REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL DO SISTEMA ELÉTRICO BRASILEIRO: FONTES RENOVÁVEIS, GERAÇÃO DISTRIBUÍDA E MODERNIZAÇÃO DA INFRAESTRUTURA

SUSTAINABLE DEVELOPMENT OF THE BRAZILIAN POWER SYSTEM: RENEWABLE ENERGY, DISTRIBUTED GENERATION AND INFRASTRUCTURE MODERNIZATION

Paulo Henrique Rochifild Rodrigues Pereira
Engenheiro Civil, Especialista em Engenharia Ambiental, Engenharia de Petróleo e Engenharia Elétrica – Sistemas de Potência, Administrador, Universidade Autónoma de Assunção, Brasil
E-mail: rochifild@hotmail.com

Joelson Lopes da Paixão
Mestre em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Brasil
E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

Filipe Molinar Machado
Doutorado em Engenharia Agrícola, Universidade Regional Integrada do Alto Uruguai e das Missões - URI, Brasil
E-mail: fmacmec@gmail.com

Marcelo Tavares Gomes de Souza
Doutor em Ciências dos Materiais, Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Brasil
E-mail: marcelomtgs@gmail.com

Jéfferson Balbino
Doutor em História. Universidade Federal de Rondônia (UNIR), Brasil
E-mail: jefferson.silva@unir.br

Ana Emília Engel Schunke
Tecnóloga em Segurança do Trabalho, pela UNISA, Universidade de Santo Amaro SP
Pós em Educação Ambiental pela faculdade de educação São Luís/Jaboticabal - São Paulo
Auxiliar de Enfermagem/TAE-HUSM/UFSM, Brasil
E-mail: ana_schunke@hotmail.com

Aline dos Reis Cota
Mestranda em Estruturas, UFOP, Brasil
E-mail: alinereis.cota@gmail.com

Eloisa Helena Venturini Borges
Graduada em Recursos Humanos e especialista em Gestão de Pública, UFSM, Brasil

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

E-mail: eloisa.venturini@gmail.com

RESUMO

A expansão das fontes renováveis e da geração distribuída redefine o sistema elétrico brasileiro, mas não elimina a necessidade de potência, flexibilidade, serviços ancilares, redes robustas e gestão dos ativos existentes. Este artigo analisa criticamente os desafios técnicos, econômicos, regulatórios, ambientais, sociais e institucionais associados a essa transição. Adotou-se revisão narrativa crítica combinada com análise documental. O levantamento, encerrado em 28 de agosto de 2026, abrangeu literatura científica revisada por pares, legislação, regulação e documentação institucional. Foi constituído corpus analítico de 41 documentos: 19 artigos revisados por pares, 12 relatórios e notas institucionais, 7 atos legais ou regulatórios e 3 normas técnicas internacionais. A síntese indica que a participação renovável de 86,8% na matriz elétrica brasileira em 2025 constitui vantagem comparativa, mas a expansão solar, eólica e distribuída amplia exigências de transmissão, observabilidade, capacidade de hospedagem e coordenação operativa. A MMGD alcançou 45,0 GW ao final de 2025. A legislação de 2025 incorporou armazenamento, autoprodução, reserva de capacidade e licenciamento à agenda regulatória concreta, embora permaneçam tensões entre neutralidade por atributos e contratações tecnológicas específicas. Conclui-se que sustentabilidade elétrica depende da coordenação entre geração, redes, armazenamento, demanda, ativos, regulação e território, com repartição transparente de custos e benefícios. A evidência é mais robusta nas dimensões técnica e regulatória; os efeitos distributivos residenciais ainda exigem investigação empírica nacional.

Palavras-chave: transição energética; sistema elétrico brasileiro; geração distribuída; fontes renováveis; flexibilidade operacional; gestão de ativos.

