



Impacto da intermitência de fontes renováveis nas redes elétricas inteligentes brasileiras

Impact of renewable intermittency on Brazilian smart grids

Maria Eduarda Dantas Martins¹, Rafael Santos Freire Ferraz^{2,*}, Renato Santos Freire Ferraz³

¹ Aluna 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

³ Professor do curso Engenharia Elétrica, Faculdade de Ilhéus – FDI, Ilhéus, BA, Brasil

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

Received: 10 February 2026 | Accepted: 21 March 2026 | Published online: 29 April 2026

Resumo: A intensificação da participação de fontes renováveis intermitentes, especialmente a geração solar fotovoltaica e a eólica, tem transformado de maneira significativa a matriz elétrica brasileira e a dinâmica de operação do sistema de potência. Embora essenciais para o avanço da descarbonização e para o cumprimento das metas climáticas, essas tecnologias introduzem desafios relevantes para a estabilidade, a previsibilidade e a flexibilidade operativa das redes elétricas inteligentes. Este artigo investiga, por meio de uma revisão integrativa da literatura, análise de estudos de caso e comparação de experiências nacionais e internacionais, os efeitos técnicos, regulatórios e operacionais associados à intermitência no contexto brasileiro. Os resultados apontam a necessidade de expansão de soluções como sistemas de armazenamento de energia em múltiplas escalas, modelos avançados de previsão meteorológica baseados em inteligência artificial, mecanismos de resposta ativa da demanda e maior digitalização da infraestrutura. Apesar dos avanços observados, persistem entraves normativos, limitações institucionais, desafios de governança e lacunas tecnológicas que dificultam a plena integração desses recursos. O estudo propõe, por fim, diretrizes para o fortalecimento do arcabouço regulatório, modernização das redes, aprimoramento dos critérios de planejamento e operação, além da capacitação profissional, constituindo bases essenciais para uma transição energética inteligente, resiliente e segura no Brasil.

Palavras-chave: fontes renováveis; intermitência; operação; planejamento energético; redes elétricas inteligentes.

Abstract: The growing penetration of intermittent renewable energy sources, particularly solar photovoltaic and wind generation, has significantly transformed the Brazilian electricity matrix and the operational dynamics of the power system. Although essential for advancing decarbonization and meeting climate targets, these technologies introduce substantial challenges to the stability, predictability, and operational flexibility of smart grids. This article investigates, through an integrative literature review, case study analyses, and a comparison of national and international experiences, the technical, regulatory, and operational effects associated with intermittency in the Brazilian context. The results highlight the need to expand solutions such as multi-scale energy storage systems, advanced weather forecasting models based on artificial intelligence, active demand response mechanisms, and increased infrastructure digitalization. Despite the progress achieved, regulatory barriers, institutional constraints, governance challenges, and technological gaps still hinder the full integration of these resources. Finally, the study proposes guidelines for strengthening the regulatory framework, modernizing the grid, improving planning and operational criteria, and advancing workforce training, establishing essential foundations for an intelligent, resilient, and secure energy transition in Brazil.

Keywords: Energy planning; intermittency; operation; renewable sources; smart grids.

1 Introdução

A crescente demanda global por fontes energéticas de baixa emissão de carbono tem impulsionado uma transformação estrutural nos sistemas elétricos, com a incorporação progressiva de fontes renováveis intermitentes, como a solar fotovoltaica e a eólica. Essa transição decorre tanto dos compromissos internacionais assumidos no âmbito do Acordo de Paris (2015), quanto do avanço tecnológico e da redução dos custos dessas fontes. No Brasil, o cenário é especialmente promissor, com potencial técnico estimado em mais de 300 GW para energia solar e 700 GW para energia eólica (EPE, 2023). No entanto, essas fontes apresentam variações sazonais e estocásticas, cuja imprevisibilidade compromete o equilíbrio entre oferta e demanda em tempo real, exigindo mudanças profundas nos modelos tradicionais de operação e controle da rede elétrica.

Nesse contexto, a integração de tecnologias digitais impulsionou a modernização da infraestrutura de distribuição e consolidou o conceito de redes elétricas inteligentes (do inglês *smart grids*). Essas redes permitem o monitoramento em tempo real, o controle remoto de equipamentos e a integração de recursos energéticos distribuídos (REDs), como sistemas fotovoltaicos residenciais, veículos elétricos e soluções de armazenamento de energia. Tecnologias como a Internet das Coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*), sensores de Unidade de Medição Fasorial (PMU, do inglês *Phasor Measurement Units*), Controle de Supervisão e Aquisição de Dados (SCADA, do inglês *Supervisory Control and Data Acquisition*) e plataformas baseadas em inteligência artificial foram gradualmente integradas a esse novo modelo. Iniciativas como o Projeto Energia Inteligente (CPFL, 2020) e o projeto piloto da EDP em Aparecida (SP) são bons exemplos de progresso alcançado pelo Brasil na digitalização do setor elétrico.

