



**SISTEMA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS (BESS) E INTEGRAÇÃO
DE FONTES RENOVÁVEIS: UMA ANÁLISE DE REVISÃO SISTEMÁTICA (2021-2025)
BATTERY ENERGY STORAGE SYSTEMS (BESS) AND RENEWABLE ENERGY
INTEGRATION: A SYSTEMATIC REVIEW (2021-2025)**

Autores: Hizadora Silva Lima¹, Lucas do Nascimento de Alencar¹, Fabiola Maria Alexandre Linard¹ e Bartolomeu Ferreira dos Santos Junior¹

¹Universidade Federal do Piauí (UFPI) – hizadora.lima@ufpi.edu.br, lucasnascimento23@ufpi.edu.br, fabiola.linard@ufpi.edu.br,
bartolomeuf@ufpi.edu.br

RESUMO

O artigo apresenta uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL) sobre Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) integrados a fontes renováveis, cobrindo o período de 2021 a 2025. A pesquisa mapeia as tecnologias, modelos e estratégias de controle com maior influência científica, destacando avanços em baterias de íons de lítio, baterias de fluxo e sistemas de segunda vida. A integração de BESS com a energia solar fotovoltaica e eólica é o foco principal, visando mitigar a intermitência dessas fontes. São avaliadas as arquiteturas de corrente alternada (AC), corrente contínua (DC) e híbridas, além dos serviços fundamentais que os BESS oferecem para a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico. Técnicas avançadas de controle, como Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) e Aprendizado por Reforço (RL), mostram evolução significativa em otimizar a operação. Avaliações tecnoeconômicas focam no Custo Nivelado de Armazenamento (LCOE) e Valor Presente Líquido (VPL). Destaca-se, também, a ascensão dos controladores Grid-Forming (GFM), essenciais em redes modernas para mitigar os desafios da crescente expansão de fontes renováveis, garantindo maior eficiência, sustentabilidade energética e resiliência da rede.

Palavras-chave: Sistemas de Armazenamento de Baterias; Integração de Fontes Renováveis; Revisão Sistemática da Literatura.

ABSTRACT

This article presents a Systematic Literature Review (SLR) on Battery Energy Storage Systems (BESS) integrated with renewable sources over the 2021–2025 period. The review maps technologies, modeling approaches, and control strategies with the greatest scientific influence, highlighting advances in lithium-ion, flow, and second-life batteries. The main focus is the integration of BESS with solar photovoltaics and wind power to mitigate intermittency. We assess alternating-current (AC), direct-current (DC), and hybrid architectures, as well as the key services BESS provide to enhance grid stability and reliability. Advanced control techniques, especially Model Predictive Control (MPC) and Reinforcement Learning (RL), show significant progress in optimizing operation. Techno-economic evaluations emphasize Levelized Cost metrics (LCOE/LCOS) and Net Present Value (NPV). Finally, the rise of grid-forming (GFM) converters stands out as a pivotal trend in modern power systems, helping to address challenges posed by the rapid expansion of renewable generation and strengthening overall efficiency, energy sustainability, and grid resilience.

Keywords: Battery Energy Storage Systems (BESS); Renewable Energy Integration; Systematic Literature Review.



1 INTRODUÇÃO

A crescente necessidade global de descarbonização e a rápida expansão das fontes renováveis intermitentes, como solar e eólica, impuseram novos desafios à estabilidade e confiabilidade das redes elétricas. Nesse contexto, os Sistemas de Armazenamento de Energia em Baterias (BESS) tornaram-se soluções essenciais para mitigar a intermitência, fornecer suporte dinâmico e otimizar o despacho energético (CHATZIGEORGIOU et al., 2024).

