

# REDES ELÉTRICAS INTELIGENTES (SMART GRIDS): O DESAFIO DA ENGENHARIA NA TRANSIÇÃO GLOBAL PARA MATRIZES ENERGÉTICAS 100% RENOVÁVEIS

SMART GRIDS: THE ENGINEERING CHALLENGE IN THE GLOBAL  
TRANSITION TO 100% RENEWABLE ENERGY MATRICES

Engenharias • 27/10/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/793080577](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/793080577)

---

Michel Silva do Carmo<sup>1</sup>

---

## RESUMO

A transição para matrizes elétricas com participação crescente de fontes renováveis variáveis exige uma transformação simultaneamente física, digital e institucional das redes de energia. Este artigo analisa o papel das redes elétricas inteligentes na integração de geração solar e eólica, destacando desafios associados à intermitência, ao fluxo bidirecional de potência, à geração distribuída, ao armazenamento, à resposta da demanda, à digitalização e à regulação. A pesquisa possui natureza qualitativa e bibliográfica e utiliza oito obras brasileiras recentes, publicadas entre 2025 e 2026, selecionadas por sua aderência aos temas *smart grids*, transição energética, *curtailment*, microrredes, inteligência artificial e geração fotovoltaica distribuída. Como complemento analítico, apresenta-se um cenário numérico ilustrativo de balanço horário de potência para demonstrar o dimensionamento energético mínimo de um sistema de baterias diante de um déficit de geração renovável. Os resultados indicam que redes inteligentes são infraestrutura habilitadora para elevar a participação renovável, mas a aproximação de uma matriz 100% renovável depende de flexibilidade sistêmica, reforços de transmissão e distribuição, armazenamento, previsões de geração, coordenação regulatória e gestão ativa da demanda. Conclui-se que o desafio da engenharia não se resume a substituir fontes de geração: envolve redesenhar a operação do sistema elétrico como uma plataforma digital, resiliente e bidirecional.

**Palavras-chave:** Redes elétricas inteligentes; Energias renováveis; Armazenamento de energia; Geração distribuída; Transição energética.

## ABSTRACT

The transition toward electricity matrices with increasing shares of

variable renewable sources requires a simultaneous physical, digital and institutional transformation of power grids. This article analyzes the role of *smart grids* in integrating solar and wind generation, emphasizing challenges related to intermittency, bidirectional power flows, distributed generation, storage, demand response, digitalization and regulation. The study is qualitative and bibliographic and uses eight recent Brazilian works published between 2025 and 2026, selected for their relevance to *smart grids*, energy transition, *curtailment*, microgrids, artificial intelligence and distributed photovoltaic generation. As an analytical complement, an illustrative numerical power-balance scenario is presented to demonstrate the minimum energy sizing of a battery system under a renewable generation deficit. The results indicate that *smart grids* are enabling infrastructure for increasing renewable penetration, but approaching a 100% renewable matrix depends on system flexibility, transmission and distribution reinforcement, storage, generation forecasting, regulatory coordination and active demand management. It is concluded that the engineering challenge goes beyond replacing generation sources: it requires redesigning power-system operation as a digital, resilient and bidirectional platform.

**Keywords:** Smart grids; Renewable energy; Energy storage; Distributed generation; Energy transition.

## 1. INTRODUÇÃO

A transição energética contemporânea altera profundamente a forma como os sistemas elétricos são planejados e operados. A expansão das fontes solar fotovoltaica e eólica reduz a dependência de combustíveis fósseis e amplia a possibilidade de descarbonização, mas também introduz variabilidade temporal, incerteza de previsão e maior dispersão espacial da geração. Em

sistemas historicamente estruturados para transportar energia em sentido predominante, das grandes usinas para os consumidores, a presença crescente de geração distribuída e de produtores modifica o fluxo de potência e exige novas capacidades de supervisão, proteção, medição e controle.

Nesse contexto, as redes elétricas inteligentes, ou *smart grids*, podem ser compreendidas como uma evolução das redes convencionais baseada na integração entre infraestrutura elétrica, sensores, medidores inteligentes, telecomunicações, automação, sistemas de informação e técnicas avançadas de análise de dados. Borges et al. (2026) associam a digitalização inteligente da rede à convergência entre eficiência operacional, participação de consumidores-produtores e integração de fontes renováveis. Essa convergência revela que a transformação do setor elétrico não depende apenas da expansão da capacidade instalada, mas da capacidade de coordenar ativos cada vez mais distribuídos e dinâmicos.

