



Mitigação do *curtailment* no sistema elétrico brasileiro: armazenamento em baterias, flexibilidade da demanda e novos modelos energéticos

Mitigation of curtailment in the brazilian power system: battery energy storage, demand flexibility, and emerging energy models

Eduardo Jorge Amorim da Silva¹, Rafael Santos Freire Ferraz^{2,*}

¹ Aluno do curso Tecnologia em Energias Renováveis, Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina, PI, Brasil

² Professor do curso Tecnologia em Energias Renováveis, Universidade Federal do Piauí – UFPI, Teresina, PI, Brasil

*Autor para correspondência, E-mail: rafael.ferraz@ufpi.edu.br

Received: 16 June 2028 | Accepted: 31 August 2026 | Published online: 02 September 2026

Resumo: O crescimento acelerado da geração eólica e solar no Brasil tem ampliado os desafios operacionais associados à integração de fontes renováveis intermitentes no sistema elétrico, especialmente em relação ao fenômeno do *curtailment*. Nesse contexto, o presente trabalho teve como objetivo analisar os desafios operacionais e estruturais relacionados ao *curtailment* de energia eólica e solar no sistema elétrico brasileiro, avaliando o papel dos sistemas de armazenamento em baterias (BESS), das estratégias de flexibilidade da demanda e dos modelos emergentes do sistema elétrico como alternativas para mitigação desse fenômeno. O estudo fundamenta-se nos conceitos de integração de energias renováveis, *curtailment*, sistemas BESS, resposta à demanda, usinas virtuais de energia (VPPs), comunidades energéticas e microrredes. Metodologicamente, foi realizada uma revisão integrativa da literatura, de natureza qualitativa e exploratória, baseada na estratégia PCC (População, Conceito e Contexto), utilizando trabalhos acadêmicos e relatórios institucionais publicados entre janeiro de 2008 e abril de 2026. Os resultados evidenciaram que o *curtailment* está diretamente associado às limitações estruturais da transmissão, à intermitência das fontes renováveis e à baixa flexibilidade do sistema elétrico. Além disso, os estudos analisados demonstraram que os BESS contribuem para o armazenamento de excedentes energéticos, melhoria da estabilidade da rede e mitigação de congestionamentos, enquanto estratégias de flexibilidade da demanda e modelos emergentes do sistema elétrico ampliam a capacidade de integração de recursos energéticos distribuídos e reduzem desperdícios energéticos. Dessa forma, conclui-se que a mitigação do *curtailment* depende da adoção de soluções integradas e da ampliação da flexibilidade operacional do sistema elétrico brasileiro.

Palavras-chave: comunidades energéticas; *curtailment*; flexibilidade da demanda; sistema de armazenamento de energia.

Abstract: The rapid growth of wind and solar power generation in Brazil has intensified the operational challenges associated with integrating intermittent renewable energy sources into the power system, particularly regarding the curtailment phenomenon. In this context, this study aimed to analyze the operational and structural challenges related to wind and solar energy curtailment in the Brazilian power system, evaluating the role of Battery Energy Storage Systems (BESS), demand flexibility strategies, and emerging energy system models as alternatives to mitigate this phenomenon. The study is based on the concepts of renewable energy integration, curtailment, BESS, demand response, Virtual Power Plants (VPPs), energy communities, and microgrids. Methodologically, an integrative literature review was conducted using a qualitative and exploratory approach, based on the PCC (Population, Concept, and Context) framework, considering academic studies and institutional reports published between January 2008 and April 2026. The results showed that curtailment is directly associated with transmission infrastructure constraints, the intermittency of renewable energy sources, and the limited flexibility of the power system. Furthermore, the analyzed studies demonstrated that BESS contribute to the storage of surplus energy, improved grid stability, and congestion mitigation, while demand flexibility strategies and emerging energy system models enhance the integration capacity of distributed energy resources and

reduce energy waste. Therefore, it is concluded that curtailment mitigation depends on the adoption of integrated solutions and the expansion of the operational flexibility of the Brazilian power system.

Keywords: curtailment; demand flexibility; energy communities; energy storage system.

1 Introdução

Nos últimos anos, o setor elétrico brasileiro tem passado por profundas transformações, impulsionadas principalmente pelo crescimento expressivo das fontes renováveis de energia, com destaque para a geração eólica e solar fotovoltaica. Esse movimento está alinhado aos compromissos globais de descarbonização, à diversificação da matriz energética e à ampliação da segurança energética, consolidando o Brasil como uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, segundo a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025a). De acordo com o Balanço Energético Nacional (BEN), o país vem ampliando significativamente sua capacidade instalada de geração renovável, especialmente nas regiões Nordeste e Sudeste, o que tem contribuído para o aumento da participação dessas fontes na matriz elétrica nacional (EPE, 2025a).

Em escala global, esse processo ocorre de forma ainda mais acelerada. Segundo a *International Energy Agency* (IEA, 2026), o crescimento das fontes renováveis tem desempenhado papel central na expansão da oferta energética mundial, sendo responsável por parcela significativa do aumento da demanda energética recente. O relatório *Global Energy Review 2026* indica que as fontes de baixa emissão, incluindo solar, eólica e nuclear, responderam por aproximadamente 60% do crescimento da demanda global de energia em 2025, com destaque para a energia solar fotovoltaica, que sozinha contribuiu com mais de 25% desse crescimento. Além disso, o relatório evidencia que a demanda por eletricidade cresce em ritmo superior ao consumo energético total, caracterizando o atual momento como a chamada “Era da Eletricidade”. Esse fenômeno é impulsionado pela eletrificação dos transportes, pela digitalização da economia e pelo aumento do consumo em setores como data centers e edificações, reforçando a necessidade de adaptação estrutural dos sistemas elétricos em escala global (IEA, 2026).

A inserção acelerada de fontes renováveis intermitentes altera significativamente a dinâmica de operação do sistema elétrico, uma vez que essas fontes dependem de condições naturais não controláveis, como vento e irradiação solar (IEA, 2023). Diferentemente das fontes convencionais, que permitem controle direto da geração, as energias eólica e solar apresentam comportamento intermitente, dificultando o balanceamento entre oferta e demanda em tempo real. Esse cenário exige maior flexibilidade operacional e a adoção de novas estratégias de planejamento e controle para garantir a confiabilidade do sistema elétrico (Lund et al., 2017; Fang et al., 2012).

Nesse contexto, destaca-se o fenômeno do corte de geração, também denominado restrição de geração e conhecido internacionalmente como *curtailment*, caracterizado pela redução intencional da geração de energia renovável disponível em decorrência da incapacidade do sistema elétrico de absorver toda a energia produzida. Esse fenômeno ocorre principalmente devido às limitações na infraestrutura de transmissão, restrições operacionais e descompasso entre a oferta de energia e a demanda instantânea (ONS, 2025; Lopes et al., 2024). Além disso, a variabilidade da geração renovável e os desafios associados à operação do sistema contribuem para a intensificação desse problema, tornando-o um dos principais entraves à expansão sustentável das fontes renováveis (Costa et al., 2024).

Adicionalmente, evidências de estudos internacionais indicam que, apesar do crescimento expressivo das fontes renováveis, os sistemas elétricos ainda enfrentam limitações estruturais relevantes (IEA, 2026; Lund et al., 2017). O aumento da participação de fontes intermitentes tem ampliado a necessidade de mecanismos de flexibilidade, como armazenamento de energia e capacidade despachável, evidenciando desafios operacionais associados à integração dessas tecnologias. No Brasil, evidências recentes indicam que o crescimento da geração renovável não tem sido acompanhado, na mesma proporção, pela expansão da infraestrutura de transmissão e pela adoção de mecanismos de flexibilidade, o que resulta em perdas energéticas significativas e impactos econômicos relevantes, como pode ser observado na Tabela 1. Estudos apontam que o planejamento inadequado da expansão do sistema e a crescente penetração da geração distribuída podem agravar ainda mais esse cenário, reforçando o caráter estrutural do *curtailment* no contexto da transição energética (EPE, 2025; Lopes et al., 2024).

