

SISTEMAS DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM BATERIAS (BESS) NO CONTEXTO DAS CIDADES INTELIGENTES: UMA REVISÃO SISTEMÁTICA DA LITERATURA

INTRODUÇÃO

A disponibilidade de energia elétrica em qualidade e quantidade constitui um dos pilares para o desenvolvimento humano e é um requisito essencial para o crescimento econômico de países, estados e municípios. Nesse sentido, a segurança energética tem ocupado uma posição de destaque nas agendas de diferentes nações, permitindo que a energia elétrica seja fornecida de maneira confiável e acessível (ROCHA et al., 2022).

Apesar disso, ainda persiste o uso de fontes não renováveis, como as usinas termelétricas movidas a combustíveis fósseis, entre elas carvão, petróleo e gás natural (NOVIKAU, 2023). Contudo, diante do atual processo de descarbonização e da implementação da Agenda 2030 da Organização das Nações Unidas (ONU), que estabelece metas associadas aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), tais alternativas não se configuram como solução viável para atender à crescente demanda energética global, dado o impacto negativo que geram sobre o meio ambiente (ROCHA et al., 2022).

No contexto da Agenda 2030, torna-se imprescindível a busca por maior eficiência energética, entendida como o uso racional e otimizado da energia disponível para a realização de atividades e serviços, reduzindo perdas e desperdícios e, conseqüentemente, maximizando resultados (ALOLA; ADEBAYO; OLANIPEKUN, 2023). Associado a esse esforço, o processo de transição energética, compreendido como a substituição gradual da matriz baseada em fontes não renováveis pela geração de energia limpa, tem se intensificado. Esse movimento visa a descarbonização das atividades produtivas e a redução das emissões de gases de efeito estufa, diversificando a matriz energética com maior participação de fontes renováveis (MARKARD; ROSENBLOOM, 2022).

Entretanto, a expansão das fontes renováveis enfrenta barreiras significativas. Em muitos centros urbanos, consumidores sofrem com instabilidades no abastecimento, o que provoca prejuízos relevantes para indústrias, comércios e residências (MASSMANN; JÚNIOR, 2021). Entre os principais desafios estão a insuficiência das linhas de transmissão e distribuição, a infraestrutura obsoleta e a manutenção inadequada, fatores que comprometem a confiabilidade do sistema. A esse respeito, a Agência Internacional de Energia (IEA) aponta que a expansão da rede não acompanha a velocidade de crescimento da geração renovável, especialmente solar e eólica. Ademais, a morosidade na implantação de novas linhas contribui para desperdícios energéticos, atrasos em cronogramas de implementação e aumento potencial das emissões de CO₂, podendo chegar a 58 bilhões de toneladas até 2050 (IEA, 2023).

Diante desse cenário, diversas tecnologias têm sido testadas e aplicadas com o objetivo de aumentar a eficiência, a confiabilidade e a estabilidade da rede elétrica, bem como de responder aos desafios impostos pela crescente integração das fontes intermitentes (GUEDES FILHO et al., 2025). Entre essas soluções, os sistemas de armazenamento de energia em baterias, conhecidos como *Battery Energy Storage Systems* (BESS), têm emergido como protagonistas no processo de transição energética e como elementos estratégicos para a construção de um futuro sustentável (SALDARINI et al., 2023).

Os BESS possibilitam o armazenamento de energia em períodos de baixa demanda, com posterior utilização nos horários de pico, promovendo maior eficiência e gestão inteligente do consumo (HASSAN et al., 2023). Além disso, favorecem a integração de fontes renováveis, mitigando a intermitência característica da geração solar e eólica e assegurando maior confiabilidade ao fornecimento de energia (SALDARINI et al., 2023). Em paralelo, no âmbito regulatório, configuram-se como alternativa concreta para amenizar impactos como a oscilação tarifária e instabilidades do sistema elétrico.

Nesse contexto, este estudo busca responder à seguinte questão de pesquisa: Quais lacunas de conhecimento e direções futuras de pesquisa são evidenciadas na literatura recente sobre as aplicações de Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS)? Para tanto, o objetivo é analisar a produção científica recente sobre o tema, destacando os tópicos em evidência e identificando as lacunas capazes de orientar novas investigações. A fim de atingir esse propósito, foi realizada uma Revisão Sistemática da Literatura (RSL), na qual as lacunas foram organizadas segundo a temática, a metodologia empregada e as contribuições identificadas.