A questão torna-se mais complexa quando se considera o objetivo, frequentemente presente em cenários de longo prazo, de ampliar a participação renovável até níveis muito elevados ou próximos de 100%. A variabilidade da geração eólica e solar pode produzir excedentes em determinados períodos e déficits em outros, exigindo mecanismos de flexibilidade. Martins, Ferraz e Ferraz (2026) destacam que a intermitência afeta estabilidade, previsibilidade e operação, enquanto Amorim e Ferraz (2026) mostram que o *curtailment* decorre da combinação entre limitações de transmissão, baixa flexibilidade e excedentes de geração que não encontram demanda ou capacidade de escoamento.

Além dos desafios de balanço entre geração e carga, a geração distribuída fotovoltaica modifica parâmetros elétricos das redes de baixa tensão. Silva et al. (2026) identificam impactos associados à elevada penetração fotovoltaica, como alterações nos níveis de tensão, fluxo reverso de potência, qualidade da energia e necessidade de revisão de critérios operacionais. Esses fenômenos evidenciam que uma matriz renovável não pode ser analisada isoladamente da infraestrutura de rede que a conecta aos consumidores.

A digitalização oferece parte das respostas necessárias. Medição avançada, automação da distribuição, previsão baseada em dados, controle de inversores e inteligência artificial ampliam a observabilidade do sistema e permitem decisões mais rápidas. Maia, Maia e Costa (2025) discutem a relação entre inteligência artificial, infraestrutura digital e transição energética, mostrando que a própria economia digital aumenta a demanda por energia ao mesmo tempo em que cria instrumentos para otimizar sua gestão. Souza e Mestria (2025), por sua vez, relacionam as redes inteligentes à integração tecnológica da Indústria 4.0 e aos desafios técnicos, econômicos, organizacionais, políticos e ambientais.

Em escala local, microrredes e estratégias de ilhamento controlado constituem outro componente importante. Jerónimo et al. (2026) mostram que microrredes em comunidades remotas combinam geração renovável, armazenamento e estratégias de controle para elevar confiabilidade e ampliar acesso à energia. Em paralelo, Lobo et al. (2026) evidenciam que o excesso de geração fotovoltaica demanda soluções técnicas e regulatórias, incluindo baterias, gestão da demanda e estudos de capacidade de hospedagem das redes.

Diante desse cenário, define-se o seguinte problema de pesquisa: de que maneira as redes elétricas inteligentes podem viabilizar a integração massiva de fontes renováveis e quais desafios técnicos, operacionais e regulatórios precisam ser superados para aproximar os sistemas elétricos de matrizes 100% renováveis? A questão é relevante porque o aumento da participação renovável modifica simultaneamente geração, transmissão, distribuição, consumo e regulação.

O objetivo geral deste estudo é analisar o papel das *smart grids* como infraestrutura habilitadora da transição para matrizes elétricas de alta participação renovável. Como objetivos específicos, busca-se: discutir a transformação das redes convencionais em redes digitais e bidirecionais; examinar os impactos da intermitência e da geração distribuída; analisar armazenamento, flexibilidade e microrredes como mecanismos de integração; identificar desafios de digitalização e regulação; e apresentar um exercício quantitativo simplificado de balanço de potência e dimensionamento de armazenamento.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. Redes Elétricas Inteligentes e Digitalização do Sistema de Potência**

A rede elétrica convencional foi concebida em torno de uma arquitetura predominantemente centralizada, com grandes unidades geradoras, níveis sucessivos de transmissão e distribuição e consumidores localizados no extremo final da cadeia. O avanço da geração distribuída rompe essa linearidade e transforma o consumidor em agente capaz de produzir, armazenar e gerenciar

energia. Nesse novo arranjo, a informação passa a ter valor operacional comparável ao da própria infraestrutura física, pois decisões sobre despacho, proteção, qualidade e equilíbrio energético dependem de dados em tempo quase real.