Outrossim, observa-se que os desafios relacionados ao *curtailment* e à integração de fontes renováveis têm sido amplamente reportados em fontes institucionais e na mídia especializada, evidenciando a atualidade e relevância do tema. Esses registros apontam para impactos econômicos expressivos, limitações estruturais do sistema elétrico e a crescente necessidade de adoção de soluções baseadas em armazenamento de energia e mecanismos de flexibilidade. Nesse contexto, a Tabela 1 apresenta uma síntese de notícias recentes que evidenciam a ocorrência do *curtailment* no Brasil, bem como seus desdobramentos técnicos,

econômicos e regulatórios, reforçando a importância de abordagens integradas para o enfrentamento desse problema.

Tabela 1. Síntese de evidências recentes (2026) sobre curtailment, armazenamento de energia e contexto energético.

Autor (Ano)	Tema	Principais pontos	Contribuições para a pesquisa
ATESS Power (2026)	Expansão do BESS nas Américas	Crescimento das renováveis exige maior flexibilidade; BESS atua em <i>peak shaving</i> , arbitragem e suporte à rede; desafios operacionais como instabilidade de tensão e limitações de infraestrutura	Evidencia a necessidade de armazenamento para mitigar desequilíbrios operacionais e reduzir o <i>curtailment</i>
Hein (2026)	Impactos econômicos do <i>curtailment</i> no Brasil	Cortes de geração eólica e solar; perdas de receita; suspensão de investimentos; incerteza regulatória	Demonstra que o <i>curtailment</i> já produz impactos econômicos e afeta a expansão do setor
ANEEL (2026)	Implementação de BESS no Brasil	Primeira unidade de armazenamento vinculada a usina; avanço regulatório; aplicação prática	Evidencia a consolidação do BESS como solução viável
Barros (2026)	Aproveitamento solar e ausência de armazenamento	Baixo aproveitamento do potencial solar; ausência de políticas; comparação internacional	Reforça a relação entre desperdício energético e ausência de BESS
Rigamonti (2026)	Impactos globais da crise energética	Alta do petróleo; aumento do GNL; risco inflacionário	Contextualiza a vulnerabilidade energética global
Daza (2026)	Impactos da crise energética no Brasil	Dependência de diesel; aumento de custos; impacto sistêmico	Evidencia fragilidade estrutural
Miranda (2026)	Consolidação regulatória do <i>curtailment</i>	Impacto econômico; restrições de transmissão; judicialização	Mostra que o problema é estrutural
Figueiredo (2026)	VPPs e flexibilidade	Integração de geração, baterias e cargas; papel do agregador	Apresenta solução avançada
Thompson (2026)	Expansão do mercado de BESS	Leilões; crescimento; funções técnicas	Evidencia papel estratégico do BESS
Garfinkel (2026)	Leilão de capacidade e custos	Predomínio térmico; custos elevados; impacto tarifário	Mostra falta de flexibilidade

Diante desse cenário, os sistemas de armazenamento de energia em baterias (*Battery Energy Storage Systems* – BESS) surgem como uma das principais soluções tecnológicas para mitigar os efeitos do *curtailment*. Esses sistemas permitem armazenar excedentes energéticos gerados em períodos de alta produção e baixa demanda, disponibilizando essa energia em momentos mais adequados do ponto de vista operacional e econômico (Bhatnagar et al., 2016). Além disso, o uso de BESS contribui para a melhoria da estabilidade da rede, redução de perdas e otimização do fluxo de potência, conforme evidenciado em estudos recentes (Queiroz, 2025; Silva, 2025; MME; GIZ, 2025). Dados recentes indicam que os sistemas de armazenamento em baterias têm apresentado crescimento acelerado em escala global, reforçando seu papel estratégico na integração de fontes renováveis (IEA, 2026).

Paralelamente, estratégias de flexibilidade da demanda têm ganhado destaque como mecanismos complementares na gestão do sistema elétrico. A resposta à demanda (*demand response*) permite ajustar o consumo de energia em função da disponibilidade de geração, deslocando cargas para períodos de maior oferta renovável e contribuindo para o equilíbrio entre oferta e demanda (IEA, 2023; Albadi; El-Saadany, 2008). Além disso, o uso de cargas flexíveis, como data centers e processos industriais, possibilita absorver excedentes energéticos e reduzir a necessidade de corte de geração (IEA, 2022; Uddin et al., 2018).

Além das soluções baseadas em armazenamento e flexibilidade da demanda, observa-se o surgimento de novos modelos operacionais e estruturais no sistema elétrico, impulsionados pela digitalização, descentralização e integração de tecnologias. Entre esses modelos, destacam-se as usinas virtuais de energia (*Virtual Power Plants* – VPPs), que agregam diferentes recursos energéticos distribuídos — como geração, armazenamento e cargas — permitindo sua operação coordenada e participação em mercados de energia (Naval; Yusta, 2021; Figueiredo, 2026).

Outro modelo emergente de grande relevância é o das Comunidades Energéticas (CEs), que representam uma abordagem inovadora baseada na geração, compartilhamento e gestão local de energia. Nesse modelo, consumidores passam a atuar também como produtores (prosumidores), participando

ativamente da operação do sistema elétrico. De acordo com a Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2025), as CEs possibilitam maior autonomia, eficiência e democratização do acesso à energia, além de contribuírem para a redução de perdas e para o melhor aproveitamento da geração renovável.

Ademais, as microrredes e os mercados de flexibilidade representam avanços importantes na evolução do sistema elétrico. As microrredes permitem a operação local e descentralizada da rede, aumentando a resiliência e reduzindo a dependência da infraestrutura centralizada (Mosetlhe et al., 2025). Já os mercados de flexibilidade possibilitam a valorização econômica da flexibilidade energética, permitindo que recursos distribuídos participem da operação do sistema e contribuam para a redução de congestionamentos e otimização do uso da infraestrutura existente (Scrocca et al., 2026).

Dessa forma, observa-se uma transição do modelo tradicional de sistema elétrico centralizado para uma arquitetura mais descentralizada, digitalizada e orientada à flexibilidade, na qual diferentes tecnologias e agentes atuam de forma integrada. Nesse novo contexto, o enfrentamento do *curtailment* passa a depender não apenas de soluções isoladas, mas de uma abordagem sistêmica que considere aspectos técnicos, econômicos, regulatórios e sociais.

Com o objetivo de organizar e integrar o conhecimento disponível sobre o tema, o presente trabalho estrutura a análise da literatura em quatro dimensões principais: fatores estruturais associados ao *curtailment*; sistemas de armazenamento de energia; estratégias de flexibilidade da demanda; e modelos emergentes do sistema elétrico. Nesse contexto, este estudo tem como objetivo realizar uma revisão integrativa da literatura sobre os desafios operacionais e estruturais associados ao *curtailment* de energia eólica e solar no sistema elétrico brasileiro, analisando, de forma integrada, o papel dos sistemas de armazenamento em baterias, das estratégias de flexibilidade da demanda e dos modelos emergentes do sistema elétrico como alternativas para ampliar o aproveitamento da geração renovável no Brasil.

2 Metodologia

O presente trabalho caracteriza-se como uma revisão integrativa da literatura, de natureza qualitativa e exploratória, com o objetivo de analisar os desafios operacionais e estruturais associados ao *curtailment* de energia eólica e solar no sistema elétrico brasileiro, bem como avaliar as principais soluções propostas na literatura científica e técnica para mitigar esse fenômeno.