No entanto, a natureza intermitente das fontes de energia renováveis representa uma barreira técnica fundamental para a integração de redes inteligentes. Flutuações repentinas na geração de energia podem comprometer a estabilidade da frequência e a tensão da rede, podendo ocasionar perdas de sincronismo, ativação de mecanismos de alívio de carga e danos a equipamentos. O Operador Nacional do Sistema (ONS) afirma que a participação crescente dessas fontes de energia exige uma reavaliação dos padrões de despacho, das reservas rotativas de energia e da confiabilidade das operações em tempo real (ONS, 2024). A capacidade de prever, compensar e responder dinamicamente a essas flutuações é fundamental para o sucesso da transição energética do Brasil (ONS, 2024).

Diante desse cenário, este artigo tem como objetivo investigar o impacto de fontes de energia renováveis intermitentes na operação e confiabilidade de redes inteligentes no Brasil por meio de uma revisão abrangente da literatura e análise de estudos de caso. Este estudo visa identificar os desafios técnicos, regulatórios e operacionais enfrentados por essas fontes de energia intermitentes e avaliar as estratégias de mitigação atualmente inovadoras no Brasil. Ao fazer isso, este estudo visa fornecer suporte técnico e científico para melhorar a governança energética nacional e propor diretrizes que favoreçam a integração sustentável de fontes de energia renováveis intermitentes em redes inteligentes. A relevância acadêmica, técnica e socioeconômica do tema justifica a abordagem da pesquisa. Este estudo é parte de um esforço comum para construir um sistema energético mais resiliente, eficiente e inclusivo e visa revelar como a mitigação inteligente das intermitências pode transformar as redes elétricas inteligentes brasileiras em pilares da transição energética nacional.

2 Metodologia

Este estudo adota uma abordagem qualitativa, exploratória e descritiva, e baseia-se em uma revisão bibliográfica abrangente. A justificativa para a adoção de uma revisão abrangente reside na multidimensionalidade do tema, o que permite a inclusão de estudos empíricos, relatórios técnicos e publicações institucionais, levando a uma compreensão mais abrangente e crítica do impacto da intermitência das fontes renováveis em redes inteligentes e suas estratégias relacionadas.

A pergunta norteadora da pesquisa foi elaborada com base na estrutura PCC, do inglês *Population, Concept, and Context*, um modelo que contribui para a formulação de questões de pesquisa claras e bem delimitadas. Nesse caso:

- *Population* (População): redes elétricas inteligentes;
- *Concept* (Conceito): impactos da intermitência das fontes renováveis e estratégias de mitigação;
- *Context* (Contexto): o sistema elétrico brasileiro.

A partir dessa estrutura, definiu-se a seguinte pergunta de pesquisa, composta por dois aspectos complementares: “Quais são os principais impactos da intermitência das fontes renováveis sobre as redes elétricas inteligentes no Brasil, e quais estratégias têm sido propostas para mitigar tais efeitos?”

Foram analisadas publicações de normas e regulamentações institucionais relacionados à integração de fontes renováveis intermitentes em redes elétricas inteligentes no contexto brasileiro. A seleção das fontes seguiu critérios de atualidade (2015 a 2024), relevância temática e rigor metodológico, abrangendo publicações da Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), da Empresa de Pesquisa Energética (EPE), do ONS, da Agência Internacional de Energia Renovável (IRENA, do inglês *International Renewable Energy Agency*), Comissão Federal de Regulamentação de Energia (FERC, do inglês *Federal Energy Regulatory Commission*) e da Bloomberg Nova Economia de Energia (BloombergNEF, do inglês *Bloomberg New Energy Finance*). Os principais descritores utilizados incluíram os termos em português: redes inteligentes, intermitência, energia renovável, sistema elétrico brasileiro, sistemas de armazenamento, resposta da demanda; e seus respectivos termos em inglês: *smart grids, intermittency, renewable energy, brazilian power system, brazilian electrical system, energy storage systems, storage systems, demand response*.

A análise dos materiais coletados foi conduzida por meio de uma abordagem de análise de conteúdo temática, que permitiu identificar padrões, recorrências e proposições comuns entre as diferentes fontes examinadas. Esse processo ocorreu em etapas sucessivas, envolvendo leitura exploratória, categorização das informações e síntese interpretativa dos achados. Para reforçar a confiabilidade das interpretações, adotou-se a triangulação entre documentos científicos, técnicos e institucionais, ampliando a robustez metodológica do estudo.