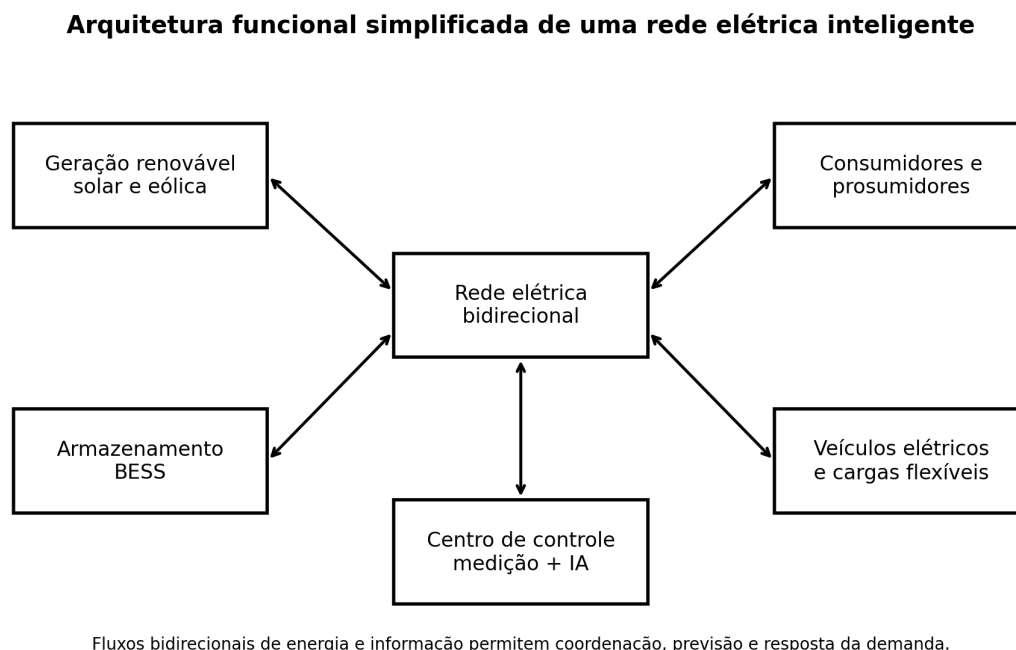
Borges et al. (2026) tratam a digitalização como uma dimensão central da modernização elétrica brasileira e destacam que descarbonização e inteligência de rede devem evoluir de forma coordenada. A digitalização possibilita medição granular, automação, supervisão remota e integração de recursos energéticos distribuídos. Ao mesmo tempo, exige interoperabilidade, segurança cibernética, telecomunicações confiáveis e padrões que permitam comunicação entre equipamentos de fabricantes e gerações tecnológicas distintas.

A integração com tecnologias da Indústria 4.0 reforça esse movimento. Souza e Mestria (2025) identificam desafios de adoção ligados a infraestrutura, custos, capacitação, aspectos organizacionais e regulação. Aplicados ao setor elétrico, esses fatores demonstram que a implementação de uma *smart grid* não se reduz à instalação de medidores inteligentes. Trata-se de uma mudança sistêmica na qual ativos físicos, sistemas computacionais e processos decisórios precisam funcionar de forma coordenada.

A inteligência artificial amplia as possibilidades de previsão e controle. Maia, Maia e Costa (2025) apontam que a transição energética e a economia digital se influenciam mutuamente. Técnicas de análise preditiva podem ser aplicadas à previsão de carga, de geração eólica e solar, à detecção de anomalias, à manutenção preditiva e ao gerenciamento de ativos. Entretanto, o uso intensivo de sistemas digitais também eleva requisitos de

governança de dados, consumo energético computacional e segurança da infraestrutura crítica.

**Figura 1.** Arquitetura funcional simplificada de uma rede elétrica inteligente



**Fonte:** elaboração própria (2026).

## 2.2. Intermitência, *Curtailment* e Necessidade de Flexibilidade

A característica variável das fontes solar e eólica altera a lógica de equilíbrio instantâneo entre geração e consumo. Diferentemente de fontes despacháveis, cuja potência pode ser ajustada de acordo com a necessidade operacional, a disponibilidade solar depende do ciclo diário e das condições atmosféricas, enquanto a geração eólica varia conforme o regime dos ventos. O problema não está na variabilidade em si, mas na capacidade do sistema de absorvê-la por meio de diversidade geográfica, transmissão, armazenamento, geração flexível, resposta da demanda e previsão.

Martins, Ferraz e Ferraz (2026) observam que o aumento da participação renovável impõe desafios à estabilidade, previsibilidade

e flexibilidade das redes elétricas inteligentes brasileiras. A resposta técnica exige maior capacidade de monitoramento, modelos de previsão meteorológica, sistemas de armazenamento e mecanismos de gerenciamento da demanda. A *smart grid* torna-se, assim, a camada de coordenação que permite converter variabilidade em um problema gerenciável.

Quando a geração disponível supera a capacidade de consumo, armazenamento ou transmissão, pode ocorrer, isto é, limitação deliberada da produção. Amorim e Ferraz (2026) associam o *curtailment* brasileiro a limitações estruturais da transmissão, intermitência e baixa flexibilidade, destacando baterias, resposta da demanda, usinas virtuais de energia e comunidades energéticas como alternativas de mitigação. A existência de excedentes não significa necessariamente abundância útil: sem infraestrutura para armazenar ou transportar a energia, parte do potencial renovável deixa de ser aproveitada.