A condução da revisão foi baseada na estratégia PCC (População, Conceito e Contexto), amplamente utilizada em revisões integrativas. Neste trabalho, a População (P) refere-se a sistemas elétricos com alta penetração de fontes renováveis intermitentes, com ênfase na geração eólica e solar; o Conceito (C) está relacionado ao fenômeno do *curtailment* de energia, incluindo seus fatores associados, como limitações operacionais, restrições de rede, a baixa adoção de soluções como sistemas de armazenamento e estratégias de flexibilidade da demanda, bem como a inserção de modelos emergentes do sistema elétrico, caracterizados pela descentralização, digitalização e maior integração entre diferentes recursos energéticos; e o Contexto (C) corresponde ao sistema elétrico brasileiro, considerando suas características operacionais e estruturais. A partir dessa definição, foi possível formular a seguinte pergunta norteadora: Quais fatores operacionais e estruturais contribuem para o *curtailment* de energia eólica e solar no sistema elétrico brasileiro, e qual é o potencial dos sistemas de armazenamento em baterias, da flexibilidade da demanda e dos modelos emergentes para mitigar esse fenômeno?

A busca bibliográfica foi realizada em bases de dados científicas reconhecidas, como *Google Scholar*, *ScienceDirect*, *IEEE Xplore* e *Springer*, além de relatórios técnicos e documentos institucionais elaborados por entidades como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE), o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), a *International Energy Agency* (IEA) e o Ministério de Minas e Energia (MME). Embora a busca tenha contemplado a literatura internacional, a análise foi direcionada ao contexto do sistema elétrico brasileiro, utilizando estudos internacionais principalmente para contextualizar o fenômeno do *curtailment* e identificar soluções tecnológicas e operacionais aplicáveis ao cenário nacional. Além disso, foram utilizados descritores em português e em inglês: restrição de geração (*curtailment*), integração de energias renováveis (*renewable energy integration*), sistemas de armazenamento de energia por baterias (*battery energy storage systems*), resposta à demanda (*demand response*), usinas virtuais (*virtual power plants*), microrredes (*microgrids*), mercados de flexibilidade (*flexibility markets*) e comunidades energéticas (*energy communities*).

Foram considerados estudos publicados entre janeiro de 2008 e abril de 2026, incluindo artigos científicos, dissertações, teses e relatórios institucionais com abordagem técnica, econômica ou operacional do sistema elétrico. Como critérios de exclusão, foram desconsiderados trabalhos fora do escopo energético, sem rigor metodológico ou duplicados. Considerando o caráter dinâmico da temática, foram priorizados

documentos recentes, capazes de refletir o estado atual do conhecimento sobre o *curtailment* e suas estratégias de mitigação. Além da literatura científica tradicional, foram incluídos trabalhos de conclusão de curso (TCCs) quando apresentavam conteúdo técnico diretamente relacionado ao tema e evidências convergentes com aquelas reportadas em artigos científicos, dissertações, teses e relatórios institucionais, sendo utilizados como fontes complementares de informação. Ao final do processo de seleção, foram incluídos 50 documentos para análise, compostos por artigos científicos, relatórios técnicos, dissertações, teses e TCCs, conforme será detalhado na Seção 3.

Após a seleção dos estudos, os materiais foram organizados e analisados, sendo categorizados em quatro dimensões principais: sistemas de armazenamento de energia, fatores estruturais associados ao *curtailment*, estratégias de flexibilidade da demanda e modelos emergentes do sistema elétrico. A análise dos dados foi realizada de forma qualitativa, por meio da comparação e interpretação crítica dos estudos selecionados, buscando identificar padrões, convergências e divergências entre as abordagens, bem como os principais desafios técnicos, econômicos e regulatórios associados ao *curtailment*.

Além disso, foi realizada uma análise integrativa entre as diferentes dimensões apresentadas nas tabelas, permitindo compreender o fenômeno do *curtailment* de forma sistêmica, considerando tanto suas causas quanto as soluções tecnológicas e estruturais propostas na literatura. Dessa forma, a metodologia adotada assegura rigor científico, consistência analítica e coerência com os objetivos propostos, contribuindo para a construção de uma base sólida para a análise dos resultados e discussão do tema.

3 Resultados e discussões

A análise dos estudos selecionados permitiu estruturar a compreensão do fenômeno do *curtailment* no contexto do sistema elétrico brasileiro. Inicialmente, são apresentados os resultados da análise quantitativa e qualitativa das referências selecionadas, sendo posteriormente discutidas suas implicações à luz da literatura científica e técnica. Inicialmente, foi realizada uma análise quantitativa das referências utilizadas, considerando a classificação dos estudos em TCCs, dissertações, teses e relatórios institucionais. Conforme apresentado na Figura 1, o portfólio bibliográfico foi composto por 50 documentos, distribuídos em 25 artigos científicos, 20 relatórios técnicos, 3 TCCs, 2 dissertações de mestrado e 1 tese de doutorado. Observa-se a predominância de artigos científicos e relatórios técnicos, o que evidencia o caráter aplicado e contemporâneo das pesquisas analisadas.

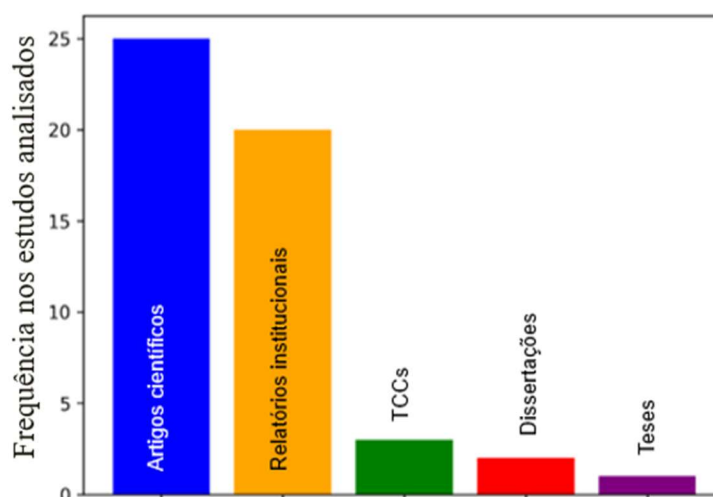


Figura 1. Classificação dos trabalhos analisados segundo o tipo de documento.

A análise dessa distribuição indica que o tema do *curtailment* está fortemente associado a estudos voltados à resolução de problemas reais do sistema elétrico, com significativa participação de relatórios institucionais, como os elaborados pela EPE e pela IEA, que ampliam a relevância prática do tema. Reforçando essa análise, a evolução temporal das publicações, apresentada na Figura 2, foi elaborada a partir da sistematização das referências segundo o ano de publicação de cada estudo. Os resultados evidenciam um crescimento significativo no número de publicações a partir de 2024, indicando o aumento do interesse acadêmico e institucional pelo tema, especialmente em função da intensificação da transição energética e da expansão das fontes renováveis. A análise conjunta das Figuras 1 e 2 permite inferir que o crescimento das publicações está diretamente relacionado ao aumento da complexidade do sistema elétrico,

indicando que o *curtailment* deixou de ser um fenômeno pontual para se tornar um problema estrutural, exigindo soluções integradas que envolvam aspectos técnicos, econômicos e regulatórios.

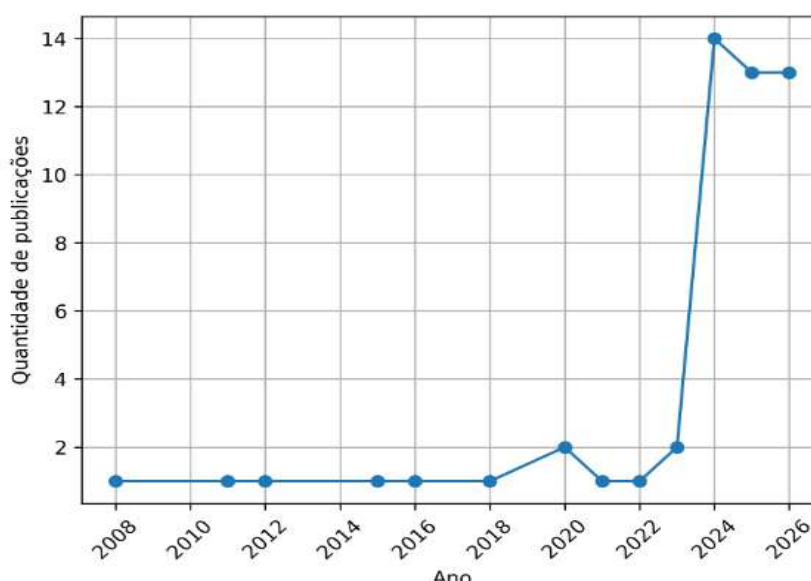


Figura 2. Evolução das publicações analisadas de janeiro 2008 a abril 2026.