Para orientar o processo analítico, foram definidas cinco categorias centrais que estruturam a discussão ao longo do trabalho. A primeira aborda os impactos técnicos das intermitências, destacando como a variabilidade das fontes renováveis repercute na estabilidade, no controle e na operação do sistema elétrico. A segunda categoria examina as estratégias de mitigação, que incluem soluções tecnológicas, operacionais e regulatórias destinadas a reduzir tais efeitos e aprimorar a confiabilidade das redes. A terceira reúne experiências nacionais e internacionais, permitindo comparar diferentes abordagens adotadas em contextos diversos e identificar modelos de referência. A quarta categoria discute as barreiras e lacunas ainda existentes, evidenciando limitações técnicas, regulatórias, institucionais e econômicas que dificultam a plena integração das soluções analisadas. Por fim, a quinta categoria apresenta as perspectivas futuras, analisando tendências emergentes, oportunidades de avanço e caminhos potenciais para o fortalecimento das redes elétricas inteligentes frente à intermitência das fontes renováveis.

Essas categorias funcionaram como eixos estruturantes para a organização dos resultados, permitindo compreender de forma integrada a relação entre intermitência, operação do sistema elétrico e estratégias já aplicadas ou em desenvolvimento para ampliar a confiabilidade e flexibilidade das redes inteligentes. A síntese final dos achados concentrou-se na integração das diferentes abordagens identificadas, comparando experiências internacionais ao contexto brasileiro e destacando aspectos críticos para o aprimoramento regulatório, tecnológico e institucional. Esse processo possibilitou elaborar uma interpretação consistente e alinhada às tendências globais de modernização do setor elétrico, oferecendo subsídios relevantes para discussões futuras sobre planejamento energético, inovação e políticas públicas voltadas à transição energética no Brasil. A Figura 1 apresenta o fluxograma que descreve, de forma sequencial, as etapas da metodologia adotada neste estudo.

3 Resultados e discussões

Foram revisados 31 documentos publicados entre 2015 e 2024, incluindo relatórios de agências reguladoras, estudos de caso e publicações técnicas internacionais. Com base na análise do material selecionado, esta seção organiza a discussão em torno de quatro temas principais: os impactos técnicos da intermitência de energias renováveis em redes inteligentes (Subseção 3.1); as estratégias propostas para mitigar esses impactos (Subseção 3.2); um panorama das experiências nacionais e internacionais relevantes para o contexto brasileiro (Subseção 3.3); e, por fim, a identificação de barreiras e lacunas que ainda limitam a integração efetiva dessas fontes de energia ao sistema elétrico (Subseção 3.4).

3.1 Impactos técnicos das intermitências

A intermitência inerente às fontes renováveis, especialmente a energia solar fotovoltaica e a eólica, representa um grande desafio para a operação das redes elétricas modernas. A geração de energia dessas fontes varia devido a fatores meteorológicos, como a irradiação solar e a velocidade do vento, dificultando a previsão da geração horária e diária. De acordo com a IRENA (2020), essa volatilidade pode levar a

flutuações repentinas de frequência e tensão, o que pode comprometer a estabilidade do sistema, especialmente em redes de baixa inércia, que são menos capazes de absorver variações rápidas na geração.



Figura 1. Fluxograma da metodologia apresentada.

No Brasil, a geração distribuída (GD) solar está sendo cada vez mais integrada, principalmente em áreas residenciais e comerciais. Isso ocorre tanto em áreas com infraestrutura de distribuição limitada quanto em grandes centros urbanos com boa infraestrutura elétrica, de acordo com dados da ANEEL (2024). No entanto, essa expansão também traz desafios. Dados do ONS (2024) mostraram que durante os períodos de pico de radiação solar, como o início da tarde, o aumento de tensão em subestações urbanas de médio porte tem registrado elevações de tensão que ultrapassam os limites operacionais propostos pelo PRODIST. Quando essas sobretensões ocorrem com frequência, podem causar o desligamento automático do sistema fotovoltaico, degradação do equipamento e, em casos extremos, falhas no fornecimento. Esse problema é mais sério em redes radiais e extensas, comuns em algumas cidades do interior do país. Devido às baixas capacidades de controle dinâmico, baixa disponibilidade de sistemas de compensação local, deficiência de sensores inteligentes e grandes distâncias entre os pontos de injeção de energia e os centros de carga, a coordenação entre geração, carga e regulação é mais complexa, e o sistema tem dificuldade em responder rapidamente às mudanças na geração de energia solar.

Adicionalmente, a baixa previsibilidade da geração eólica, concentrada principalmente nas regiões Nordeste e Sul do Brasil, introduz incertezas relevantes na alocação de reserva operativa e no despacho de fontes convencionais. O comportamento oscilante do vento exige a mobilização rápida de fontes termelétricas ou hidrelétricas para compensar déficits repentinos, o que afeta a eficiência econômica e aumenta os custos marginais de operação.

De acordo com a Agência Internacional de Energia (IEA), a ausência de mecanismos de previsão robustos e de estratégias de resposta rápida à variabilidade da geração eólica representa um fator crítico para a estabilidade do sistema elétrico, especialmente em países com alta penetração de fontes renováveis (IEA, 2021). Dessa forma, os impactos técnicos da intermitência se manifestam amplamente, exigindo respostas em múltiplos níveis da operação elétrica: desde a supervisão local nas distribuidoras até o controle em tempo real do Sistema Interligado Nacional (SIN) pelo ONS. A Tabela 1, a seguir, sintetiza os impactos técnicos da intermitência das fontes renováveis sobre as redes elétricas inteligentes discutidas nesta subseção.