Lobo et al. (2026) chegam a conclusão semelhante ao analisar o excedente fotovoltaico em redes de distribuição. Os autores apontam que a capacidade de hospedagem precisa ser avaliada com maior resolução temporal e que sistemas fotovoltaicos integrados a baterias podem reduzir efeitos adversos e cortes de geração. Do ponto de vista da engenharia, esse aspecto desloca a pergunta de 'quanto de renovável pode ser instalado?' para 'quanto de renovável pode ser integrado com segurança, flexibilidade e eficiência?'

### **2.3. Geração Distribuída, Fluxo Reverso e Qualidade da Energia**

A geração distribuída fotovoltaica aproxima a produção do ponto de consumo, reduz perdas em determinadas condições e amplia a participação do consumidor. Contudo, elevados níveis de penetração podem inverter o sentido do fluxo de potência em alimentadores originalmente projetados para operação unidirecional. Esse fenômeno pode provocar elevação de tensão, atuação inadequada de dispositivos de proteção, maior complexidade de coordenação e necessidade de modernização de transformadores e reguladores.

Silva et al. (2026) analisam impactos técnicos da geração fotovoltaica em redes de baixa tensão e reforçam que a integração deve considerar qualidade de energia e limites operacionais. A expansão de inversores eletrônicos também introduz novas possibilidades de controle, pois equipamentos modernos podem fornecer suporte de tensão, controle de potência reativa e resposta rápida. Assim, o inversor deixa de ser apenas interface de conexão e passa a integrar a infraestrutura ativa da rede.

A gestão inteligente da geração distribuída depende de observabilidade. Medidores inteligentes, sensores e sistemas de gerenciamento de distribuição permitem identificar congestionamentos, variações de tensão e padrões de consumo. Borges et al. (2026) associam esses recursos à construção de uma rede capaz de acomodar consumidores-produtores. Em uma matriz de alta participação renovável, a distribuição passa a exercer papel comparável ao da transmissão na coordenação do equilíbrio elétrico.

Esse processo também muda a relação entre planejamento e operação. Redes dimensionadas para picos históricos de consumo podem enfrentar novos picos de injeção em horários de forte geração solar. Por isso, os critérios de expansão devem incorporar

cenários de fluxo bidirecional, armazenamento distribuído, veículos elétricos e cargas flexíveis, além da simples projeção de crescimento da demanda.

## **2.4. Armazenamento, Microrredes e Resposta Ativa da Demanda**

O armazenamento de energia é frequentemente associado à transição renovável porque separa, no tempo, geração e consumo. Sistemas de baterias podem absorver excedentes e devolvê-los em períodos de maior demanda, além de prestar serviços de controle de frequência, suporte de tensão e redução de congestionamentos. Entretanto, o dimensionamento depende da função pretendida: baterias voltadas a serviços rápidos de potência apresentam requisitos distintos daquelas projetadas para deslocamento energético de várias horas.

Amorim e Ferraz (2026) destacam o potencial dos BESS na mitigação do *curtailment* e na melhoria da flexibilidade. Lobo et al. (2026) também apontam baterias como solução para o excesso fotovoltaico, embora ressaltem a necessidade de avaliações técnico-econômicas e regulatórias. Isso significa que o armazenamento não deve ser tratado como solução isolada, mas como componente de um portfólio que inclui expansão de redes, gerenciamento da demanda e coordenação de geração.

As microrredes representam uma aplicação concreta dessa integração. Jerónimo et al. (2026) mostram que sistemas híbridos com renováveis, armazenamento e estratégias de controle podem aumentar confiabilidade em comunidades remotas. O ilhamento intencional permite manter cargas locais mesmo quando a rede principal está indisponível, desde que existam proteção, controle e

recursos energéticos suficientes. A lógica de microrrede antecipa, em escala reduzida, características desejáveis de sistemas elétricos futuros: autonomia parcial, coordenação local, resposta rápida e integração de múltiplos recursos.

A resposta da demanda complementa o armazenamento físico. Ao deslocar cargas não essenciais para horários de maior disponibilidade renovável, reduz-se a necessidade de armazenar energia em baterias. Uma rede inteligente pode enviar sinais tarifários ou operacionais a equipamentos, edifícios, sistemas industriais e carregadores de veículos elétricos, transformando parte da demanda em recurso flexível. Em um sistema 100% renovável, essa flexibilidade do lado do consumo pode ser tão importante quanto a expansão da geração.

## **2.5. Desafios Regulatórios, Institucionais e de Engenharia**

A modernização técnica precisa ser acompanhada por regras capazes de remunerar serviços que antes não eram explicitamente valorizados. Flexibilidade, capacidade de armazenamento, resposta da demanda, serviços ancilares e redução de congestionamentos possuem valor sistêmico, mas dependem de mecanismos regulatórios que permitam sua contratação e remuneração. Amorim e Ferraz (2026) ressaltam a necessidade de modelos energéticos emergentes para ampliar a flexibilidade do sistema brasileiro.