A partir dessa análise inicial, os estudos foram organizados em quatro dimensões principais: (3.1) fatores estruturais associados ao *curtailment* (Subseção 3.1); sistemas de armazenamento de energia (Subseção 3.2); estratégias de flexibilidade da demanda (Subseção 3.3) e modelos emergentes do sistema elétrico (Subseção 3.4).

3.1 Fatores estruturais associados ao *curtailment*

Com base nos estudos sintetizados na Tabela 2, foram identificados diferentes fatores que contribuem para a ocorrência do *curtailment* no sistema elétrico brasileiro. Entre eles, destacam-se as limitações da infraestrutura de transmissão, a intermitência das fontes renováveis e a reduzida flexibilidade da demanda. Esses aspectos evidenciam os desafios enfrentados pelo sistema elétrico diante da crescente participação das fontes renováveis e servem de base para a discussão apresentada nesta seção.

A análise dos estudos apresentados na Tabela 2 evidencia que o *curtailment* está diretamente relacionado a limitações estruturais do sistema elétrico, especialmente no contexto do crescimento acelerado das fontes renováveis. Dados do Balanço Energético Nacional (EPE, 2025a) indicam que a matriz elétrica brasileira atingiu elevados níveis de renovabilidade, com forte expansão da geração solar e eólica, o que, embora positivo do ponto de vista ambiental, impõe novos desafios operacionais.

Esse crescimento ocorre de forma desbalanceada em relação à infraestrutura de transmissão e à dinâmica da carga, resultando em restrições no escoamento da energia gerada (ONS, 2025; Lopes et al., 2024). Além disso, a concentração do consumo em setores específicos e a baixa flexibilidade da demanda contribuem para o descompasso entre geração e consumo (EPE, 2025a; Costa et al., 2024). A intermitência das fontes renováveis e o modelo de despacho baseado no custo marginal de operação (CMO) também são apontados como fatores relevantes para a ocorrência do *curtailment* (Vieira et al., 2024; Szatkowski et al., 2024).

Outro fator relevante é o modelo de operação do sistema elétrico, que prioriza critérios de segurança e custo, podendo levar à limitação da geração renovável em situações de congestionamento ou excesso de oferta. Dessa forma, os resultados indicam que o *curtailment* deve ser compreendido como um fenômeno estrutural, decorrente da interação entre crescimento da geração, limitações da rede e características da carga. A Figura 3 apresenta a frequência dos principais fatores associados à ocorrência do *curtailment* identificados nos estudos analisados.

Tabela 2. Síntese analítica das causas estruturais do curtailment no sistema elétrico brasileiro.

Autor (Ano)	Tema	Metodologia	Principais pontos	Contribuições para a pesquisa
EPE (2025a)	Balanco Energético Nacional – BEN 2025 (Relatório técnico)	Análise estatística nacional	Crescimento expressivo da geração renovável (solar +39,6% e eólica +12,4%), expansão da MMGD e aumento da oferta elétrica, indicando desbalanceamento entre geração, carga e capacidade de escoamento	Fundamenta o contexto estrutural do <i>curtailment</i> no Brasil
Brasil (2025)	Lei nº 15.269/2025 – Marco regulatório (Lei Federal)	Análise normativa	Estabelece diretrizes para armazenamento, flexibilidade e integração do sistema elétrico	Base regulatória para mitigação do <i>curtailment</i>
EPE (2025b)	Plano Nacional de Energia 2055 (Relatório técnico)	Construção de cenários	A inserção de renováveis variáveis aumenta a complexidade operacional e exige maior flexibilidade do sistema	Fundamenta desafios estruturais e futuros do <i>curtailment</i>
ONS (2025)	Diagnóstico do <i>curtailment</i> no Brasil (Relatório técnico)	Análise operacional do sistema	Identifica causas do <i>curtailment</i> : limitações de transmissão, crescimento da geração superior à carga, expansão da MMGD e restrições operacionais; 4.330 GWh cortados em 2024	Evidência empírica direta do <i>curtailment</i> no Brasil
Lopes et al., (2024)	Expansão da transmissão (Artigo)	Revisão técnica	Necessidade de expansão da transmissão e presença de excedentes energéticos não escoados	Demonstra <i>curtailment</i> estrutural por limitação de rede
Vieira et al., (2024)	Intermitência das renováveis (Artigo)	Análise técnico-econômica	Intermitência gera custos indiretos elevados e desafios de integração no sistema	Fundamenta intermitência como causa do <i>curtailment</i>
Szatkowski et al., (2024)	Operação hidro-termo-eólica (TCC)	Modelagem do sistema	Despacho baseado no CMO pode limitar a inserção de renováveis	Explica <i>curtailment</i> pela ótica operacional
Faria et al., (2024)	Segurança energética (Artigo)	Análise multidimensional	Expansão renovável exige maior estabilidade e segurança do sistema	Relaciona <i>curtailment</i> à segurança energética
Oliveira (2024)	<i>Smart grids</i> e BESS (TCC)	Revisão tecnológica	Redes inteligentes e BESS aumentam integração de renováveis	Apresenta soluções para reduzir <i>curtailment</i>
Dias et al., (2024)	Planejamento e REDs (TCC)	Análise sistêmica	Crescimento da geração distribuída exige planejamento adequado do sistema	Conecta planejamento inadequado ao <i>curtailment</i>

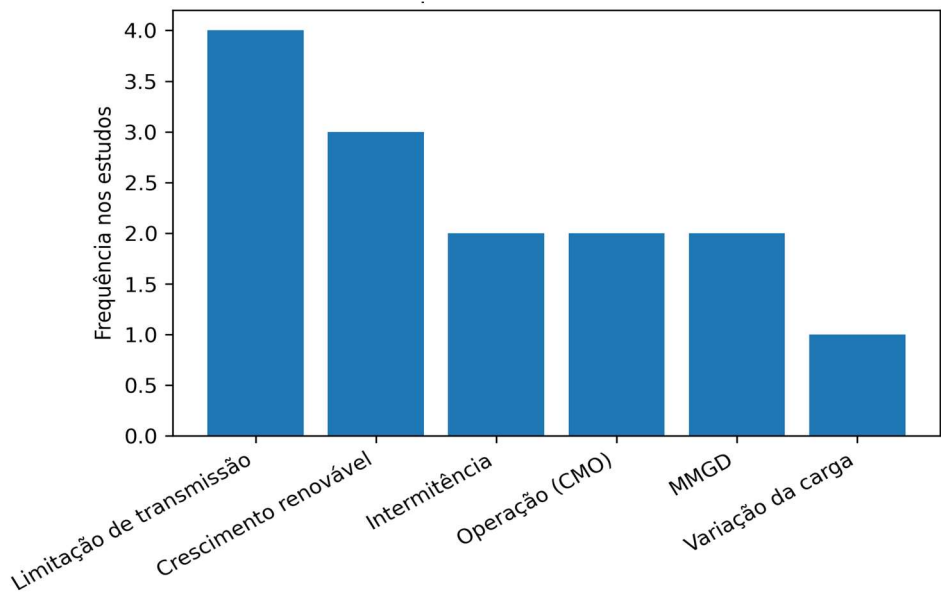


Figura 3. Principais causas do *curtailment* analisados na literatura observadas nos estudos.