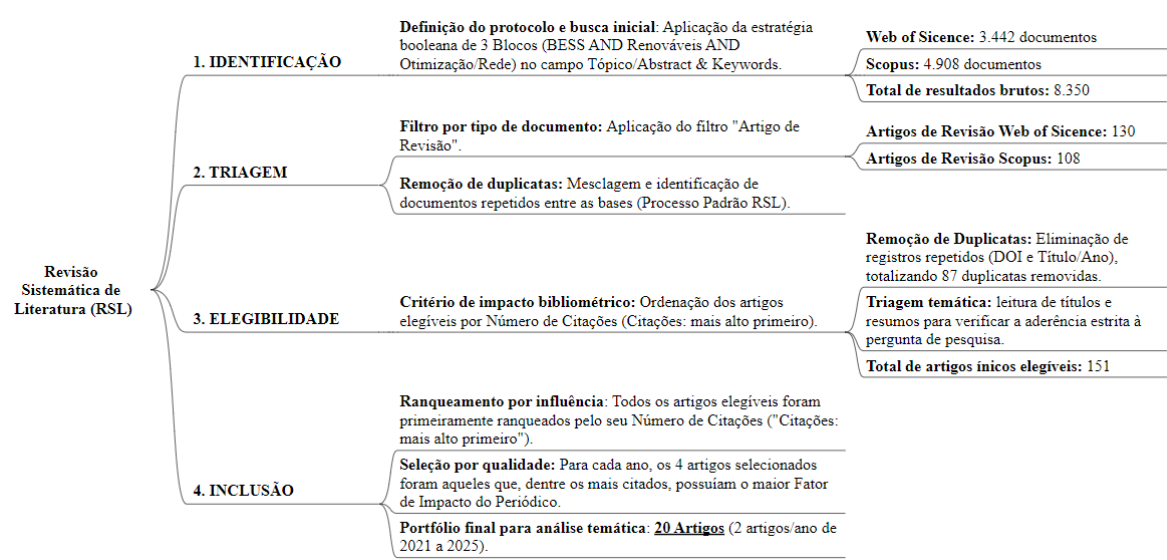
A viabilidade técnica e econômica dos BESS depende de avanços contínuos em sistemas de gestão e estratégias de controle (KANG et al., 2024). Recentes estudos mostram que, aliados a algoritmos avançados de previsão e controle adaptativo, os BESS reduzem custos operacionais, aumentam a confiabilidade dos sistemas e prolongam a vida útil das baterias, favorecendo a integração renovável (ZHAO et al., 2023).

A Revisão Sistemática de Literatura (RSL) é um método rigoroso, que assegura transparência, replicabilidade e imparcialidade na análise dos dados (BRITO et al., 2024). Neste trabalho, objetiva-se realizar uma RSL focada no período de 2021 a 2025 para mapear as tecnologias e tendências mais influentes, com ênfase no avanço das estratégias de otimização e na ascensão das tecnologias para suportar redes elétricas modernas.

2 METODOLOGIA

Esta RSL foi conduzida com o objetivo de identificar e sintetizar o conhecimento mais influente e atualizado sobre sistemas de armazenamento de energia em baterias integrados a fontes renováveis. O protocolo metodológico foi estruturado em quatro fases, conforme detalhado no fluxograma metodológico da Figura 1: Identificação, Triagem, Elegibilidade e Inclusão. A pesquisa foi delimitada a publicações no período de 2021 a 2025, em inglês e português, e com acesso ao texto completo. A busca foi realizada nas bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus, bem como em fontes com relevância internacional.

Figura 1 - Fluxograma metodológico da revisão 2021-2025.