Tabela 1. Impactos técnicos da intermitência das fontes renováveis nas redes elétricas inteligentes brasileiras. Fonte: IRENA (2020), ONS (2024) e IEA (2021).

Impacto Técnico Identificado	Descrição	Referência
Oscilações de frequência e tensão	Variações abruptas de geração afetam a estabilidade do sistema, sobretudo em redes com baixa inércia.	IRENA (2020)
Maior complexidade no despacho em tempo real	Necessidade de ajustes frequentes no despacho devido à variabilidade não controlável das fontes renováveis.	IRENA (2020)
Necessidade de reservas operacionais adicionais	Aumento da demanda por reservas girantes e rápidas para compensar oscilações de geração.	IRENA (2020)
Sobretensões em subestações urbanas	Excesso de geração solar nos horários de pico provoca elevação de tensão além dos limites operacionais definidos pelo PRODIST.	ONS (2024)
Risco de desconexões e degradação de equipamentos	Sobretensões recorrentes podem danificar equipamentos e provocar desligamentos automáticos de sistemas fotovoltaicos.	ONS (2024)
Dificuldade de controle em redes radiais extensas	Baixa capacidade de controle dinâmico, ausência de compensação local e escassez de sensores dificultam a gestão da intermitência em redes menos estruturadas.	ONS (2024)
Baixa previsibilidade da geração eólica	Oscilações no vento afetam o planejamento de reserva e exigem acionamento de fontes despacháveis.	IEA (2021)
Aumento do custo marginal de operação	A mobilização rápida de termelétricas ou hidrelétricas para compensar déficits gera impactos econômicos.	IEA (2021)
Necessidade de integração de armazenamento e resposta da demanda	Soluções como baterias e programas de resposta da demanda são essenciais para mitigar os efeitos da variabilidade da geração intermitente.	IRENA (2020); ONS (2024)
Exigência de monitoramento em tempo real	Monitoramento constante de frequência e tensão é crucial para evitar instabilidades em sistemas com alta penetração de fontes renovável.	IRENA (2020)

3.2 Estratégias de mitigação

Diante dos desafios impostos pela intermitência das fontes renováveis, diversas estratégias de mitigação vêm sendo estudadas e implementadas para assegurar a estabilidade operacional das redes elétricas inteligentes. Tais soluções envolvem desde o aprimoramento tecnológico até a adoção de novos modelos de gestão da demanda e digitalização dos sistemas. As principais abordagens podem ser observadas a seguir:

- **Armazenamento de energia:** a utilização de sistemas de armazenamento tem se consolidado como uma das formas mais eficazes de compensar a variabilidade da geração renovável. As baterias de íon-lítio, amplamente utilizadas em ambientes comerciais e industriais, permitem a absorção de excedentes de geração solar durante o dia e sua posterior liberação em horários de pico de consumo, contribuindo para o equilíbrio da rede e redução da demanda de ponta. Paralelamente, a Eletrobras estuda a implementação de usinas hidrelétricas reversíveis (bombagem), uma solução de larga

escala que armazena energia através da movimentação de água entre reservatórios em diferentes níveis, servindo como reserva estratégica para o SIN (ELETROBRAS, 2023).