3.2 Sistemas de armazenamento de energia

A Tabela 3 apresenta uma síntese dos estudos que abordam a aplicação de sistemas de armazenamento de energia como estratégia para a mitigação do *curtailment* em sistemas elétricos com elevada participação de fontes renováveis. A análise dessas publicações permite identificar os principais benefícios técnicos e operacionais associados ao armazenamento, bem como suas contribuições para o aumento da flexibilidade do sistema elétrico e para o melhor aproveitamento da energia gerada. Os estudos apresentados na Tabela 3 demonstram que os sistemas de armazenamento de energia, especialmente os baseados em BESS, constituem uma das principais soluções para a mitigação do *curtailment*. De acordo com os trabalhos analisados, o armazenamento permite o desacoplamento temporal entre geração e consumo, possibilitando o aproveitamento de excedentes energéticos que, de outra forma, seriam desperdiçados.

Tabela 3. Síntese analítica de estudos sobre armazenamento de energia e mitigação do curtailment.

Autor (Ano)	Tema	Metodologia	Principais pontos	Contribuições para a pesquisa
Queiroz (2025)	Armazenamento e integração renovável	Estudo técnico-econômico	Crescimento da GD gera fluxo reverso e <i>curtailment</i> ; BESS armazena excedentes e melhora operação	Evidencia relação direta entre crescimento renovável, limitações da rede e necessidade de armazenamento
Barbosa (2024)	Sistemas híbridos com BESS	Modelagem matemática + otimização estocástica	BESS reduz intermitência, melhora eficiência e confiabilidade de sistemas híbridos	Fornece base metodológica para integração renovável com baterias
Petit-Homme (2025)	Alocação ótima de BESS	Simulação IEEE + PSO + índices PTDF/VSI	Redução de perdas, melhoria de tensão e mitigação de congestionamentos	Mostra importância da localização estratégica do armazenamento
Dias et al., (2025)	BESS e transmissão	Estudo de caso + fluxo de potência	Permite maior inserção renovável sem violar limites de transmissão	Evidencia BESS como solução para restrições de escoamento
Pinto (2024)	FV residencial com baterias	Simulação <i>PVsyst</i>	Armazenamento aumenta autoconsumo e reduz dependência da rede	Mostra aplicação prática do BESS em microgeração
Instituto Acende Brasil (2024)	Armazenamento no setor elétrico	Análise técnica setorial	Explica curva do pato e necessidade de flexibilidade; BESS reduz desperdício energético	Base conceitual para <i>curtailment</i> e flexibilidade
Ferreira (2025)	Carregamento de VE com BESS	Dimensionamento técnico-econômico	BESS reduz sobrecargas e melhora gestão da demanda	Expande uso do armazenamento para mobilidade elétrica
Pinheiro (2020)	Despacho ótimo com BESS	Modelagem computacional + otimização estocástica	Armazenamento aumenta eficiência econômica e despachabilidade	Base teórica forte sobre operação ótima com BESS
Silva (2025)	<i>Curtailment</i> e BESS	Simulação ANAREDE	Sem BESS há violações operacionais; com BESS há estabilidade	Evidência direta do <i>curtailment</i> no Brasil e mitigação com armazenamento
MME (2025)	Manual técnico de BESS	Guia técnico + estudo de aplicações	Define funções: <i>peak shaving</i> , <i>load shifting</i> , <i>backup</i> e <i>grid-zero</i>	Base técnica e regulatória para aplicação do BESS

Os resultados indicam que a utilização de BESS contribui para a redução de problemas operacionais, como fluxo reverso de potência, instabilidade de tensão e sobrecarga na rede elétrica (Queiroz, 2025; Silva, 2025). Além disso, estudos de simulação e otimização mostram que o armazenamento pode melhorar o perfil de tensão, reduzir perdas elétricas e aumentar a eficiência do sistema (Petit-Homme, 2025; Pinheiro, 2020). Entretanto, a análise também evidencia que a adoção desses sistemas ainda enfrenta desafios relacionados a custos, regulamentação e definição de modelos de negócio (Acende Brasil, 2024; MME;

GIZ, 2025). Nesse sentido, embora o armazenamento represente uma solução tecnicamente eficaz, sua viabilidade em larga escala depende de avanços institucionais e econômicos.

Conforme ao estudo realizado nesta revisão bibliográfica e evidenciado na Figura 4, os sistemas de armazenamento apresentam múltiplas funções no sistema elétrico, destacando-se não apenas o armazenamento de excedentes energéticos, mas também o suporte à operação da rede, como controle de tensão e mitigação de congestionamentos. Esse resultado reforça que o BESS não deve ser visto apenas como uma solução pontual, mas como um elemento estruturante da modernização do sistema elétrico.

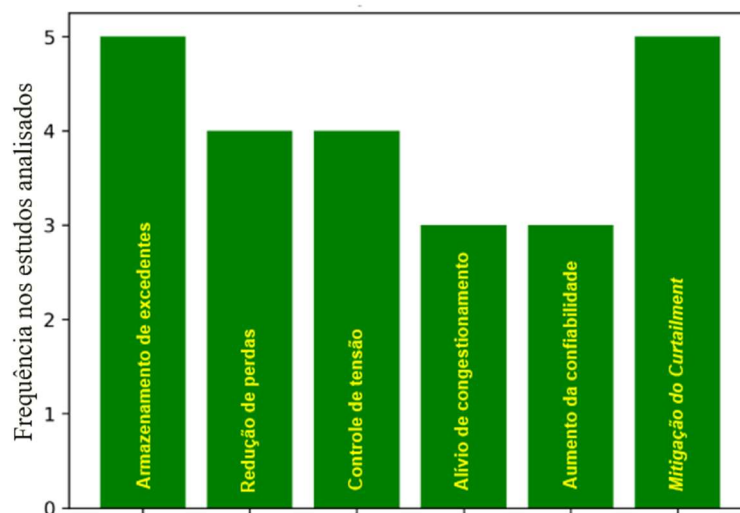


Figura 4. Funções do BESS observadas na literatura para mitigar o *curtailment*.

3.3 Estratégias de flexibilidade da demanda

Conforme apresentado na Tabela 4, a flexibilização da demanda constitui uma abordagem complementar ao armazenamento, atuando pelo lado do consumo de energia. Os estudos analisados indicam que mecanismos como resposta à demanda e *load shifting* permitem ajustar o consumo em função da disponibilidade de geração (IEA, 2023; Lund et al., 2017).

Além disso, o uso de cargas flexíveis, como datacenters e processos industriais, permite absorver excedentes energéticos (IEA, 2022), enquanto as *smart grids* possibilitam maior controle e automação do sistema (Fang et al., 2012). Dessa forma, os resultados indicam que a mitigação do *curtailment* não deve ser baseada exclusivamente em soluções de oferta, como o armazenamento, mas também na gestão inteligente da demanda, ampliando as possibilidades de adaptação do sistema elétrico.

A Figura 5 demonstra que as estratégias de flexibilidade da demanda atuam diretamente na redução do descompasso entre geração e consumo, sendo a resposta à demanda e o *load shifting* as abordagens mais recorrentes. Esses mecanismos permitem adaptar o consumo à disponibilidade de energia, reduzindo a necessidade de corte de geração e aumentando a eficiência do sistema.

3.4 Modelos emergentes do sistema elétrico

A Tabela 5 apresenta uma síntese dos estudos que abordam os modelos emergentes do sistema elétrico e suas contribuições para a mitigação do *curtailment* e para a ampliação da flexibilidade operacional. Os trabalhos analisados discutem diferentes abordagens baseadas na integração de recursos energéticos distribuídos, destacando o papel das usinas VPPs, das comunidades energéticas e dos mercados de flexibilidade na evolução do setor elétrico.

