials for next-generation lithium-ion batteries**: Progress and prospects. Advanced Energy Materials, v. 13, n. 3, p. 2102219, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1002/aenm.202102219.

MARCOLIN, Giovanni Avila. **Modelagem de bancos de baterias para utilização em dispositivos de armazenamento de energia em sistemas elétricos**. 2021. Disponível em: https://lume.ufrgs.br/handle/10183/222474.

MARIANO, J. D.; URBANETZ, J. **Energia solar fotovoltaica**: princípios fundamentais. Curitiba: Atena Editora, 2022.

MATHWORKS. **Modeling Batteries Using Simulink and Simscape**. 2024. Disponível em: https://www.mathworks.com/videos/modeling-batteries-using-simulink-and-simscape-1562930245321.html.

MEIER, A. L.; YANG, F.; LI, X. Diesel-renewable hybrid systems: Transition to low-carbon energy. **Energy**, 2019.

MIRANDA, M. et al. Variabilidade e incertezas da geração eólica no Brasil. **Revista Ambiente Água**, v. 12, n. 6, p. 1084–1088, 2017.

MONTEIRO, L. S.; SILVEIRA, D. **Energia solar fotovoltaica no Brasil: uma análise das políticas públicas e das formas de financiamento**. UFF, 2022.

MOREIRA JÚNIOR, O.; SOUZA, C. C. de. Aproveitamento fotovoltaico: análise comparativa entre Brasil e Alemanha. **Revista Interações**, v. 21, n. 2, p. 379–387, 2020.

MOURA SOLAR**. Manual técnico: Moura Solar MS**. Versão 1.4. Recife: Acumuladores Moura S.A., 2021. Disponível em: https://www.moura.com.br.

MUNOZ, J. P.; LIMA, H. C. Desenvolvimento de uma formulação para massa de baterias chumbo. **Cadernos de Engenharia**, 2020.

NGUYEN, T. et al. Long-term performance of sodium-sulfur battery for utility energy storage applications. **Energies**, v. 11, n. 2252, p. 1–11, 2018.

NYKVIST, B.; NILSSON, M. Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles. ***Nature Climate Change***, v. 5, p. 329–332, 2015.

O'SHAUGHNESSY, E. et al. Too much of a good thing? Global trends in the curtailment of solar PV. ***Energy Policy***, 2020.

PANASONIC. NCR185650PF **Discharge Characteristics**. Disponível em: https://www.panasonic.com.

PAKSERESHT, Saeed; et al. Recent developments in high-capacity anode materials for lithium-ion batteries. **Electrochimica Acta**, v. 456, p. 120387, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.electacta.2022.120387.

PINISETTY, D. et al. Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes. Renewable and Sustainable **Energy Reviews**, 2023.

POONSUK, Jarernporn; PONGYUPINPANICH, **Surapong. Design and estimation of state-charging applied for lithium-ion battery based on Matlab-Simulink**. Management and Innovation Technology International Conference (MITiCON-2016), 2016. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7547856.

PORTAL SOLAR. Classificação e aplicações das turbinas eólicas no Brasil. **Portal Solar**, 2024. Disponível em: https://www.portalsolar.com.br.

POSSNER, A.; CALDEIRA, K. Geophysical potential for wind energy over the open oceans. **PNAS**, v. 114, n. 43, p. 11338–11343, 2017.

PREGER, Yuliya; TORRES-CASTRO, Loraine; MCDOWALL, Jim. **Lithium-ion**

batteries for grid energy storage applications. In: Handbook of Energy Storage. New York: Elsevier, 2021. p. 123-146. Disponível em: https://doi.org/10.1016/B978-0-12-819420-6.00007-1.

PRASAD, V. Failure analysis of lead-acid batteries at extreme operating temperatures. **Battery Energy**, 2023.

RADELES-MIRANDA, M. et al. Hybrid energy storage: Features, applications, and emerging trends. ***Renewable & Sustainable Energy Reviews***, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123010547.

RAMESH, R. et al. **Review of battery-supercapacitor hybrid energy storage systems**: Concepts, control strategies, and applications. *Results in Engineering*, 2024. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2590123024018413.

RIBEIRO, M. M. Influência da altitude e da densidade do ar na conversão eólica. **Revista Rease**, v. 9, n. 6, p. 2979–2982, 2017.