ABSTRACT

The expansion of renewable energy and distributed generation is reshaping the Brazilian power system, but it does not remove the need for capacity, flexibility, ancillary services, robust grids, and management of existing assets. This article critically examines the technical, economic, regulatory, environmental, social, and institutional challenges associated with this transition. A critical narrative review was combined with documentary analysis. The search, concluded on 28 August 2026, covered peer-reviewed literature, legislation, regulation and institutional documentation. An analytical corpus of 41 documents was assembled: 19 peer-reviewed articles, 12 institutional reports and technical notes, 7 legal or regulatory instruments, and 3 international technical standards. The synthesis indicates that the 86.8% renewable share of Brazil's electricity mix in 2025 is a comparative advantage, but the growth of solar, wind, and distributed generation increases requirements for transmission, observability, hosting capacity, and operational coordination. Distributed micro- and mini-generation reached 45.0 GW at the end of 2025. The 2025 legislation brought storage, self-production, capacity mechanisms, and environmental licensing into the concrete regulatory agenda, although tensions remain between attribute-based technological neutrality and technology-specific procurement. Power-system sustainability therefore depends on coordinating generation, grids, storage, demand, assets, regulation, and territory, with transparent allocation of costs and benefits. Evidence is stronger for the technical and regulatory dimensions, while residential distributional effects still require broader empirical research in Brazil.

Keywords: energy transition; Brazilian power system; distributed generation; renewable energy; operational flexibility; asset management.



REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

1 INTRODUÇÃO

A descarbonização da eletricidade ocupa posição central nas estratégias climáticas porque um sistema elétrico de baixas emissões permite reduzir emissões próprias e, simultaneamente, apoiar a eletrificação de transportes, edifícios e processos industriais (IPCC, 2023). Essa função, contudo, não autoriza tratar a transição como mera substituição de usinas fósseis por parques solares e eólicos. Sistemas elétricos operam sob restrições físicas instantâneas, dependem de infraestrutura de longa vida útil e distribuem custos e riscos por meio de instituições, tarifas e contratos. O desafio consiste em reduzir impactos ambientais sem perder confiabilidade, segurança do suprimento, qualidade da energia e acessibilidade econômica.

O caso brasileiro é particularmente relevante. A oferta de eletricidade já possui alta participação renovável e amplo sistema interligado, historicamente estruturado em torno da geração hidrelétrica e de extensas redes de transmissão. No ano-base 2025, as fontes renováveis representaram 86,8% da matriz elétrica brasileira. A geração solar fotovoltaica, somadas as modalidades centralizada e de micro e minigeração distribuída, alcançou 88,1 TWh e 64.793 MW de capacidade instalada, enquanto a fonte eólica produziu 116,5 TWh e atingiu 34.707 MW. No mesmo período, a geração hidrelétrica recuou 20,4 TWh, redução de 4,8% em relação a 2024 (EPE, 2026a). Esses números ilustram duas questões fundamentais. A primeira é que potência instalada e energia efetivamente produzida não são equivalentes. A segunda é que a diversificação renovável reduz dependências específicas, mas também modifica rampas, fluxos, congestionamentos e necessidades de reserva.

Paralelamente, a micro e minigeração distribuída (MMGD) passou de segmento periférico a componente estrutural do setor. Ao final de 2025, alcançou 45,0 GW de capacidade instalada, 7,2 milhões de consumidores e geração estimada de 54.483 GWh (EPE, 2026d). O marco legal instituído pela Lei nº 14.300/2022 consolidou o Sistema de Compensação de Energia Elétrica (SCEE) e modalidades como autoconsumo local, autoconsumo remoto, geração compartilhada e empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (Brasil, 2022). A Lei nº 15.269/2025 alterou esse marco e outras leis estruturantes, inserindo armazenamento, autoprodução e

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

mecanismos de capacidade na agenda regulatória atual (Brasil, 2025c). A expansão amplia opções de investimento e participação, porém altera a recuperação dos custos de rede, exige novas funções das distribuidoras e pode produzir efeitos distributivos quando a compensação não reflete custos e benefícios temporais, locacionais e sistêmicos.

Também seria inadequado classificar toda fonte renovável como automaticamente limpa ou sustentável. Renovabilidade descreve a reposição do recurso primário em escalas compatíveis com o uso humano. Baixo carbono se refere à intensidade de emissões, preferencialmente avaliada ao longo do ciclo de vida. Energia limpa é expressão normativa que deve ser empregada com definição explícita, pois pode ocultar mineração, ocupação territorial, alterações hidrológicas, resíduos e conflitos. Sustentabilidade, por sua vez, requer avaliação conjunta das dimensões ambiental, social, econômica, técnica e institucional. Um projeto pode ser renovável e ainda assim produzir danos territoriais desproporcionais, depender de cadeias produtivas vulneráveis ou impor custos de conexão não reconhecidos.