A análise dos estudos apresentados na Tabela 5 evidencia uma transformação estrutural no sistema elétrico, marcada pela descentralização, digitalização e integração de recursos energéticos distribuídos. Modelos como VPPs, comunidades energéticas e mercados de flexibilidade representam uma evolução do paradigma tradicional, permitindo maior eficiência e resiliência do sistema. As VPPs possibilitam a integração de geração distribuída, armazenamento e demanda, operando de forma coordenada (Naval; Yusta, 2021). As comunidades energéticas promovem a descentralização e a participação ativa dos consumidores (EPE, 2025c; Van Summeren et al., 2020), enquanto os mercados de flexibilidade criam incentivos econômicos para a adoção dessas soluções (Scrocca et al., 2026).

Esses modelos permitem maior equilíbrio entre oferta e demanda, reduzindo congestionamentos e melhorando o aproveitamento da energia renovável. Dessa forma, os resultados indicam que a evolução do sistema elétrico está diretamente associada à capacidade de integração desses novos modelos.

Tabela 4. Síntese analítica de estudos sobre armazenamento de energia e mitigação do curtailment.

Autor (Ano)	Tema	Metodologia	Principais pontos	Contribuições para a pesquisa
IEA (2023)	Resposta à demanda e flexibilidade	Análise global e estudos de caso	A resposta da demanda desloca o consumo no tempo, ajustando-o à geração renovável e reduzindo excedentes energéticos	Demonstra que a flexibilidade da carga reduz o <i>curtailment</i>
Costa (2024)	Comportamento da carga	Análise de dados e modelagem	A carga varia conforme fatores externos como temperatura e comportamento do consumidor	Fundamenta a variabilidade da demanda e necessidade de adaptação do consumo
IEA (2022)	Datacenters e consumo energético	Análise global	Datacenters possuem alto consumo e potencial de ajuste operacional	Apresenta datacenters como cargas flexíveis para absorção de excedentes
Fang et al., (2012)	<i>Smart grids</i>	Revisão científica	Redes inteligentes permitem controle ativo da demanda e integração de renováveis	Fundamenta a flexibilidade como solução sistêmica
Mathiesen et al., (2015)	<i>Load shifting</i>	Revisão e modelagem	O deslocamento de carga melhora o aproveitamento da geração renovável	Mostra alinhamento entre consumo e geração
Albadi & El-Saadany (2008)	Resposta à demanda	Revisão técnica	Reduz picos de consumo e necessidade de corte de geração	Relaciona DR com redução do <i>curtailment</i>
Dunn et al., (2011)	Armazenamento de energia	Revisão científica	Armazenamento aumenta flexibilidade e integração de renováveis	Complementa estratégias de flexibilidade da carga
Rizzotto et al., (2024)	Carga líquida	Modelagem probabilística	Renováveis alteram carga líquida e criam excedentes energéticos	Fundamenta necessidade de ajustar demanda
Bhatnagar et al., (2016)	Resposta à demanda + armazenamento	Simulação de cenários	Integração reduz custos e melhora eficiência energética	Evidência prática de redução do desperdício
Crespo del Granado (2023)	Flexibilidade e mercado	Revisão científica	Flexibilidade melhora balanceamento e reduz congestionamentos	Consolida flexibilidade como solução central

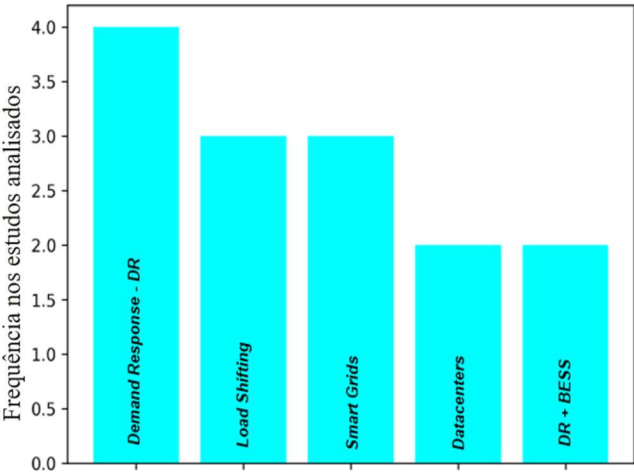


Figura 5. Flexibilidade da demanda observadas na literatura.

Tabela 5. Modelos emergentes do sistema elétrico.

Autor (Ano)	Tema	Principais pontos	Contribuições para a pesquisa
Naval e Yusta (2021)	Modelos virtuais de usinas e mercados de eletricidade	Integração de geração, demanda e armazenamento; participação em mercados; digitalização	Fundamenta VPPs como modelo estrutural do sistema elétrico
Van Summeren et al. (2020)	Energia comunitária e VPPs	Integração de comunidades com DERs e <i>smart grids</i> ; prosumidores	Mostra evolução social e tecnológica do sistema elétrico
EPE (2025c)	Comunidades Energéticas	Governança local; atuação em toda cadeia energética; inclusão social	Base institucional brasileira para descentralização energética
Dantas et al. (2018)	Políticas públicas para <i>smart grids</i> no Brasil	Incentivos, regulação e integração tecnológica	Mostra papel das políticas na transição energética
Bianchini et al., (2025)	Operação de comunidades com Resposta à demanda	Integração de resposta à demanda, BESS e otimização MILP	Base técnica para flexibilidade e otimização energética
Boopathy et al., (2024)	<i>Deep Learning</i> em <i>Smart Grids</i> e Resposta à demanda	Previsão de carga, DR, IA aplicada ao sistema elétrico	Fundamenta uso de IA na gestão energética
Mosetlhe et al., (2025)	microrredes para eletrificação rural sustentável	Análise de microrredes AC/DC/híbridas e desafios técnicos	Base de infraestrutura descentralizada
Robbiano et al., (2025)	Gestão energética em comunidades renováveis	Uso de EMS e MILP para otimização e compartilhamento de energia	Base para consumo flexível e eficiência energética
Scrocca et al., (2026)	Mercados locais de flexibilidade na Europa	Uso de geração distribuída, Resposta à demanda, BESS em mercados; desafios regulatórios	Consolida viabilidade econômica da flexibilidade
IEA (2026)	Tendências globais do setor elétrico	Crescimento da demanda elétrica (~3%); expansão recorde de solar e armazenamento; aumento do papel de <i>datacenters</i> e eletrificação	Evidencia necessidade de flexibilidade, armazenamento e gestão da demanda para integrar renováveis e evitar desperdícios energéticos

A Figura 6 evidencia que os modelos emergentes do sistema elétrico, como VPPs, comunidades energéticas e mercados de flexibilidade, representam uma evolução estrutural do setor, baseada na descentralização e na digitalização. Esses modelos ampliam a capacidade de integração de recursos distribuídos e contribuem para a construção de um sistema mais resiliente e eficiente.

De forma geral, os resultados demonstram que o *curtailment* é um fenômeno multifatorial, cuja mitigação exige uma abordagem integrada, combinando soluções tecnológicas, operacionais e regulatórias. A análise das diferentes dimensões evidencia que não existe uma solução única, sendo necessário combinar armazenamento de energia, flexibilidade da demanda e novos modelos de operação do sistema elétrico para garantir o aproveitamento eficiente da energia renovável.

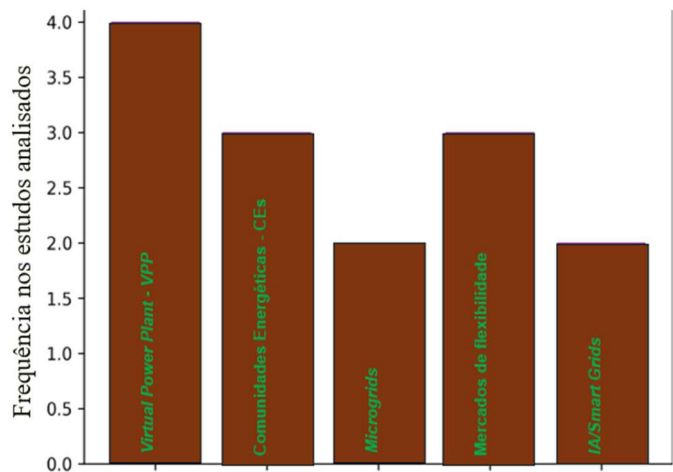


Figura 6. Modelos emergentes do sistema elétrico baseado na literatura.