A digitalização também cria desafios de interoperabilidade e segurança. Souza e Mestria (2025) mostram que a integração tecnológica envolve dimensões técnicas, econômicas, sociais, organizacionais, políticas e ambientais. No setor elétrico, essa multidimensionalidade é evidente: investimentos em comunicação,

automação e dados precisam ser compatíveis com tarifas, regulação, privacidade e resiliência cibernética.

Maia, Maia e Costa (2025) acrescentam que a inteligência artificial pode apoiar a transição energética, mas insere novas exigências relacionadas à infraestrutura digital. A utilização de algoritmos em decisões de operação deve ser acompanhada por critérios de confiabilidade, auditabilidade e gestão de riscos. Em sistemas críticos, a eficiência algorítmica não substitui a necessidade de redundância e supervisão humana.

Portanto, o desafio de uma matriz 100% renovável não pode ser reduzido a um problema de capacidade instalada. A engenharia deve garantir potência, energia, estabilidade, qualidade, proteção, reserva, capacidade de transmissão, observabilidade e recuperação após contingências. *Smart grids* fornecem instrumentos para coordenar esses requisitos, mas sua eficácia depende de planejamento integrado e de uma transição institucional compatível com a velocidade da transformação tecnológica.

### **3. METODOLOGIA**

A pesquisa caracteriza-se como qualitativa, exploratória e bibliográfica. O corpus foi composto por oito obras brasileiras recentes, publicadas em 2025 e 2026, identificadas por meio de busca acadêmica direcionada aos descritores redes elétricas inteligentes, *smart grids*, fontes renováveis, geração distribuída, *curtailment*, armazenamento, microrredes e inteligência artificial aplicada à transição energética. Foram priorizados trabalhos com acesso aberto e aderência direta ao problema investigado.

A análise foi organizada em cinco eixos: digitalização e arquitetura de *smart grids*; intermitência e *curtailment*; geração distribuída e qualidade da energia; armazenamento, microrredes e resposta da demanda; e desafios regulatórios e institucionais. A leitura buscou identificar convergências entre os estudos e relações entre problemas de integração renovável e soluções de engenharia propostas na literatura.

Como complemento à revisão, foi elaborado um exercício numérico de caráter didático, sem pretensão de representar uma rede real. O cenário considera seis blocos de quatro horas, com valores hipotéticos de demanda e geração solar, eólica e renovável despachável. Para cada bloco, calcula-se a potência renovável total ( $P_{ren}$ ), o balanço de potência ( $P_b = P_{ren} - P_{dem}$ ) e a energia líquida do bloco ( $E = P_b \times \Delta t$ ). Valores positivos indicam excedente potencial; valores negativos indicam déficit a ser atendido por armazenamento, intercâmbio, geração flexível ou redução de carga.

Para demonstrar o efeito da eficiência de descarga no dimensionamento de bateria, adotou-se eficiência de 90%. Assim, quando o maior déficit energético de um bloco corresponde a 160 MWh, a energia nominal mínima para entregar esse valor é calculada por  $E_{bat} = 160/0,90 = 177,8$  MWh, desconsiderando limites de estado de carga, degradação, margem de segurança e potência máxima do conversor. O cálculo tem finalidade exclusivamente ilustrativa e evidencia a diferença entre potência instantânea e capacidade energética.

#### **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

A síntese dos estudos evidencia que as *smart grids* funcionam como infraestrutura transversal da transição energética. Elas conectam geração renovável, armazenamento, cargas flexíveis, automação e informação, permitindo que decisões operacionais sejam tomadas com maior granularidade temporal. Os resultados também mostram que a digitalização não elimina limitações físicas: redes de transmissão e distribuição continuam condicionando o aproveitamento efetivo da energia produzida.

Para tornar essa relação mais concreta, a Tabela 1 apresenta um cenário didático de balanço de potência em seis blocos de quatro horas. Os valores foram construídos para representar qualitativamente um dia com elevada geração solar ao meio-dia e redução da disponibilidade solar no período noturno.