REIS, André; LIMA, Gabriel; SOUZA, Ricardo. **Machine learning approaches for lithium-ion battery state-of-health estimation**. Applied Energy, 2023. Disponível em: https://arxiv.org/abs/2112.02037.

REY, J. M.; et al. High-performance lithium-ion battery systems for electric vehicles. **Journal of Power Sources**, v. 548, p. 232113, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2023.232113.

RODRIGUES, J. R. F. et al. Transição energética e geração de energia solar fotovoltaica: revisão sistemática do panorama nacional e internacional. **Revista OKARA**: Geografia em Debate, v. 18, n. 1, p. 151–176, 2024.

ROSENTHAL, L. R. C. et al. Análises de efeitos externos sobre sistemas fotovoltaicos, tais como associação e sombreamento por meio do ATP. E-book: **A Importância da Energia Solar para o Desenvolvimento Sustentável**, Cap. 4, 2017.

SALDARINI, F.; LONGO, M. Enhanced safety measures in lithium-ion battery storage systems. **Batteries**, v. 9, n. 4, p. 411, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.3390/batteries9040411.

SANTOS, L. T.; DUTRA, R. M.; WANG, C. L. Comparação de vida útil entre bancos de baterias de íon-lítio e chumbo-ácido no contexto da compensação de energia com fotovoltaicos e tarifa branca. **Revista Brasileira de Energia Solar**, 2021.

SATO, H. Z. Market design and public policy for Battery Energy Storage System penetration: Case study Brazil. ***Journal of World Energy Law & Business***, v. 18, n. 1, 2025.

SAUAIA, E. E. **Projeção da energia solar fotovoltaica na matriz energética brasileira até 2040**. In: SANTOS, J. et al. (org.). A importância da energia solar para o desenvolvimento sustentável. Curitiba: CRV, 2019.

SCHMIDT, O. et al. The future cost of electrical energy storage based on experience rates. ***Joule***, v. 1, n. 1, p. 158–173, 2017.

SHI, Qitao; LU, Chen; CAO, Yutong; HAO, Yufeng; BACHMATIUK, Alicja; RÜMMELI, Mark H. Recent developments in current collectors for lithium metal anodes. ***Materials Chemistry Frontiers***, v. 7, p. 1298-1311, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1039/d3qm00029j.

SHIRGUPPE, Supanna; HUGAR, Basavaraj. Modeling and charge-discharge control of Li-ion battery using Simulink. **International Journal of Innovative Research in Technology (IJIRT)**, v. 9, n. 10, 2023. Disponível em: https://www.researchgate.net/publication/371005797.

SILVA, F. T. et al. Complementaridade entre energia eólica e regime hidrológico no Brasil. **Estudos Geográficos**, n. 15, p. 28–34, 2016.

SILVA, J. A. et al. **A influência da temperatura no desempenho de módulos fotovoltaicos**. E-book: A Importância da Energia Solar para o Desenvolvimento

Sustentável, Cap. 7, 2018.

SILVEIRA, L. A. et al. **Energy Storage Technologies towards Brazilian Electrical System**. *International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ)*, 2018.

SOLCIA, M. M.; LESSA, C. L. A. Estudo de protótipo de energia eólica em rodovias. RECIMA21 - **Revista Científica Multidisciplinar**, v. 5, n. 11, p. 1–13, 2024.

STA ELETRÔNICA. ***A promissora bateria de íons de sódio (Na-ion).*** São Paulo, 2023. Disponível em: https://www.sta-eletronica.com.br/artigos/baterias-recarregaveis/baterias-recarregaveis-em-geral/a-promissora-bateria-de-ions-de-sodio-na-ion.

SUO, L. et al. “Water-in-salt” electrolyte makes aqueous sodium-ion battery safe, green, and long-lasting. **Advanced Energy Materials**, v. 7, n. 1701189, 2017.

TAN, Rodney H. G.; TINAKARAN, Ganesh Kumar. **Development of battery energy storage system model in MATLAB/Simulink**. International Journal of Smart Grid and Clean Energy, 2020. Disponível em: https://doi.org/10.12720/sgce.9.1.180-188.

TELUB. **Turbinas Eólicas**. [S. l.]: Telub, 2022. Disponível em: https://www.telub.com.br/blog/artigos tecnicos/turbinas-eolicas.

TAYOURY, M. et al. **High Rate $Na_3NiZr(PO_4)_3$ Electrode Material for Sodium-ion Batteries**. IEEE, 2021.