4 Conclusão

O presente trabalho teve como objetivo analisar, por meio de uma revisão integrativa da literatura, os desafios operacionais e estruturais associados ao fenômeno do *curtailment* de energia eólica e solar no sistema elétrico brasileiro, bem como avaliar o potencial de diferentes soluções para mitigar esse problema, com destaque para os BESS, as estratégias de flexibilidade da demanda e os modelos emergentes do sistema elétrico.

A partir da análise dos estudos selecionados, verificou-se que o *curtailment* não se configura apenas como um problema operacional pontual, mas como um fenômeno estrutural, diretamente relacionado à expansão acelerada das fontes renováveis intermitentes e às limitações da infraestrutura e da operação do sistema elétrico. Conforme evidenciado ao longo da pesquisa, fatores como restrições na capacidade de transmissão, crescimento desbalanceado da geração em relação à carga, intermitência das fontes renováveis e limitações nos mecanismos de despacho energético contribuem significativamente para a ocorrência do *curtailment*.

Os resultados também demonstraram que o sistema elétrico brasileiro ainda apresenta lacunas importantes no que se refere à adoção de mecanismos de flexibilidade, o que agrava o descompasso entre oferta e demanda e intensifica as perdas energéticas. Nesse sentido, a literatura analisada aponta que a mitigação do *curtailment* exige uma abordagem integrada, que vá além da expansão da geração, incorporando soluções capazes de aumentar a flexibilidade e a eficiência operacional do sistema. Entre essas soluções, destacam-se os BESS, que se mostraram fundamentais para o desacoplamento temporal entre geração e consumo, permitindo o aproveitamento de excedentes energéticos e a redução de problemas operacionais na rede elétrica. Além disso, os estudos evidenciaram que o BESS desempenha múltiplas funções no sistema elétrico, incluindo controle de tensão, mitigação de congestionamentos e aumento da confiabilidade do sistema.

Paralelamente, as estratégias de flexibilidade da demanda, como resposta à demanda e *load shifting*, mostraram-se essenciais para ajustar o consumo de energia à disponibilidade de geração, contribuindo para o equilíbrio do sistema elétrico e reduzindo a necessidade de corte de geração renovável. A integração dessas estratégias com tecnologias de armazenamento amplia ainda mais o potencial de mitigação do *curtailment*, evidenciando a importância de soluções híbridas e complementares.

Ademais, a análise dos modelos emergentes do sistema elétrico, como VPPs, comunidades energéticas e microrredes, revelou uma tendência de transformação estrutural do setor elétrico, marcada pela descentralização, digitalização e integração de recursos energéticos distribuídos. Esses modelos ampliam a capacidade de adaptação do sistema elétrico, permitindo maior eficiência, resiliência e aproveitamento da geração renovável.

Dessa forma, conclui-se que o enfrentamento do *curtailment* no Brasil depende da adoção de uma abordagem sistêmica, que integre soluções tecnológicas, operacionais e regulatórias. A combinação entre armazenamento de energia, flexibilização da demanda e novos modelos de operação do sistema elétrico mostra-se essencial para garantir o aproveitamento eficiente da energia renovável e viabilizar a continuidade da transição energética no país.

Entretanto, este estudo apresenta limitações inerentes à abordagem metodológica adotada, uma vez que se baseia exclusivamente em análise bibliográfica, não contemplando a aplicação de modelos quantitativos ou estudos de caso específicos no sistema elétrico brasileiro. Nesse sentido, sugere-se, como trabalhos futuros, a realização de estudos aplicados que envolvam simulações computacionais, análise de cenários e avaliação técnico-econômica da implementação de sistemas de armazenamento e estratégias de flexibilidade em diferentes regiões do país.

Referências bibliográficas

Agência Nacional de Energia Elétrica – ANEEL (2026). Sistema de armazenamento de energia: ANEEL autoriza primeira unidade vinculada a usina. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2026/sistema-de-armazenamento-de-energia-aneel-autoriza-primeira-unidade-armazenadora-vinculada-a-usina>. Acesso em: 04 abr. 2026.

Albadi, MH.; El-Saadany, Ehab F (2007). Demand response in electricity markets: An overview. In: 2007 IEEE power engineering society general meeting. P. 1-5. Disponível em: <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/4275494/>. Acesso em: 02 abr. 2026.

ATESS Power (2026). Implantação de BESS em diferentes tipos de rede nas Américas. Canal Solar. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/implantacao-bess-diferentes-rede-americas>. Acesso em: 02 abr. 2026.

Barbosa, A M (2024). Otimização multiobjetivo estocástica para geração distribuída usando sistema híbrido de energia com sistema de armazenamento em bateria. 2024. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa. Disponível em: <https://repositorio.ufpb.br/jspui/handle/123456789/33367>. Acesso em: 12 mar. 2026.

Barros, FG (2026). A inoperância brasileira em relação à energia solar. TNH1. Disponível em: <https://www.tnh1.com.br/noticia/nid/a-inoperancia-brasileira-em-relacao-a-energia-solar/>. Acesso em: 06 abr. 2026.

Ma, O; Cheung, K (2016). Demand response and energy storage integration study. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. Office of Electricity Delivery and Energy Reliability. <https://doi.org/10.2172/1333046>.

Bianchini, G et al. (2025). Optimal operation of renewable energy communities under demand response programs. *Energy*, v. 326, p. 136076. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2025.136076>.

Boopathy, P et al. (2024). Deep learning for intelligent demand response and smart grids: A comprehensive survey. *Computer science review*, v. 51, p. 100617. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2024.100617>.

Brasil (2025). Lei nº 15.269, de nov. 2025. Brasília, DF: Presidência da República, 2025. Disponível em: <https://www.gov.br/planalto/pt-br/search?origem=form&SearchableText=Lei%20n%C2%BA%2015.269,%20de%202025.%20Bras%C3%ADlia,%20DF:%20Presid%C3%Aancia%20da%20Rep%C3%BAblica>. Acesso em: 02 abr. 2026.

Costa, LCA et al. (2024). O impacto das altas temperaturas no planejamento de carga para a contratação de energia e formas de aplicação de modelo preditivo. *Anais do XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético*, p. 2017.

Granado et al. (2023). Flexibility Characterization, Aggregation, and Market Design Trends with a High Share of Renewables: a Review, v. 10, p. 12–21. <https://doi.org/10.1007/s40518-022-00205-y>.

Dantas, GA. et al (2018). Public policies for smart grids in Brazil. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 92, p. 501-512. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.077>.

Daza, EFB (2026). Guerra Irã x EUA e impactos no Brasil. *Cenário Energia*. Disponível em: <https://cenarioenergia.com.br/2026/04/01/guerra-ira-x-eua-o-que-um-choque-historico-do-petroleo-revela-sobre-o-brasil/>. Acesso em: 05 abr. 2026.

Oliveira, C et al. (2025). Armazenamento de energia para maior aproveitamento da margem de transmissão. XVI Conferência brasileira sobre a qualidade da energia elétrica. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.04.077>.

Dunn B. et al. (2011). Electrical energy storage for the grid: a battery of choices. *Science*, v. 334, n. 6058, p. 928-935. <https://doi.org/10.1126/science.1212741>

Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2025a). Balanço Energético Nacional. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-885/topico-771/Relat%C3%B3rio%20Final_BEN%202025.pdf#search=BEN%202025. Acesso em: 02 abr. 2026.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2025b). Plano Nacional de Energia 2055. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/plano-nacional-de-energia-2055>. Acesso em: 25 mar. 2026.

Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2025c). Comunidades energéticas: definições e experiências internacionais. Rio de Janeiro: EPE. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-928/Caderno%20Comunidades%20Energ%C3%A9ticas%20-%20Defini%C3%A7%C3%B5es%20e%20Experi%C3%Aancias%20Internacionais.pdf>. Acesso em: 19 abr. 2026.