Empregou-se uma estratégia de busca com combinações booleanas estruturadas em três blocos conceituais: objeto de estudo ("Battery Energy Storage" OR BESS OR "Sistema de Armazenamento de Energia em Baterias"), contexto tecnológico e



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

setorial ("renewable energy" OR "fonte renovável" OR "intermittent source" OR solar OR wind OR fotovoltaica OR eólica), e eixos de integração e operação (integration OR control OR optimization OR gerenciamento OR "energy management" OR "operação ótima"). Consultou-se os campos Tópico, Resumo e Palavras-chave. Na fase de identificação, obtiveram-se 8.350 registros brutos (3.442 na WoS e 4.908 na Scopus). Na triagem, aplicou-se o filtro "Artigo de Revisão" e removeram-se 87 duplicatas, conforme prática de RSL para manter a rastreabilidade. Na elegibilidade, 151 artigos únicos mostraram aderência ao tema. Diante do volume, o critério de inclusão foi ajustado para compor um portfólio focado em evidências de maior influência bibliométrica: os 151 artigos foram ranqueados por número de citações, selecionando-se os quatro mais citados de cada ano, o que resultou em 20 artigos no portfólio final. A extração de dados seguiu instrumento previamente padronizado (objetivos, metodologia, principais achados e conclusões), e a síntese foi conduzida por análise narrativa, posicionando as pesquisas mais citadas no contexto estratégico da integração BESS e renováveis.

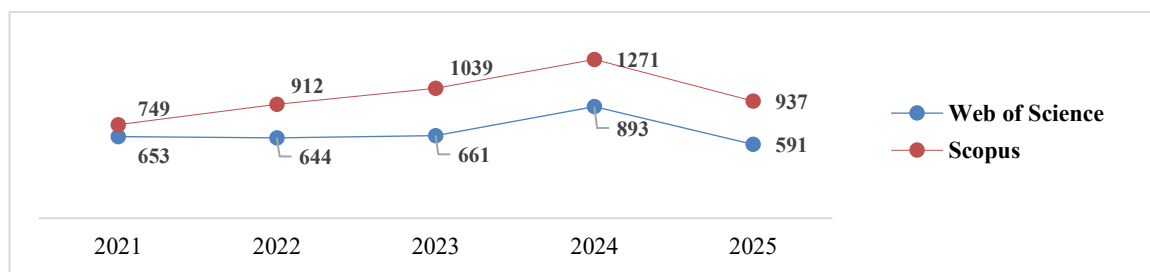
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A seguir, apresentam-se os principais resultados e suas respectivas discussões, organizados conforme os temas identificados na análise dos artigos selecionados.

3.1 Triagem bibliográfica

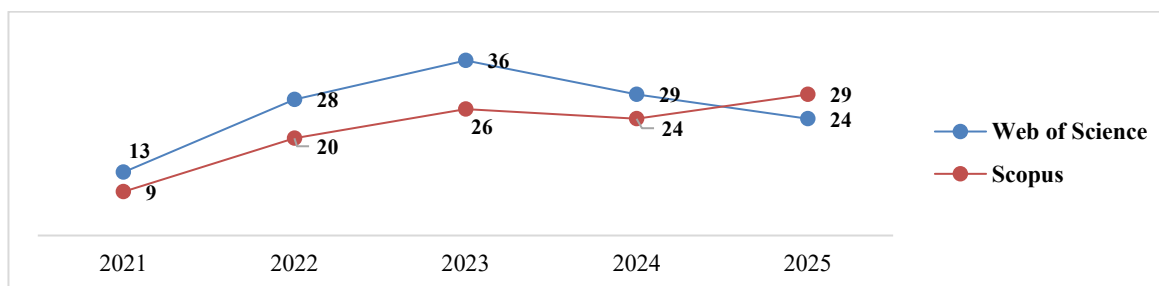
A triagem bibliográfica revela tendência de crescimento das publicações até 2024 e leve retração em 2025 no conjunto bruto, com predominância da base Scopus em todos os anos analisados, conforme a Figura 2.

Figura 2 - Evolução anual do conjunto bruto de publicações por base (WoS e Scopus).



Após a aplicação do filtro para artigos de revisão, a distribuição entre as bases torna-se mais equilibrada: a Web of Science atinge o pico em 2023, ao passo que a Scopus volta a prevalecer em 2025, conforme a Figura 3.