- Sistemas de previsão meteorológica: o avanço de modelos de previsão baseados em aprendizado de máquina tem melhorado significativamente a acurácia na estimativa da geração renovável intermitente. No Brasil, a Neoenergia tem investido em soluções tecnológicas para apoiar a expansão da GD. Um exemplo é a plataforma Godel Conecta, desenvolvida no âmbito de projetos de P&D, que permite aos clientes identificar o melhor ponto de conexão para sistemas fotovoltaicos nas redes da concessionária, otimizando o projeto e promovendo maior eficiência no planejamento da geração solar (Neoenergia, 2023). Essas iniciativas contribuem para uma operação mais segura e eficiente, evitando sobrecargas e reduzindo a necessidade de acionamento de fontes de reserva com altos custos marginais.
- Resposta da demanda: a gestão ativa do consumo de energia elétrica, ou resposta à demanda, surgiu como uma importante estratégia complementar para mitigar a intermitência das fontes de energia renováveis. Essa abordagem consiste em grandes usuários regulares em voluntariamente seu consumo de energia elétrica em resposta a sinais do sistema elétrico, como tarifas horárias de energia ou alertas de sobrecarga operacional. A CPFL Energia se destaca na aplicação de soluções tecnológicas relacionadas a essa estratégia, como o sistema de inteligência artificial desenvolvido em parceria com a Radix no âmbito do programa de P&D da ANEEL. Segundo os dados da empresa, esse sistema consegue identificar automaticamente chamadas com alta probabilidade de falha, otimizar o despacho de equipes técnicas e ajudar a reduzir deslocamentos desnecessários em até 20%. Essa iniciativa de demonstração como a inteligência artificial pode ser integrada à resposta à demanda para melhorar a eficiência operacional, otimizar a alocação de recursos e apoiar a estabilidade do sistema elétrico em tempo real (CPFL Energia, 2023).
- Agregadores de energia: estes se tornaram um importante facilitador da otimização e flexibilidade da rede, especialmente no contexto da crescente implantação dos recursos energéticos distribuídos. Essas instituições atuam como manobras para agregar flexibilidade de pequenos usuários ou geradores (como GD, armazenamento de energia e cargas flexíveis) para fornecer serviços ao sistema elétrico, como resposta à demanda, fornecimento de energia ou mitigação de congestionamentos. O foco da Consulta Pública nº 137/2022 do MME (cujo relatório foi publicado) é reduzir os limites do mercado livre de baixa tensão para promover o desenvolvimento de agregadores. Espera-se que a formalização deste indicador regulatório estimule a participação de novas instituições no mercado, promova a concorrência e melhore a eficiência do uso de recursos distribuídos, melhorando significativamente a resiliência e a estabilidade das redes inteligentes. Internacionalmente, a função dos agregadores foi formalizada e reconhecida em diversos mercados de energia devido à necessidade de conciliar a natureza intermitente das fontes renováveis e melhorar a infraestrutura existente. Por exemplo, nos Estados Unidos, a FERC emitiu a Ordem nº 2222 em 2020, que eliminou impedimentos econômicos e permitiu que recursos energéticos distribuídos agregados participassem diretamente em mercados de capacidade, energia e serviços auxiliares administrados por Organizações de Transmissão Regionais (RTOs, do inglês Regional Transmission Organizations) e Operadores Independentes de Sistema (ISOs, do inglês Independent System Operators). Essa iniciativa resultou na criação de plataformas digitais que facilitam a agregação e a negociação desses recursos entre os mercados locais. Para maior flexibilidade, essa plataforma irá otimizar a distribuição e responder à demanda em tempo real.
- Digitalização da rede: a incorporação de tecnologias digitais à infraestrutura elétrica, por meio de sistemas SCADA, sensores PMU e plataformas de big data como o Sistema Nacional de Análise e Previsão (SINAP) do ONS, tem ampliado a capacidade de monitoramento, controle e previsão em tempo real das condições da rede. Essa inteligência operacional permite uma resposta rápida a distúrbios, melhora a coordenação entre os diferentes agentes do setor e facilita a integração de REDs, fundamentais em um cenário de crescente geração renovável. Essas estratégias, combinadas de forma sinérgica, representam um conjunto robusto de soluções voltadas para a superação dos desafios técnicos impostos pelas fontes intermitentes, sendo fundamentais para garantir a estabilidade, flexibilidade e confiabilidade das smart grids no Brasil.

3.3 Experiências nacionais e internacionais

A implementação de projetos-piloto tem sido essencial para testar, validar e adaptar soluções voltadas à integração de fontes renováveis intermitentes em redes elétricas inteligentes. No Brasil, diversas iniciativas

demonstram como diferentes arranjos tecnológicos e operacionais podem ser aplicados com sucesso em contextos regionais variados, respeitando as especificidades socioeconômicas e estruturais do país.

Um exemplo emblemático é o projeto da CPFL Energia em Campinas (SP), onde foram instalados sistemas de medição inteligente, equipamentos de automação em tempo real e redes de comunicação de dados para controle distribuído. A experiência resultou em maior eficiência operacional, redução de perdas técnicas e melhoria nos indicadores de continuidade do serviço de Duração equivalente de interrupção por unidade consumidora (DEC) e Frequência equivalente de interrupção por unidade consumidora (FEC). Já no município de Aparecida (SP), a EDP conduziu um projeto de modernização da rede com foco na integração de GD solar e armazenamento em baterias, permitindo testes de operação ilhada e fornecimento contínuo de energia mesmo em falhas na rede principal. Em Fernando de Noronha, a Neoenergia desenvolveu um modelo híbrido que combina geração fotovoltaica, sistemas de armazenamento em baterias de lítio e gestão automatizada via rede 5G. A solução permitiu uma redução de 50% no uso de geradores a diesel, contribuindo significativamente para a descarbonização local (NEOENERGIA, 2023).

No cenário internacional, destacam-se as experiências da Dinamarca e da Califórnia (EUA), que figuram como referências globais na construção de sistemas energéticos flexíveis e descentralizados. Na Dinamarca, mais de 50% da eletricidade consumida provém de fontes eólicas, viabilizadas por sistemas avançados de controle e previsibilidade que operam em sinergia com interconexões regionais. O país desenvolveu mecanismos de mercado que valorizam serviços ancilares fornecidos por GD e unidades de armazenamento. Na Califórnia, a integração de energias renováveis superou 35% da matriz elétrica estadual, sendo apoiada por políticas públicas robustas e incentivos à inovação tecnológica. O mercado local inclui remuneração por flexibilidade, agregadores de demanda e participação ativa de consumidores com geração própria (IEA, 2022).