- Fang et al. (2012). Smart Grid — The New and Improved Power Grid: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 14, no. 4, p. 944-980. <http://10.1109/SURV.2011.101911.00087>.
- Faria et al. (2024). Análise multidimensional da segurança energética no setor elétrico brasileiro. XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, p.453.
- Ferreira, LD (2025). Dimensionamento de uma estação de carregamento de veículos elétricos com apoio de sistema fotovoltaico e armazenamento em baterias. Trabalho de Projeto (Mestrado em Engenharia Eletrotécnica, área de especialização em Automação) – Instituto Superior de Engenharia de Lisboa (ISEL), Lisboa. Disponível em: <https://repositorio.ipl.pt/entities/publication/ccdeba26-8629-4b3a-9333-f8b4d9e17a89>. Acesso em: 15 abr. 2026.
- Figueiredo, L (2026). VPPs e monetização da energia com armazenamento e flexibilidade. Canal Solar. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/vpps-monetizacao-energia-solar-armazenamento/>. Acesso em: 12 abr. 2026.
- Garfinkel, L (2026). Leilão de reserva agrada setor, mas acende alerta de alta na conta de luz. Poder360. Disponível em: <https://www.poder360.com.br/poder-energia/leilao-de-energia-e-elogiado-mas-gera-alerta-tarifario/>. Acesso em: 24 mar. 2026.
- Hein, H (2026). Sem previsibilidade, geradoras reduzem equipes e suspendem investimentos no Brasil. Canal Solar, 2026. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/geradoras-reduzem-investimentos-curtailment-brasil/>. Acesso em: 02 abr. 2026.
- Instituto Acende Brasil (2024). Armazenamento de Energia no Setor Elétrico Brasileiro. White Paper 31, São Paulo. 40p. Disponível em: https://acendebrazil.com.br/wp-content/uploads/2025/03/WP31_2024_1.pdf?v=1780837443. Acesso em: 02 abr. 2026.
- International Energy Agency – IEA (2023). Demand response and flexibility in power systems. Disponível em: <https://www.iea.org/energy-system/energy-efficiency-and-demand/demand-response>. Acesso em: 02 abr. 2026.
- International Energy Agency – IEA (2026). Global Energy Review 2026. Paris: IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/global-energy-review-2026>. Acesso em: 20 abr. 2026.
- Lopes, ACA et al. (2024). A expansão da rede de transmissão decorrente da atual mudança do sistema elétrico brasileiro. XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético, p. 29.
- Lund, H et al. (2017). Smart energy and smart energy systems. *Energy*, v. 137, p. 556–565. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.05.123>.
- Ministério de Minas e Energia - MME; Deutsche Gesellschaft Für Internationale Zusammenarbeit – GIZ (2025). Manual de boas práticas em sistemas de armazenamento de energia: lições aprendidas e recomendações. Brasília: MME; GIZ. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/search?origem=form&SearchableText=Manual%20de%20Boas%20Pr%C3%A1ticas%20em%20Sistemas%20de%20Armazenamento%20de%20Energia>. Acesso em: 19 mar. 2026.
- Mosetlthe, T et al. (2025). Sustainable rural electrification through micro-grids in developing nations — A review of recent development. *Energy Reports*, v. 13, p. 1171-1177, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2024.11.040>.
- Naval, N; Yusta, JM (2021). Virtual power plant models and electricity markets - A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 149, art. 111393. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111393>.
- Oliveira, EF (2024). Redes elétricas inteligentes e sistemas de armazenamento de energia para a integração de fontes renováveis variáveis de energia no Brasil. XIV Congresso Brasileiro De Planejamento Energético, p.2456.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (2025). Diagnóstico e perspectiva da evolução dos cortes de geração no Brasil. Disponível em: <https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/RT%20DGL-ONS%200189-2025%20-%20GT%20Curtailment%20rev1.pdf#search=Diagn%C3%B3stico%20do%20curtailment%20no%20Brasil>. Acesso em: 02 abr. 2026.
- Petit-Homme, J (2025). Dimensionamento e Alocação de Sistema de Armazenamento de Energia em Bateria para Suporte de Tensão e Mitigação de Congestionamento. Dissertação (Mestrado) - Programa de

Pós-graduação em Engenharia Elétrica/ccet, Universidade Federal do Maranhão, São Luís - MA. Disponível em: http://tedebc.ufma.br:8080/jspui/bitstream/tede/6633/2/Jacky_PETIT_HOMME.pdf. Acesso em: 12 mar. 2026.

Pinheiro, VCN (2020). Despacho Ótimo de Sistemas Elétricos com Armazenamento de Energia para Fontes Intermitentes de Geração no Brasil. 2020. Tese de Doutorado (Doutorado em Engenharia Civil) - Faculdade de Engenharia Civil, Arquitetura e Urbanismo, Universidade Estadual de Campinas.

Pinto, AMR (2024). Projeto de um sistema solar fotovoltaico residencial com armazenamento em baterias. 2024. 215 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Elétrica) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/79144>. Acesso em: 13 mar.2026.

Queiroz, EADN (2025). Armazenamento de energia: o elemento-chave para impulsionar o próximo nível da transição energética no Brasil. Monografia (graduação) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Tecnologia, Departamento de Engenharia Elétrica, Natal. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/server/api/core/bitstreams/b20159fb-5937-4517-b8ca-196ea92430a1/content>. Acesso em: 12 mar. 2026.

Rigamonti, C (2026). Crises geopolíticas aceleram transição energética e ampliam espaço da energia solar no Brasil, avalia professor da FGV. Times Brasil, 2026. Disponível em: < <https://timesbrasil.com.br/empresas-e-negocios/energia/crises-geopoliticas-aceleram-transicao-energetica-e-ampliam-espaco-da-energia-solar-no-brasil-avalia-professor-da-fgv/> >. Acesso em: 05 abr. 2026.

Robbiano, T et al. (2025). Optimal energy management strategies for aggregators in renewable energy communities. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 172, p. 111085. <https://doi.org/10.1016/j.ijepes.2025.111085>.

Scrocca, A et al. (2026). Local flexibility markets in Europe: A critical review of market designs, operational maturity and stakeholder perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 226, Part D, p. 116434. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2025.116434>.

Sil, AC (2026). Regulamentação de baterias sofre nova postergação pela ANEEL. Canal Solar, 2026. Disponível em: <https://canalsolar.com.br/regulamentacao-de-baterias-nova-postergacao-aneel/>. Acesso em: 13 abr. 2026.

Silva, DS et al. (2025). Curtailment e armazenamento da energia: efeitos no fluxo de potência em região de alta geração renovável e carga atípica. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Elétrica) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco (IFPE), Campus Garanhuns, Garanhuns.

Szatkowski, NDR; detzel, DHM (2024). Análise da operação do sistema hidro-termo-eólico brasileiro sob o ponto de vista do custo marginal de operação. XIV Congresso Brasileiro de Planejamento Energético. p.181.

Thompson, F et al. (2026). Além da eletricidade: o verdadeiro impacto do desenvolvimento das baterias no Brasil. Exame, 2026. Disponível em: <https://exame.com/esg/alem-da-eletricidade-o-verdadeiro-impacto-do-desenvolvimento-das-baterias-no-brasil>. Acesso em: 25 mar. 2026.

Uddin, M et al. (2018). A review on peak load shaving strategies. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 82, p. 3323–3332. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.10.056>.

Van Summeren, LFM et al. (2020). Community energy meets smart grids: Reviewing goals, structure, and roles in Virtual Power Plants in Ireland, Belgium and the Netherlands. *Energy Research & Social Science*, v. 63, p. 101415. <https://doi.org/10.1016/j.erss.2019.101415>.

Vieira, RRD et al. (2024). Análise de custo das intermitências em fontes renováveis. XIV congresso Brasileiro de Planejamento Energético, p. 229.