METODOLOGIA

A Revisão Sistemática da Literatura (RSL) é uma abordagem metodológica rigorosa e estruturada, empregada para mapear, avaliar e sintetizar as evidências disponíveis sobre uma questão específica, permitindo o avanço do conhecimento científico e o direcionamento de novas contribuições no campo de estudo (UCL LIBRARY GUIDES, 2024; OHIO STATE UNIVERSITY, 2024). O protocolo de RSL adotado neste trabalho foi delineado com base nas diretrizes propostas por Kitchenham e Charters (2007), Kraus et al. (2020) e Tranfield et al. (2003), com o propósito de minimizar possíveis vieses do pesquisador.

Os termos de busca foram inicialmente testados e validados nas bases de dados Web of Science (WoS) e Scopus. Os registros obtidos passaram por análise criteriosa, a fim de estabelecer o conjunto final de palavras-chave e suas combinações. Para a etapa conclusiva, foram utilizadas exclusivamente as palavras-chave e combinações mais adequadas, resultando na *string* de busca composta por: *Energy Storage, Batteries, Battery Energy Storage System, BESS, Renewable Energy, Battery Storage, Energy Storage Systems, Solar Energy, Wind Energy*. A busca, realizada em 14 de agosto de 2025, resultou na identificação de 361 estudos (Quadro 1).

Quadro 1: Expressão de busca usados nos bancos de dados

Base de dados	Expressão de busca	No. de artigos
Scopus	(TITLE-ABS-KEY ((("energy storage" AND batteries) OR ("battery energy storage systems" OR BESS))) AND TITLE-ABS-KEY (("renewable energy" AND ("battery storage" OR "energy storage systems")) AND ("solar energy" OR "wind energy")))	226
Web of Science (WoS)	("energy storage" AND batteries) OR ("battery energy storage systems" OR BESS) (All Fields) and ("renewable energy" AND ("battery storage" OR "energy storage systems") AND ("solar energy" OR "wind energy"))	135
Total:		361

Fonte: autores (2025)

Foram selecionados apenas artigos científicos publicados entre 2021 e 2025, sem restrição quanto às áreas do conhecimento. O protocolo metodológico adotado está detalhado no Quadro 2.

Quadro 2: Protocolo de pesquisa

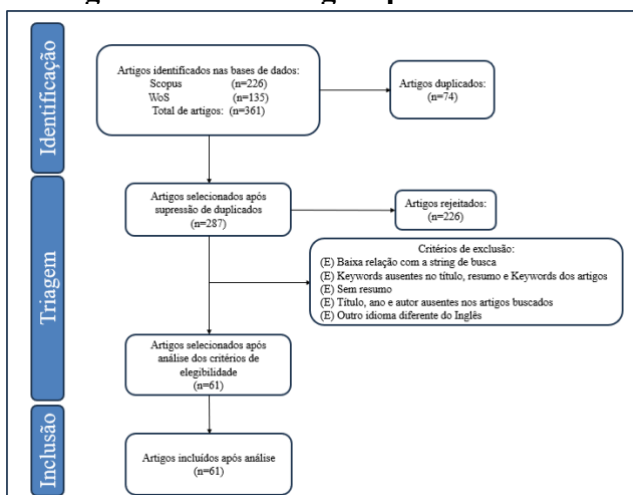
Protocolo de busca	Descrição
Base de dados	Scopus e Web of Science (WoS)
Tipo de publicação	Artigos
Idioma	Inglês
Período	2021 a 2025
Área	Sem restrição
Tópico	Título, resumo e palavras-chave

Termos de busca	("energy storage" AND batteries) OR ("battery energy storage systems" OR BESS) (All Fields) and ("renewable energy" AND ("battery storage" OR "energy storage systems") AND ("solar energy" OR "wind energy"))
-----------------	--

Fonte: autores (2025)

Para gerenciar as informações e assegurar precisão na seleção, utilizou-se a ferramenta *State of the Art through Systematic Review* (StArt). Inicialmente, 361 artigos foram identificados nas bases *Scopus* e *Web of Science*. Após a exclusão de 74 duplicados e aplicação dos critérios de inclusão (relação com BESS e eficiência energética, artigos em inglês) e exclusão (baixa relação com a *string*, ausência de resumo, título ou autores, idioma diferente do inglês), restaram 61 artigos. A seleção foi refinada por meio de um sistema de pontuação: 5 pontos por palavra-chave no título, 3 no resumo e 2 nas *keywords*, sendo rejeitados os trabalhos com até 50 pontos. Por fim, os 61 artigos foram lidos integralmente e categorizados segundo o protocolo estabelecido, seguindo as diretrizes de Tranfield et al. (2003), como ilustrado na Figura 1.