Figura 3 - Evolução anual após filtro "artigos de revisão" por base (WoS e Scopus).





3.2 Tecnologias de Baterias

A literatura converge para a dominância das baterias de íons de lítio (Li-ion) em aplicações de curta e média duração, devido à sua alta eficiência e maturidade tecnológica. A química LFP (Lítio-Ferro-Fosfato) é preferida no ambiente construído por oferecer segurança térmica e longa vida útil, enquanto o NMC/NCA proporciona maior densidade. O envelhecimento da Li-ion é crítico, dependendo do DoD (*Depth of Discharge*), C-rate, temperatura e janela de SoC (*State of Charge*) (AHMAD et al., 2025; COCCATO et al., 2025; NYAMATHULLA & DHANAMJAYULU, 2024).

As baterias de fluxo (VRFB - *Vanadium Redox Flow Battery*) se destacam, sendo tendência consistente entre 2021 e 2025, quando a duração e a ciclagem intensa são determinantes, beneficiando-se da separação entre potência e energia. O custo de CAPEX inicial é um obstáculo para as VRFB, variando tipicamente entre 500-800 \$/kWh (AHMAD et al., 2025; SAKIB et al., 2025). As baterias de segunda vida (SLB - *Second-Life Battery*) ganham relevância para armazenamento comunitário e atendimento a picos de demanda, o que requer triagem e processos padronizados de BMS (*Battery Management System*). A Tabela 1 apresenta as principais tecnologias de baterias utilizadas em sistemas BESS.

Tabela 1 - Tecnologias de baterias (Li-ion, VRFB, NaS, SLB)

Tecnologia	Eficiência ida-e-volta	Vida/ciclos	C-rate típico	Faixa T (°C)	Uso recomendado / Observações
Li-ion (LFP)	90-94%	Até 10.000 (perfil suave)	Moderado	15–35	Segurança e vida útil; ambientes construídos; serviços rápidos.
Li-ion (NMC/NCA)	95-98%	350-1.700 (depende do DoD)	Alto	15–35	Maior densidade energética; resposta rápida.
VRFB	75-85%	10.000-20.000	Baixo/Moderado	15–35	Durações maiores; alta ciclagem.
NaS	75-90%	Alto	Alto (300°C)	Load-leveling em grande porte.	Load-leveling em grande porte; longas durações; exige gestão de segurança térmica; alta taxa de rampa para regulação de potência.

3.3 Arquiteturas AC, DC ou híbridas

O acoplamento AC (*AC-coupled*) facilita o retrofit, a modularidade e a conexão direta à rede. Contudo, essa arquitetura impõe perdas adicionais e maior complexidade na coordenação de controle em Corrente Alternada (CA). Em contraste, o acoplamento DC (*DC-coupled*), ou a arquitetura híbrida AC/DC, é a mais frequente em sistemas *off-grid*, aparecendo em 81,58% dos estudos revisados sobre HRES (*Hybrid Renewable Energy Systems*) (GÓMEZ et al., 2023; AHMAD et al., 2025; SAKIB et al., 2025). Esta arquitetura proporciona melhor controle do barramento de contínua e maior flexibilidade operacional em plantas híbridas. Estratégias modulares como MMC (*Modular Multilevel Converters*) e CHB (*Cascaded H-Bridge*) são uma tendência crescente, desde 2024 a 2025, para elevar a confiabilidade e a qualidade de energia, permitindo o *bypass* de módulos e o balanceamento ativo (AHMAD et al., 2025). A Tabela 2 reúne as principais características, vantagens e desafios das arquiteturas AC, DC e híbridas.



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

Tabela 2 - Arquiteturas de acoplamento (vantagens, desafios e aplicações).