Essas experiências, tanto nacionais quanto internacionais, sintetizadas no Tabela 2, evidenciam que a viabilidade técnica e econômica da integração de fontes intermitentes depende de uma combinação de fatores: desenvolvimento tecnológico, arcabouço regulatório favorável, incentivo à inovação e forte articulação entre os agentes do setor. Elas oferecem lições valiosas para o Brasil, que possui grande potencial renovável, mas enfrenta desafios estruturais e institucionais que exigem soluções customizadas e políticas públicas consistentes.

Tabela 2 - Comparativo de estratégias de mitigação entre o Brasil e o cenário internacional. Fonte: EPE (2023), IEA (2022), Neoenergia (2023), CPFL (2020), ANEEL (2021).

Estratégia de mitigação	Brasil (Nacional)	Internacional
Armazenamento de energia	Projetos-piloto com baterias de lítio (Neoenergia, CPFL); estudos com hidrelétricas reversíveis (Eletrobras)	Armazenamento em larga escala (Dinamarca, Califórnia) com integração ao mercado
Previsão meteorológica avançada	Modelos com inteligência artificial - IA em uso pela Neoenergia; acurácia de até 85%	Modelos híbridos meteorológicos-satelitais com aprendizado de máquina (IEA)
Resposta da demanda	Projeto IREC (CPFL) com indústrias e comércios	Remuneração direta por flexibilidade (Califórnia, Alemanha)
Digitalização da rede	Uso de SCADA, PMUs e SINAP (ONS)	Infraestrutura avançada com blockchain e IoT (Países Nórdicos)
Agregadores de energia	Em fase regulatória (Consulta Pública ANEEL nº 137/2021)	Operacionalizados via plataformas digitais e participação ativa em mercados locais

3.4 Barreiras e lacunas

Apesar dos avanços tecnológicos e da crescente incorporação de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira, ainda persistem barreiras significativas que dificultam a consolidação das redes elétricas

inteligentes e a integração eficiente da geração intermitente. Entre os principais entraves, destacam-se os desafios financeiros e regulatórios. A ausência de mecanismos estáveis de financiamento para projetos de armazenamento e automação, bem como a incerteza quanto à remuneração por serviços ancilares prestados por REDs, desestimula investimentos em soluções de maior complexidade tecnológica. Do ponto de vista normativo, o marco regulatório brasileiro ainda é pouco responsivo às exigências operacionais de redes inteligentes, carecendo de dispositivos que favoreçam a interoperabilidade entre sistemas, a regulação de agregadores de energia e a precificação de atributos como flexibilidade, confiabilidade e previsibilidade (ANEEL, 2023; EPE, 2024).

Outro obstáculo relevante é a carência de profissionais qualificados em áreas como inteligência artificial aplicada ao setor elétrico, ciência de dados para previsão energética, cibersegurança em redes críticas e engenharia de sistemas de potência com foco em GD. Essa lacuna de competências impacta diretamente a velocidade de implementação das tecnologias necessárias, sobretudo em concessionárias de pequeno e médio porte, que não dispõem de centros de pesquisa próprios. A padronização técnica também se apresenta como um gargalo: a ausência de protocolos universais para comunicação entre equipamentos de diferentes fabricantes dificulta a integração entre sistemas de automação, controle e proteção, comprometendo a escalabilidade das soluções adotadas (ANEEL, 2023; EPE, 2024).

Adicionalmente, observa-se uma escassez de estudos quantitativos sobre os impactos operacionais da intermitência em redes de distribuição. Faltam modelagens e simulações específicas para o sistema brasileiro, que levem em conta particularidades como os longos alimentadores em áreas rurais, a baixa robustez de algumas infraestruturas e o comportamento heterogêneo da demanda. De acordo com a BloombergNEF (2023), o Brasil ainda não possui uma estratégia nacional clara para o armazenamento de energia, o que representa um dos principais entraves à expansão da participação renovável no sistema. Essa lacuna estratégica impede que o país aproveite plenamente seu potencial técnico e econômico, além de comprometer o atingimento de metas climáticas de longo prazo. Superar essas barreiras exige articulação entre agentes reguladores, formuladores de políticas públicas, setor privado e instituições de ensino e pesquisa, em uma agenda integrada de desenvolvimento tecnológico e capacitação institucional.

Nesse contexto, as barreiras à integração de fontes intermitentes em smart grids podem ser agrupadas em três categorias principais: técnicas, regulatórias e institucionais. A Tabela 3 sintetiza essas barreiras, evidenciando suas descrições e os impactos estimados sobre a modernização do sistema elétrico brasileiro.