**Tabela 1.** Cenário ilustrativo de balanço de potência e energia em uma rede com alta participação renovável

| Bloco | Demanda (MW) | Solar (MW) | Eólica (MW) | Outras ren. (MW) | Preç (MW) |
|-------|--------------|------------|-------------|------------------|-----------|
| 00-04 | 70           | 0          | 35          | 25               | 60        |
| 04-08 | 80           | 10         | 30          | 25               | 65        |
| 08-12 | 95           | 55         | 25          | 25               | 105       |
| 12-16 | 100          | 70         | 25          | 25               | 120       |
| 16-20 | 120          | 20         | 35          | 25               | 80        |

⚠ Esta tabela possui muitas colunas e foi cortada para impressão. Para visualizá-la completa, acesse o artigo original em: <https://revistatopicos.com.br/artigos/redes-eletricas-inteligentes-smart-grids-o-desafio-da-engenharia-na-transicao-global-para-matrizes-energeticas-100-renovaveis?noblockage>

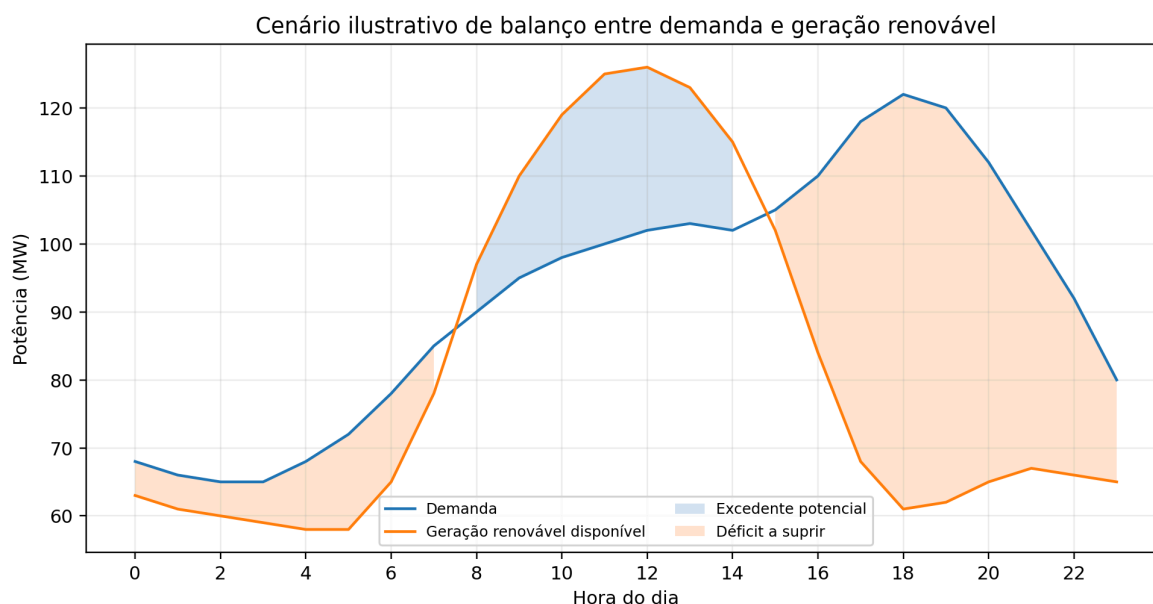
**Fonte:** elaboração própria (2026). Valores hipotéticos para fins didáticos.

O cenário mostra excedentes de 40 MWh no bloco de 08–12 h e 80 MWh no bloco de 12–16 h, totalizando 120 MWh de energia excedente nesses períodos. Em contraste, os blocos deficitários somam 380 MWh. Essa diferença demonstra que uma elevada potência renovável instalada não garante, por si só, atendimento integral da carga durante todas as horas. O resultado reforça a necessidade de combinar diversidade de fontes, armazenamento, intercâmbio energético, expansão de rede e flexibilidade da demanda.

O maior déficit de potência ocorre entre 16–20 h: a demanda é de 120 MW e a geração renovável disponível de 80 MW, produzindo déficit de 40 MW. Mantido por quatro horas, esse déficit corresponde a 160 MWh. Com eficiência de descarga de 90%, uma bateria precisaria possuir, no mínimo teórico, 177,8 MWh disponíveis antes das perdas para entregar 160 MWh à rede. Na prática, o sistema exigiria margem adicional para preservar estado de carga, vida útil, reserva e capacidade de resposta a eventos imprevistos.

Esse exercício ajuda a interpretar a discussão de Amorim e Ferraz (2026) sobre armazenamento e flexibilidade. O BESS pode deslocar energia de períodos de excedente para períodos de escassez, mas seu dimensionamento depende da duração do déficit. Uma bateria de alta potência e baixa energia pode responder a variações rápidas, porém não necessariamente sustentar a rede durante várias horas. A distinção entre MW e MWh é, portanto, central no planejamento de recursos de flexibilidade.