THAKKAR, Rushali R.; RAO, Y. Srinivasa; SAWANT, Rajendra R. **Performance analysis of electrical equivalent circuit models of lithium-ion battery**. IEEE Pune Section International Conference (PuneCon), 2020. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/9362386.

THOMASI, V.; SILUK, J. C. M. **Tendências sobre sistemas híbridos de energia**. XLII Encontro Nacional de Engenharia de Produção, 2022.

TOWNSEND, A.; GOUWS, R. A. A Comparative Review of Lead-Acid, Lithium-Ion and Ultra-Capacitor Technologies and Their Degradation Mechanisms. **Energies**, 2022.

TULLO, A. H. Battery recyclers get the lead out. **Chemical & Engineering News**, 2018.

U.S. ENERGY INFORMATION ADMINISTRATION. **Trends and Expectations Surrounding the Outlook for Energy Markets**, 2020.

UFSC - UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. **Modelagem e simulação de baterias para sistemas de armazenamento de energia**. 2023. Disponível em: https://repositorio.ufsc.br/xmlui/bitstream/handle/123456789/243610/PFC_LS.pdf.

VAALMA, C. et al. A cost and resource analysis of sodium-ion batteries. **Nature Reviews Materials**, v. 3, n. 18013, 2018.

VALENCIANO, J. et al. Graphite and fiberglass additives for improving high-rate partial-state-of-charge cycle life of valve-regulated lead-acid batteries. **Journal of Power Sources**, 2006.

VELOSO, J. F. **Realidade e perspectivas da energia solar fotovoltaica em residências: revisão de literatura**. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria, 2022.

VERMAAK, H. J.; KUSAKANA, K. Design of a photovoltaic–wind charging station for small electric Tuk–tuk in D.R.Congo. ***Renewable Energy***, v. 67, p. 40-45, 2014.

VINS, M.; SIROVY, M. **Sodium-sulfur batteries for energy storage applications**. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICETA.2019.8917000.

WANG, Z. et al. Life Cycle Assessment (LCA)-based study of the lead-acid battery industry. **Journal of Cleaner Production**, 2022.

WU, X. et al. Aqueous Sodium-Ion Batteries: Progress and Perspectives. **Batteries**, v.

9, n. 349, p. 1–21, 2023.

XIANGYANG CITY et al. Analysis on the Optimal Recycling Path of Chinese Lead-Acid Battery under the Extended Producer Responsibility System. **Sustainability**, v. 14, p. 4950, 2022.

XIAO, L. et al. Low-defect and low-porosity hard carbon with high coulombic efficiency and high capacity for practical sodium ion battery anode. **Advanced Energy Materials**, v. 8, n. 1703238, 2018.

YANAMANDRA, K. et al. Impact of carbon additives on lead-acid battery electrodes. Renewable and Sustainable **Energy Reviews**, 2023.

YANG, F. et al. Hydrogen-based hybrid energy systems: Recent advancements and future directions. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2023.

YAO, Low Wen; AZIZ, J. A.; KONG, Pui Yee; IDRIS, N. R. N. **Modeling of lithium-ion battery using MATLAB/Simulink**. IEEE Conference, 2013. Disponível em: https://ieeexplore.ieee.org/document/7025184.

YUDHISTIRA, R. et al. A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. **Journal of Cleaner Production**, v. 358, p. 131999, 2022.

ZANOLETTI, Antonio; et al. Technological innovations in energy storage systems for grid stabilization. **Journal of Energy Storage**, v. 68, p. 105-123, 2024. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.est.2023.106789.

ZHANG, Wei; et al. Progress in hybrid energy storage systems combining lithium-ion batteries and supercapacitors. **Materials Today**, v. 57, p. 50-68, 2023. Disponível em: https://doi.org/10.1016/j.mattod.2022.09.012.

ZHOU, Q. et al. **Thermal stability of high power 26650-type cylindrical Na-ion batteries. Chinese Physics Letters**, v. 38, p. 076501, 2021.

ZHU, Z. et al. Comparative study of performance and hybrid battery configuration of sodium-ion and lithium-ion batteries. ***Journal of Energy Storage***, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2352152X25036175.

ZHU, Z. et al. Thermal runaway and propagation characteristics of sodium-ion and lithium-ion hybrid battery packs. ***Journal of Power Sources***, 2025. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0957582025009310.