Figura 1: Metodologia aplicada na RSL

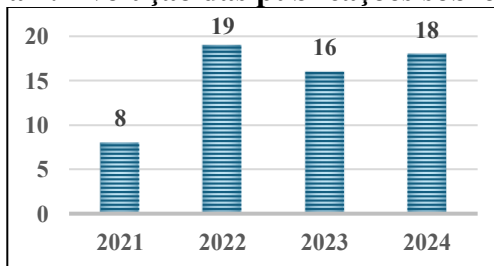


Fonte: autores (2025)

RESULTADOS

Foram considerados apenas artigos publicados entre 2021 e 2025, período marcado pela evolução tecnológica e funcional do objeto de estudo. A Figura 2 apresenta a distribuição anual das 61 publicações selecionadas. Observa-se um aumento expressivo entre 2021 e 2022, com crescimento superior a 100%. Nos anos de 2023 e 2024, o volume de publicações manteve-se estável em relação a 2022. Já em 2025, embora a *string* de busca tenha recuperado registros, nenhum artigo atendeu aos critérios de inclusão da amostra.

Figura 2: Evolução das publicações sobre BESS

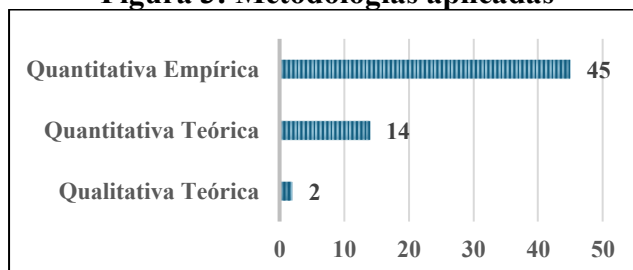


Fonte: autores (2025)

Análise metodológica dos artigos

No que se refere ao método de pesquisa, entre os 61 artigos analisados, 45 adotaram abordagens empíricas, enquanto 16 se fundamentaram em perspectivas teóricas. Em relação à natureza metodológica, observa-se na Figura 3 o predomínio expressivo da pesquisa quantitativa, presente em 59 artigos, ao passo que apenas 2 trabalhos foram classificados como qualitativos.

Figura 3: Metodologias aplicadas



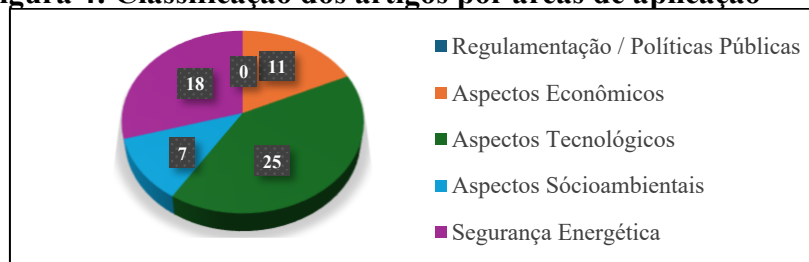
Fonte: autores (2025)

Verifica-se a predominância de estudos com metodologia quantitativa empírica (74%), conduzidos em ambientes de laboratório, sob condições controladas e reproduzíveis, ou a partir da análise de dados operacionais de sistemas de armazenamento de energia em funcionamento, com apoio de sistemas de monitoramento. A metodologia quantitativa teórica corresponde a 23% da amostra, com artigos que empregam modelos matemáticos e softwares para prever e analisar a eficiência do BESS em diferentes condições e cenários. Por fim, apenas dois estudos foram classificados como qualitativos teóricos, de caráter exploratório, destacando os benefícios do BESS para a eficiência energética.

Análise da categorização dos artigos

Com o objetivo de identificar as principais áreas de aplicação do BESS, os artigos selecionados foram submetidos a análise detalhada e posteriormente classificados em seis categorias: Aspectos Tecnológicos (25 artigos), Segurança Energética (18 artigos), Aspectos Econômicos (11 artigos), Aspectos Socioambientais (7 artigos) e Regulamentação/Políticas Públicas (0 artigos). Estas categorias compreendem os campos de estudos mais importantes que promovem o desenvolvimento desta tecnologia, da sustentabilidade e da eficiência energética.