Tabela 3 - Barreiras técnicas, regulatórias e institucionais à integração de fontes intermitentes nas Redes Elétricas Inteligentes brasileiras. Fonte: Adaptado de ANEEL (2021), BloombergNEF (2023), EPE (2023), ONS (2024).

Categoria	Descrição da Barreira	Impacto Estimado
Técnica	Falta de padronização técnica e interoperabilidade entre equipamentos	Compromete a integração de soluções em larga escala
Regulatória	Ausência de mecanismos de remuneração por serviços ancilares; regulação incipiente de agregadores	Desestimula investimentos e limita modelos de negócio inovadores
Institucional	Carência de profissionais qualificados em inteligência energética e cultura de inovação limitada	Retarda a adoção tecnológica e dificulta a operação eficiente das redes

3.5 Perspectivas futuras

A evolução do setor elétrico brasileiro rumo à integração plena de fontes renováveis intermitentes e à consolidação das redes inteligentes depende de avanços estratégicos no planejamento energético, na regulação e na adoção de inovações tecnológicas. A modernização do Planejamento Decenal de Expansão de Energia (PDE), conduzido pela EPE, é uma etapa essencial para incorporar critérios de flexibilidade, digitalização e resiliência na expansão da matriz elétrica. Paralelamente, o aprimoramento do PRODIST, regulamentado pela ANEEL, deve refletir as novas exigências operacionais impostas pelos REDs, com foco na harmonização de normas técnicas, padronização de protocolos de comunicação e incentivos à geração local com valor sistêmico.

A regulamentação de novos agentes do setor elétrico, como os agregadores de carga e GD, constitui uma das estratégias mais promissoras para a consolidação de modelos de negócio inovadores voltados à

modernização das redes. A Consulta Pública nº 44/2023 da ANEEL propõe a implementação de um *sandbox* regulatório que permitirá a avaliação controlada de projetos-piloto voltados à prestação de serviços ancilares por unidades consumidoras com GD, armazenamento e controle inteligente de carga. Entre esses serviços, destacam-se o controle de tensão, o suporte à frequência, a reserva girante, a inércia sintética e o despacho reativo localizado, todos essenciais à estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico em tempo real. Essa estrutura poderá viabilizar, por exemplo, a atuação de conjuntos de sistemas fotovoltaicos com baterias, localizados em ambientes urbanos, na oferta de suporte dinâmico à rede elétrica, com a devida remuneração pelos serviços prestados. Trata-se de uma inflexão importante no modelo centralizado tradicional, promovendo maior flexibilidade, descentralização e eficiência na operação do sistema elétrico nacional.

Outro ponto central para o futuro das redes elétricas inteligentes no Brasil está na adoção intensiva de tecnologias emergentes. A aplicação de inteligência artificial para previsão de demanda e geração, blockchain para transações energéticas seguras e internet das coisas (IoT, do inglês *Internet of Things*) para gerenciamento em tempo real de ativos distribuídos são tendências consolidadas em países líderes no setor. A incorporação dessas soluções exige, entretanto, investimentos robustos em infraestrutura digital, capacitação técnica e cibersegurança. Além disso, o alinhamento com políticas públicas voltadas à sustentabilidade, como os compromissos de redução de emissões e o incentivo à mobilidade elétrica, pode ampliar a sinergia entre os setores de energia, transporte e habitação, fortalecendo o papel das redes elétricas inteligentes como catalisadoras da transição energética brasileira.

4 Conclusão

A variabilidade inerente às fontes renováveis intermitentes, como a solar fotovoltaica e a eólica, impõe desafios significativos à estabilidade, confiabilidade e planejamento operacional das redes elétricas inteligentes no Brasil. Este artigo demonstrou que, embora o país disponha de um potencial renovável expressivo e de iniciativas tecnológicas promissoras, ainda existem barreiras técnicas, regulatórias e institucionais que dificultam a plena integração dessas fontes ao SIN.

A principal contribuição científica desta pesquisa consiste na sistematização crítica dos impactos causados pela intermitência sobre as redes elétricas inteligentes brasileiras e na análise das estratégias de mitigação atualmente em curso. Ao articular dados técnicos, estudos de caso e experiências nacionais e internacionais, o trabalho fornece uma base teórica e prática para o aprimoramento da governança energética e para a formulação de políticas públicas orientadas à resiliência e à eficiência do sistema elétrico.

Os resultados evidenciam a urgência de fortalecer a infraestrutura digital, ampliar o uso de tecnologias preditivas e de armazenamento, revisar o marco regulatório para reconhecer novos agentes como agregadores de energia, e investir na qualificação técnica dos profissionais do setor. A integração bem-sucedida de recursos energéticos distribuídos dependerá, em grande medida, da articulação entre inovação tecnológica, viabilidade econômica e segurança operacional.