Arquitetura	Vantagens	Desafios	Aplicação
AC-coupled	Retrofit simples; modularidade; conexão direta à rede	Mais conversões; coordenação em CA; possíveis perdas maiores.	Modernização de plantas existentes; flexibilidade de integração.
DC-coupled	Menos conversões; melhor controle do barramento DC; captura de <i>clipping</i> ou <i>curtailment</i> .	Integração e controle de DC exigem projeto cuidadoso.	PV e BESS com curtailment ou clipping; plantas híbridas novas.
Híbrida AC/DC	Flexibilidade ampla; partilha de serviços; caminhos redundantes.	Maior complexidade de engenharia e controle.	HRES complexos; necessidade de serviços múltiplos simultâneos.

3.4 Serviços ao sistema elétrico

A importância dos serviços entregues pelo BESS evoluiu consistentemente no período de 2021 a 2025. O *peak shaving* (redução de pico) pode reduzir a demanda em até 10-25% em edifícios e comunidades. No eixo de estabilidade, o BESS mitiga a redução da inércia efetiva em sistemas com alta penetração de fontes intermitentes (COCCATO et al., 2025; RAZIF et al., 2024; PRAKASH et al., 2022). No eixo de confiabilidade, o suporte a redes fracas (caracterizadas por baixa inércia e alta impedância) por meio de controladores *grid-forming* (GFM) emerge como uma tendência crescente desde 2022 (SAKIB et al., 2025; RAZIF et al., 2024; LIU et al., 2022). A Tabela 3 resume os principais serviços oferecidos pelo BESS ao sistema elétrico.

Tabela 3 - Serviços ao sistema com BESS

Serviço	Objetivo	Requisitos-chave	Observações
FFR (Fast Frequency Response)	Estabilizar frequência pós-distúrbio.	Alta potência instantânea; controle rápido.	Tempo de subida; disponibilidade.
Suporte de tensão (Volt/VAR, Volt/Watt)	Manter perfil de tensão.	Capacidade reativa; coordenação com rede.	Faixa de tensão; THDv (<i>Total Harmonic Distortion of Voltage</i>); fator de potência.
Ride-through (LVRT/HVRT)	Permanecer conectado em afundamentos ou elevações.	Estratégia de controle conforme códigos.	Curvas LVRT/HVRT atendidas.
Black-start	Energizar trechos ilhados.	Capacidade de referência V/f; GFM.	Tempo até energização; sequência.
Operação ilhada	Sustentar microrredes.	GFM/VSG; controle V/f	Estabilidade de V/f; qualidade de onda.
<i>Smoothing</i> ou Limitação de rampa	Reduzir variabilidade.	Janela SoC; limites de rampa.	RMS da rampa.
Arbitragem de energia	Valorizar diferenças tarifárias.	Eficiência; perdas auxiliares.	LCOES; margem por ciclo.
VPP	Empilhar receitas e coordenar ativos.	Plataforma EMS/DR; telemetria.	Receita agregada.

3.5 Controle MPC, heurísticas ou RL

A gestão energética coexiste entre abordagens clássicas e adaptativas, evoluindo entre 2022 e 2025. O Controle Preditivo Baseado em Modelo (MPC) é uma tendência crescente, destacando-se por sua capacidade de gerenciar o BESS ao lidar com múltiplas restrições (como limites de SoC e taxa de rampa) e ao incorporar previsões em horizontes recentes, sendo adequado à coordenação de serviços de potência ativa e reativa (SIQUEIRA & PENG, 2021; PRAKASH et al., 2022; AHMAD et al., 2025; SAKIB et al., 2025). As meta-heurísticas, como por exemplo, Otimização de Enxame de Partículas (PSO) e Algoritmo Genético



(GA), são dominantes na otimização de dimensionamento do BESS e no despacho de energia, aparecendo em 46% dos estudos (TAHIR, 2024; GÓMEZ et al., 2023). Desde 2022, cresceu o interesse em Aprendizado por Reforço (RL) e abordagens híbridas, que permitem ao BESS aprender a tomar decisões ótimas de carga/descarga em tempo real sob incerteza para contornar ótimos locais (SAKIB et al., 2025; TAHIR, 2024; LIU et al., 2022). Para redes com baixa inércia, o desenvolvimento de controladores GFM e VSG (*Virtual Synchronous Generator*) é crucial, pois permitem ao BESS emular a inércia perdida e estabilizar a frequência e a tensão, sendo a dependência da monitorização da frequência uma lacuna identificada em 2022 (SAKIB et al., 2025; LIU et al., 2022).