Figura 4: Classificação dos artigos por áreas de aplicação



Fonte: autores (2025)

A regulamentação e as políticas públicas voltadas ao BESS compreendem o arcabouço normativo e estratégico necessário para habilitar o pleno potencial desses sistemas, assegurando simultaneamente segurança, confiabilidade, sustentabilidade e equidade econômica. Seu propósito central é estabelecer um ambiente estável e previsível que estimule investimentos privados (FAN et al., 2021), incentive a inovação tecnológica, garanta a proteção da população e contribua para a modernização e descarbonização do setor energético.

Os **aspectos econômicos** do BESS envolvem a avaliação financeira que fundamenta o investimento e a operação desses sistemas. Essa análise considera indicadores como retorno sobre o investimento (ROI), tempo de retorno (*payback period*) e lucratividade (ZAKERI et al., 2021), além de fatores como dinâmicas do mercado de energia, políticas tarifárias e o potencial de valorização dos múltiplos serviços oferecidos pelos sistemas de armazenamento.

Os **aspectos tecnológicos** evidenciam a rápida evolução em químicas de baterias (LI et al., 2023), dos sistemas de gerenciamento (BMS e EMS) e da eletrônica de potência, os quais elevam a densidade energética, prolongam a vida útil e aprimoram a segurança e a eficiência dos sistemas. Tais progressos são essenciais para que os BESS desempenhem uma ampla gama de funções.

Os **aspectos socioeconômicos** são impulsionados pelos BESS), uma vez que facilitam a integração de fontes renováveis, reduzem as emissões de gases de efeito estufa (GEE) e o uso de combustíveis fósseis, contribuem para a mitigação das mudanças climáticas e promovem tanto o acesso à energia quanto o desenvolvimento local (PANG et al., 2021). Entretanto, para que tais benefícios se concretizem plenamente, é essencial gerenciar eticamente a extração de matérias-primas e implementar sistemas eficazes de reciclagem que fortaleçam a economia circular.

A **segurança energética**, no contexto do BESS, é fortalecida pela capacidade desses sistemas de ampliar a flexibilidade e a resiliência do sistema elétrico (LAUGS et al., 2024). Esses sistemas garantem maior confiabilidade da rede, integram fontes renováveis, reduzem a dependência externa, otimizam a infraestrutura existente e respondem rapidamente às variações de demanda. Assim, contribuem para um suprimento de energia mais estável, flexível e resistente a distúrbios, assegurando disponibilidade no tempo e no local necessários.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os Sistemas de Armazenamento de Energia por Baterias (BESS) consolidaram-se como componentes estratégicos da transição energética global, impulsionada pelo processo de descarbonização e pela necessidade de maior resiliência. Sua relevância decorre da rápida evolução tecnológica, que aprimora desempenho e segurança; da crescente viabilidade econômica, que fortalece a atratividade dos investimentos; e da contribuição socioambiental, que facilita a integração de fontes renováveis, reduz emissões e amplia o acesso à energia. Além disso, os BESS desempenham papel central para a segurança energética, conferindo flexibilidade, estabilidade e confiabilidade à rede elétrica.

A análise dos artigos evidencia a predominância de estudos voltados a aspectos tecnológicos e de segurança energética, seguidos por questões econômicas e socioambientais. Esses resultados indicam avanços na compreensão do desempenho, da confiabilidade e da viabilidade financeira da tecnologia, bem como de seus impactos ambientais e sociais. Contudo, a ausência de pesquisas sobre regulamentação e políticas públicas revela uma lacuna, cuja superação é indispensável para consolidar um ambiente institucional capaz de estimular investimentos, fomentar a inovação e ampliar a adoção dos BESS em larga escala.

Apesar das contribuições, este estudo apresenta limitações, como a restrição às bases *Scopus* e *Web of Science*, o que pode ter excluído publicações relevantes, além da possibilidade de que a escolha dos termos de busca e seus sinônimos não tenha capturado a totalidade da produção científica existente. Diante disso, recomenda-se que investigações futuras priorizem a proposição de modelos regulatórios inovadores, políticas públicas eficazes e mecanismos de mercado que permitam explorar integralmente o potencial dos BESS. Estratégias que assegurem remuneração adequada dos serviços, simplifiquem processos de licenciamento, estabeleçam padrões de segurança e incorporem princípios da economia circular às baterias mostram-se fundamentais. Avançar nesse campo é decisivo para transpor barreiras, atrair

investimentos e acelerar a transição energética rumo a um sistema seguro, eficiente e verdadeiramente sustentável.