Como linhas futuras de pesquisa, recomenda-se o desenvolvimento de modelos computacionais aplicados à simulação dinâmica de redes híbridas com múltiplas fontes intermitentes e armazenamento descentralizado; a realização de estudos de impacto da GD em redes de distribuição rurais, caracterizadas por baixa robustez e escassez de controle dinâmico; e a avaliação quantitativa da contribuição dos recursos distribuídos na prestação de serviços ancilares ao sistema. Essas abordagens são essenciais para orientar decisões regulatórias, viabilizar soluções customizadas à realidade elétrica brasileira e consolidar as redes elétricas inteligentes como pilares da transição energética nacional.

Referências bibliográficas

Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL (2023). Consulta Pública nº 044/2023: Proposta de Sandbox Regulatória sobre Controle de Tensão por meio da Prestação de Serviços Ancilares. Brasília: ANEEL. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/assuntos/noticias/2023/consulta-publica-discutira-sandbox-de-controle-de-tensao>. Acesso em: 14 abr. 2025.

Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL (2022). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST. Brasília: ANEEL. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br/centrais-de-conteudos/procedimentos-regulatorios/prodist>. Acesso em: 15 abr. 2025.

- Agência Nacional De Energia Elétrica – ANEEL (2020). Relatório de Gestão. Brasília: ANEEL. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aprt20216658_2.pdf. Acesso em: 19 abr. 2025.
- BloombergNEF (2023). Market outlook for energy storage in the second half of 2023. Bloomberg Finance L.P. Disponível em: <https://about.bnef.com/insights/clean-energy/2h-2023-energy-storage-market-outlook/>. Acesso em: 10 abr. 2025.
- Brasil (2022). Ministério de Minas e Energia. MME publica resultado de consulta pública sobre liberdade de escolha para todos os consumidores de energia elétrica. Brasília, DF, 28 dez. 2022. Disponível em: <https://www.gov.br/mme/pt-br/assuntos/noticias/mme-publica-contribuicoes-recebidas-sobre-liberdade-de-escolha-para-todos-os-consumidores-de-energia-eletrica>. Acesso em: 07 jul. 2025.
- CPFL Energia (2023). CPFL utiliza inteligência artificial para reduzir chamados improcedentes. Campinas: CPFL Energia. Disponível em: <https://www.grupocpfl.com.br/noticia/cpfl-utiliza-inteligencia-artificial-para-reduzir-chamados-improcedentes-da-cpfl-energia>. Acesso em: 20 mai. 2025.
- Eletrobras (2023). Regulamentação para o Armazenamento de Energia Elétrica, incluindo Usinas Hidrelétricas Reversíveis. Brasília, 2023. Disponível em: <https://www2.aneel.gov.br/cedoc/air2023001sgm.pdf>. Acesso em: 15 abr. 2025.
- Empresa de Pesquisa Energética – EPE (2023). Plano Decenal de Expansão de Energia. Brasília: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/Plano-Decenal-de-Expansao-de-Energia-2023>. Acesso em: 20 abr. 2025.
- U.S. Federal Energy Regulatory Commission – FERC (2020). Order No. 2222: Participation of Distributed Energy Resource Aggregations in Markets Operated by Regional Transmission Organizations and Independent System Operators. Washington, D.C.: FERC. Disponível em: <https://www.piclo.energy/blog/what-is-ferc-order-2222-and-what-is-its-meaning-for-distributed-energy-resources-in-the-us>. Acesso em: 07 jul. 2025.
- International Energy Agency – IEA (2022). World Energy Outlook. Paris: IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/world-energy-outlook-2022>. Acesso em: 11 abr. 2025.
- International Energy Agency – IEA (2021). Renewables 2021: Analysis and forecast to 2026. Paris: IEA. Disponível em: <https://www.iea.org/reports/renewables-2021>. Acesso em: 18 mai. 2025.
- International Renewable Energy Agency – IRENA (2020). Global Renewables Outlook: Energy transformation 2050. Abu Dhabi: IRENA. Disponível em: <https://www.irena.org/publications/2020/Apr/Global-Renewables-Outlook-2020>. Acesso em: 25 mai. 2025.
- International Renewable Energy Agency – IRENA (2019). Innovation Landscape for a Renewable-Powered Future: Solutions to integrate variable renewables. Abu Dhabi: IRENA. Disponível em: <https://www.irena.org/Publications/2019/Feb/Innovation-landscape-for-a-renewable-powered-future>. Acesso em: 09 abr. 2025.
- Neoenergia (2024). Relatório Anual de Sustentabilidade 2023. Salvador: Neoenergia S.A. Disponível em: <https://www.neoenergia.com/documents/d/guest/relatorio-anual-de-sustentabilidade-2023-neoenergia>. Acesso em: 12 abr. 2025.
- Operador Nacional do Sistema Elétrico – NOS (2024). Relatório Anual 2024. Brasília: ONS. Disponível em: <https://proxyporais.ons.org.br/ons.portalempregado.proxy/api/arquivosmonitorar?codigo=DL-6743518518-45735-X>. Acesso em: 12 abr. 2025.