**Figura 2.** Cenário ilustrativo de balanço horário entre demanda e geração renovável



**Fonte:** elaboração própria (2026). Dados hipotéticos, sem representação de sistema real.

A Figura 2 apresenta o mesmo princípio em resolução horária. O cruzamento entre as curvas de demanda e geração renovável revela períodos de excedente e de déficit. Em uma *smart grid*, essas diferenças podem ser tratadas por despacho coordenado de baterias, resposta da demanda, exportação para outras regiões, controle de carregamento de veículos elétricos e, em último caso, *curtailment*.

Os achados de Martins, Ferraz e Ferraz (2026) sustentam a interpretação de que a intermitência deve ser enfrentada com planejamento e operação flexíveis. Em redes digitalizadas, previsões de curtíssimo prazo podem orientar armazenamento e consumo antes que o desequilíbrio se materialize. Isso reduz a dependência de ações corretivas e melhora a utilização dos ativos disponíveis.

O *curtailment* aparece como indicador da dificuldade de sincronizar expansão da geração e capacidade de rede. Amorim e Ferraz (2026)

mostram que cortes de geração podem decorrer tanto de limitações físicas quanto de baixa flexibilidade. Lobo et al. (2026) reforçam que o excedente fotovoltaico demanda avaliações de capacidade de hospedagem e políticas compatíveis com armazenamento e gestão da demanda. Em outras palavras, a expansão renovável deve ser acompanhada por planejamento de rede na mesma velocidade.

No nível da distribuição, Silva et al. (2026) evidenciam que elevada penetração fotovoltaica pode alterar tensão e fluxo de potência. Esse resultado é especialmente importante porque parte relevante da transição ocorre fora das grandes usinas. A *smart grid* precisa integrar milhões de pequenos recursos, exigindo automação escalável e regras técnicas para inversores, proteção e coordenação.

As microrredes analisadas por Jerónimo et al. (2026) ilustram uma resposta arquitetônica à necessidade de resiliência. Quando recursos locais são coordenados, torna-se possível operar de forma conectada ou ilhada, reduzindo a vulnerabilidade a falhas externas. Essa capacidade é relevante não apenas para comunidades remotas, mas também para hospitais, universidades, instalações industriais e áreas críticas.

A literatura também evidencia que a transição energética é uma transformação socio-técnica. Souza e Mestria (2025) mostram que a integração tecnológica enfrenta barreiras que ultrapassam o domínio estritamente elétrico. Custos, qualificação, estrutura organizacional e regulação condicionam a adoção. Da mesma forma, Maia, Maia e Costa (2025) demonstram que inteligência artificial e digitalização precisam ser avaliadas em conjunto com políticas energéticas e infraestrutura sustentável.

Borges et al. (2026) sintetizam essa convergência ao relacionar descarbonização e digitalização da rede. À medida que o sistema se torna mais renovável, aumenta a importância da informação, do controle e do armazenamento. A rede deixa de ser simples meio de transporte de eletricidade e passa a operar como plataforma de coordenação entre agentes diversos.

Dessa forma, a meta de 100% de renovabilidade deve ser entendida como desafio de sistema. Mesmo quando toda a energia anual provém de fontes renováveis, a operação horária exige garantir potência e estabilidade em cada instante. A engenharia precisa conciliar produção variável, demanda, reservas, segurança N-1, proteção, qualidade da energia e recuperação após contingências. *Smart grids* não resolvem automaticamente esses requisitos, mas fornecem a arquitetura de observação e controle necessária para coordená-los.

A análise conjunta das oito obras permite identificar cinco condições para o avanço de matrizes altamente renováveis: redes robustas e planejadas com antecedência; digitalização e observabilidade; flexibilidade por armazenamento e demanda; integração segura da geração distribuída; e regulação capaz de remunerar novos serviços. A ausência de qualquer uma dessas dimensões tende a deslocar o gargalo de uma parte do sistema para outra.

## **5. CONSIDERAÇÕES FINAIS**

O estudo analisou o papel das redes elétricas inteligentes na transição para matrizes energéticas com participação renovável muito elevada. A revisão evidencia que a principal contribuição das *smart grids* está na capacidade de coordenar, por meio de

digitalização, comunicação e automação, recursos que antes eram passivos ou centralizados. Geração distribuída, armazenamento, microrredes, inversores e cargas flexíveis tornam-se elementos ativos da operação.

A intermitência solar e eólica não constitui impedimento absoluto à expansão renovável, mas aumenta a demanda por flexibilidade. Os trabalhos analisados convergem ao apontar armazenamento, previsão, resposta da demanda, expansão de redes e gestão de excedentes como componentes complementares. O *curtailment* evidencia que instalar capacidade de geração sem ampliar a capacidade de integração pode resultar em desperdício energético e redução de eficiência econômica.