REFERÊNCIAS

ALOLA, A. A.; ADEBAYO, T. S.; OLANIPEKUN, I. O. Examining the Energy Efficiency and Economic Growth Potential in the World Energy Trilemma Countries. *Energies*, Basel, v. 16, n. 4, 2023. DOI: 10.3390/en16042036.

FAN, F. et al. Sizing and coordination strategies of battery energy storage system co-located with wind farm: The uk perspective. *Energies*, Basel, v. 14, n. 5, 2021. DOI: 10.3390/en14051439.

GUEDES FILHO, D. F. et al. Optimization and Integration Strategies for Hybrid Renewable Energy Systems in the Brazilian Power Grid: A Systematic Review. *IEEE Access*, Piscataway, v. 13, p. 84170–84187, 2025. DOI: 10.1109/ACCESS.2025.3569199.

HASSAN, Q. et al. A review of hybrid renewable energy systems: Solar and wind-powered solutions: Challenges, opportunities, and policy implications. *Results in Engineering*, Amsterdam, v. 20, 2023. DOI: 10.1016/j.rineng.2023.101621.

KITCHENHAM, B.; CHARTERS, S. Diretrizes para realizar revisões sistemáticas da literatura em engenharia de software | BibSonomy. 2007. Disponível em: <<https://shre.ink/UULO>>.

KRAUS, S.; BREIER, M.; DASÍ-RODRÍGUEZ, S. A Arte de Elaborar uma Revisão Sistemática da Literatura em Pesquisa de Empreendedorismo. *International Entrepreneurship and Management Journal*, v. 16, n. 3, p. 1023–1042, 2020.

LAUGS, G. A. H.; BENDERS, R. M. J.; MOLL, H. C. Maximizing self-sufficiency and minimizing grid interaction: Combining electric and molecular energy storage for decentralized balancing of variable renewable energy in local energy systems. *Renewable Energy*, Oxford, v. 229, 2024. DOI: 10.1016/j.renene.2024.120703.

LI, J. et al. Bi-Level Optimizing Model for Microgrids With Fast Lithium Battery Energy Storage Considering Degradation Effect. *IEEE Access*, Piscataway, v. 11, p. 34643–34658, 2023. DOI: 10.1109/ACCESS.2023.3264563.

MARKARD, J.; ROSENBLOOM, D. Phases of the net-zero energy transition and strategies to achieve it. In: *ROUTLEDGE HANDBOOK OF ENERGY TRANSITIONS*. [S. l.]: Routledge, 2022. p. 102–103. DOI: 10.4324/9781003183020-8.

MARRASSO, E.; ROSELLI, C.; SASSO, M. Electric efficiency indicators and carbon dioxide emission factors for power generation by fossil and renewable energy sources on hourly basis. *Energy Conversion and Management*, Oxford, v. 196, p. 1369–1384, 2019. DOI: 10.1016/j.enconman.2019.06.079.

NOVIKAU, A. Energy Security in Security Studies: A Systematic Review of Twenty Years of Literature. *Central European Journal of International and Security Studies*, Prague, v. 17, n. 3, p. 34–64, 2023. DOI: 10.51870/PDDC2102.

PANG, N.; MENG, Q.; NAN, M. Multi-Criteria Evaluation and Selection of Renewable Energy Battery Energy Storage System-A Case Study of Tibet, China. *IEEE Access*, Piscataway, v. 9, p. 119857–119870, 2021. DOI: 10.1109/ACCESS.2021.3107192.

ROCHA, L. C. S. et al. Utility-scale energy storage systems: World condition and Brazilian perspectives. *Journal of Energy Storage*, Amsterdam, v. 52, 2022. DOI: 10.1016/j.est.2022.105066.

SALDARINI, A. et al. Battery Electric Storage Systems: Advances, Challenges, and Market Trends. *Energies*, Basel, v. 16, n. 22, 2023. DOI: 10.3390/en16227566.

TRANFIELD, D.; DENYER, D.; SMART, P. Rumo a uma Metodologia para Desenvolver Conhecimento de Gestão Informado por Evidências por Meio de Revisão Sistemática. *British Journal of Management*, v. 14, n. 3, p. 207–222, 2003.

ZAKERI, B. et al. Centralized vs. Distributed energy storage – Benefits for residential users. *Energy*, Oxford, v. 236, art. 121443, 2021. DOI: 10.1016/j.energy.2021.121443.