3.6 Análise Tecnoeconômica

As avaliações tecnoeconômicas convergem para o uso do Custo Nivelado de Armazenamento (LCOES) e do Valor Presente Líquido (VPL), sendo o VPL o indicador dominante em 44,73% dos estudos sobre HRES (GÓMEZ et al., 2023; RAJAN et al., 2021). A viabilidade em rede depende do empilhamento de receitas (energia, capacidade e serviços ancilares). O desenvolvimento de VPPs é uma tendência desde 2022 para agregar baterias distribuídas e maximizar essa receita (COCCATO et al., 2025; RAZIF et al., 2024; LIU et al., 2022). O projeto *Hornsedale Power Reserve* (100 MW/129 MWh na Austrália) demonstrou retorno do investimento em pouco mais de 2 anos, principalmente pelo fornecimento de serviços de regulação de frequência (PRAKASH et al., 2022; RAZIF et al., 2024). A degradação é um vetor crítico do LCOES, e políticas operativas (janelas de SoC e limites de DoD) são essenciais para prolongar a vida útil (COCCATO et al., 2025; NKWANYANA et al., 2023; RAJAN et al., 2021).

4 CONCLUSÕES

A revisão sistemática destaca que os sistemas BESS são fundamentais para superar os desafios da integração de fontes renováveis intermitentes, fornecendo serviços essenciais ao sistema elétrico e ampliando a confiabilidade e eficiência operacional. As tecnologias e estratégias vinculadas ao controle adaptativo e ao suporte por controladores grid-forming se apresentam como tendências dominantes para viabilizar redes mais resilientes e sustentáveis. A avaliação técnica e econômica reforça a viabilidade e o retorno dos investimentos, com destaque para a importância da gestão avançada na longevidade e performance das baterias. Além disso, observa-se uma clara evolução temporal dos estudos entre 2021 e 2025, que reflete o crescimento e a maturação das tecnologias BESS integradas a fontes renováveis, acompanhando a expansão da demanda por soluções cada vez mais eficientes para a estabilidade e sustentabilidade das redes elétricas.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, A. B. et al. **State-of-charge balancing control of modular multilevel converter based battery energy storage system**. Journal of Engineering, v. 16, p. 779–783, 2020.
- ALMUTAIRI, K.; HOSSEINI DEHSHIRI, S. S.; HOSSEINI DEHSHIRI, S. J.; MOSTAFAYIPOR, A.; ISSAKHOV, A.; TEHATO, K. **Use of a hybrid wind-solar-diesel-battery energy system for buildings in remote area: A case study**. Sustainability, v. 13, p. 8764, 2021.



INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

- BRITO, Jean Carlos Borges; MARTINS, Dalton Lopes. **Revisão sistemática da literatura na Ciência da Informação: uma descrição detalhada dos passos metodológicos.** *InCID: R. Ci. Inf. e Doc.*, Ribeirão Preto, v. 14, n. 2, p. 24–47, set. 2023/fev. 2024. DOI: 10.11606/issn.2178-2075.v14i2p24-47
- CHAN, C.; MARWANGI, M. S.; RAZAK, A. M.; OTHER. **Recent progress in integrated battery management for energy storage systems.** *Energy Strategy Reviews*, v. 52, 2024.
- DATT, B. K. et al. **A review on battery energy storage system (BESS) applications and technologies.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 100, p. 12–42, 2023.
- HANNAN, M. A.; WALI, S. B.; KER, P. J.; ABD RAHMAN, M. S.; MANSOR, M.; RAMACHANDARAMURY, V. K.; MUTTAQI, K. M.; MAHLIA, T. M. I.; DONG, Z. Y. **Battery energy storage system: A review of technologies, optimization objectives, constraints, approaches and outstanding issues.** *Journal of Energy Storage*, v. 42, 2021.
- HIRA, T. **Optimization of energy storage systems for integration of renewable energy sources: A bibliometric analysis.** *Journal of Energy Storage*, v. 94, 2024.
- ISA, T.; SHUKE, H.; OTHERS. Cooperative and distributed control of battery energy storage systems for grid-scale applications: A review. *Energy Storage Journal*, v. 15, 2023.
- KIM, Y. et al. **Algorithms for efficient self-balancing control in modular battery systems.** *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, v. 20, p. 100-110, 2023.
- KUMAR, P.; JHA, S.; OTHERS. **A comprehensive review of energy management in hybrid renewable energy systems with battery storage.** *Energy Conversion and Management*, v. 256, 2022.
- LEN, J. C.; DE ALDACO, S. E.; AGUAYO, J. A. **A review of hybrid renewable energy systems architectures, battery systems, and optimization techniques.** *Eng.*, v. 4, 1446-1467, 2023.
- LI, Y. et al. **Comparative study of modular converter topologies for battery energy storage system applications.** *IEEE Journal of Emerging and Selected Topics in Power Electronics*, v. 12, 2023.
- LIMA, T. et al. **Optimal sizing and management of distributed battery energy storage systems for microgrids: A review.** *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 145, 2021.
- NKWAYANA, T. B. et al. **An assessment of hybrid-energy storage systems in the renewable environments.** *Journal of Energy Storage*, v. 72, 2023.
- RAZIF, A. S. M. et al. **Reactive power contribution of battery energy storage system for grid integration: A review.** *Journal of Energy Storage*, v. 128, 2025.
- RAZZAQ, S.; OTHERS. **Controller design for battery energy storage systems in smart grids: A review.** *IEEE Access*, v. 8, 14500-14515, 2022.
- SAGAR, S.; OTHERS. **State-of-charge estimation techniques for lithium-ion batteries: A review.** *Journal of Power Sources*, v. 514, 2022.
- TAHIR, H. **Optimization of energy storage systems for integration of renewable energy sources: A bibliometric analysis.** *Journal of Energy Storage*, v. 94, 2024.



Fortaleza, Ceará
Centro de Eventos do Ceará

INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON ENERGY

Optimizing renewable energy: advanced strategies for enhanced efficiency and sustainability

- WANG, Z. et al. **Dynamic modeling and control strategies for battery energy storage systems: A review**. IEEE Transactions on Power Electronics, v. 38, p. 10011-10026, 2023.
- WU, J.; OTHERS. **Advanced control schemes for battery energy storage systems in microgrids: A review**. Applied Energy, v. 325, 2022.
- YAN, B. et al. **Battery energy storage system technology and market trends: A comprehensive review**. Energy Reports, v. 15, p. 200-221, 2023.
- CHATZIGEORGIOU, Nikolas G.; THEOCHARIDES, Spyros; MAKRIDES, George; GEORGHIU, George E. **A review on battery energy storage systems: Applications, developments, and research trends of hybrid installations in the end-user sector**. *Journal of Energy Storage*, v. 86, p. 111192, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.est.2024.111192>.
- KANG, S.; JUNG, S.; LEE, D.; et al. **Optimal control strategies for energy storage systems for HUB substation considering multiple distribution networks**. *Scientific Reports*, v. 14, p. 20390, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68728-6>.
- ZHAO, C.; LIU, Y.; LIU, Z.; LIU, J.; LIU, Y. **Grid-connected battery energy storage system: A review on applications, optimization, and control**. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 179, p. 106535, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.106535>