O exercício quantitativo demonstrou, em cenário hipotético, que um déficit de 40 MW durante quatro horas representa necessidade de 160 MWh de energia. Considerando 90% de eficiência de descarga, a energia nominal mínima seria 177,8 MWh, antes de margens operacionais. O exemplo evidencia por que a transição deve distinguir potência de capacidade energética e por que o dimensionamento de armazenamento depende da duração dos desequilíbrios.

Também se conclui que a distribuição assume papel estratégico. Fluxos reversos, variações de tensão e novos perfis de consumo exigem sistemas de proteção, medição e controle mais sofisticados. A expansão de microrredes e de recursos distribuídos pode aumentar resiliência, desde que acompanhada por normas técnicas, interoperabilidade e mecanismos de coordenação.

Por fim, uma matriz próxima de 100% renovável exige mais do que substituição tecnológica na geração. Trata-se de uma reorganização do sistema elétrico baseada em redes digitais, planejamento integrado, flexibilidade e governança. Recomenda-se que pesquisas futuras aprofundem análises técnico-econômicas de BESS em diferentes durações, capacidade de hospedagem de geração distribuída, uso de inteligência artificial na operação e modelos regulatórios capazes de valorar flexibilidade, serviços ancilares e resposta da demanda.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AMORIM, Eduardo; FERRAZ, Rafael. Mitigação do *curtailment* no sistema elétrico brasileiro: armazenamento em baterias, flexibilidade da demanda e novos modelos energéticos. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 13, n. 2, p. 110-124, 2026. DOI: 10.21712/lajer.2026.v13.n2.p110-124.

BORGES, Fabrício Quadros; CHAVES, Rodrigo Alves; SAMPAIO FILHO, Inaldo de Sousa; NAZARÉ, Amanda Santos de. Energia elétrica no Brasil: uma análise sobre a convergência entre a descarbonização acelerada e a digitalização inteligente da rede. *RECIMA21 - Revista Científica Multidisciplinar*, v. 7, n. 3, 2026. DOI: 10.47820/recima21.v7i3.7420.

JERÓNIMO, Venceslau Pental; CARLETTI, Daniel; AMORIM, Arthur Eduardo Alves; RIBEIRO, Daniel da Cunha; SERVARE JUNIOR, Marcos Wagner Jesus. Microrredes em comunidades remotas e ilhamento da geração distribuída: uma revisão bibliométrica com aplicação do método ProKnow-C. *South American Development Society Journal*,

v. 12, n. 35, p. 215-231, 2026. DOI: 10.24325/issn.2446-5763.v12i35p215-231.

LOBO, Fábio Xavier; NEGREIROS, Gustavo Fernandes de; TORRES, Igor Cavalcante; VILELA, Olga de Castro; NEGREIROS, Antônio Carlos Fernandes de. Gestão do excedente de geração fotovoltaica na rede elétrica: lições internacionais e caminhos para a formulação de políticas no Brasil. *Observatório de la Economía Latinoamericana*, v. 24, n. 1, e12785, 2026. DOI: 10.55905/oelv24n1-001.

MAIA, Vanessa Maria de Oliveira Accioly; MAIA, Fernando Joaquim Ferreira; COSTA, Hirdan Katarina de Medeiros. A influência da Inteligência Artificial (IA) na transição energética rumo a uma economia digital sustentável: uma análise comparativa entre Brasil e Uruguai. *Prim@ Facie*, v. 24, n. 57, 2025. DOI: 10.22478/ufpb.1678-2593.2025v24n57.77361.

MARTINS, Maria Eduarda Dantas; FERRAZ, Rafael Santos Freire; FERRAZ, Renato Santos Freire. Impacto da intermitência de fontes renováveis nas redes elétricas inteligentes brasileiras. *Latin American Journal of Energy Research*, v. 13, n. 1, p. 61-70, 2026. DOI: 10.21712/lajer.2026.v13.n1.p61-70.

SILVA, Diego Figueiredo; SENA, Gelvane Andrade; MAIA, Leonardo Tavares; FERREIRA, Mark Vitor Martins; MENEZES, Luciano Jorge. Análise dos impactos técnicos da geração distribuída fotovoltaica em redes de baixa tensão. *Revista Ibero-Americana de Humanidades, Ciências e Educação*, v. 12, n. 6, p. 1-25, 2026. DOI: 10.51891/rease.v12i6.27709.

SOUZA, Raianny; MESTRIA, Mário. Uma revisão sistemática dos desafios para implementar a Indústria 4.0 e as futuras direções da

integração entre a Indústria 4.0 e as redes elétricas inteligentes. Revista de Gestão e Secretariado, v. 16, n. 12, e5498, 2025. DOI: 10.7769/gesec.v16i12.5498.

---

<sup>1</sup> Especialista em Engenharia da Qualidade pela UFPA. E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)