Uma delimitação terminológica é necessária porque finalidade jurídica, localização física e regime de MMGD não são dimensões equivalentes. Quanto à finalidade ou ao regime, distinguem-se autoprodução, produção independente e geração destinada ao consumo próprio. Quanto à localização ou conexão, o empreendimento pode estar conectado à transmissão, à distribuição, junto à carga ou em local remoto. A MMGD constitui regime específico, com microgeração, minigeração, SCEE, autoconsumo local ou remoto e geração compartilhada (Brasil, 2022). Nos termos inseridos pela Lei nº 15.269/2025 na Lei nº 9.074/1995, autoprodutor é o consumidor titular de outorga de empreendimento de geração para produzir energia por sua conta e risco, admitidas hipóteses legais de equiparação; portanto, autoprodução é condição jurídico-comercial, não classificação determinada por porte ou tensão de conexão (Brasil, 2025c). Neste artigo, geração própria é utilizada como categoria analítica abrangente, e não como categoria regulatória única equivalente aos regimes jurídicos específicos.

A literatura disponível trata esses elementos de modo predominantemente compartimentado, o que caracteriza a lacuna que motiva este trabalho. Revisões sobre recursos firmes de baixo carbono concentram-se na composição de portfólios

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

de geração sob premissas e sistemas específicos, sem incorporar a repartição institucional de custos (Sepulveda *et al.*, 2018). Revisões sobre flexibilidade sistêmica classificam medidas de balanceamento e métodos de mensuração, mas permanecem majoritariamente no plano operativo (Lund *et al.*, 2015; Impram; Varbak Nese; Oral, 2020). Estudos sobre inserção de geração distribuída privilegiam proteção, regulação de tensão e capacidade de hospedagem, com escassa articulação com desenho tarifário (Razavi *et al.*, 2019; Ismael *et al.*, 2019). A literatura de serviços ancilares em redes ativas discute viabilidade técnica e requisitos de medição, sem tratar de legitimidade territorial (Kryonidis *et al.*, 2021). A literatura de justiça energética, por sua vez, desenvolve categorias distributivas, de reconhecimento e procedimentais com pouca conexão com restrições físicas de operação (Jenkins *et al.*, 2016). Cada campo produz conhecimento consistente em seu recorte, porém a decisão setorial concreta exige que essas agendas sejam consideradas simultaneamente.

A contribuição pretendida não é ampliar qualquer um desses campos isoladamente, e sim articulá-los em um mesmo quadro analítico aplicado ao caso brasileiro, no qual coexistem matriz de alta renovabilidade, expansão acelerada de micro e minigeração distribuída, restrições de transmissão documentadas e desigualdades territoriais persistentes. Trata-se de uma contribuição de integração e de sistematização crítica, e não de produção de evidência empírica nova.

O problema de pesquisa que orienta este artigo é o seguinte: como ampliar a participação das fontes renováveis, da geração distribuída e das demais modalidades de geração própria na produção de eletricidade, preservando a confiabilidade, a segurança do suprimento, a modicidade tarifária e a sustentabilidade técnica e econômica dos sistemas existentes, sem aprofundar desigualdades nem transferir impactos socioambientais para comunidades e territórios vulneráveis?

O objetivo geral é analisar criticamente os desafios técnicos, econômicos, regulatórios, ambientais, sociais e institucionais associados à transição do sistema elétrico brasileiro, examinando de forma integrada a expansão das fontes renováveis e da geração distribuída, a necessidade de flexibilidade e armazenamento, a modernização e gestão dos ativos de rede, a repartição dos custos e benefícios e as condições necessárias à manutenção da confiabilidade e da justiça energética. A tese sustentada é que a transição elétrica sustentável depende menos de uma tecnologia

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

isolada do que da coordenação entre diversidade de recursos, redes, flexibilidade, gestão de ativos, regulação e justiça. A infraestrutura existente pode funcionar como plataforma da transição, desde que sua permanência, modernização ou desativação seja decidida por critérios transparentes.

2 PROCEDIMENTOS METODOLÓGICOS

2.1 DELINEAMENTO

O estudo adotou revisão narrativa crítica combinada com análise documental. Essa opção é adequada à natureza interdisciplinar do problema, que reúne engenharia de sistemas de potência, planejamento energético, economia da regulação, avaliação ambiental e justiça energética. A revisão não é apresentada como sistemática ou bibliométrica, pois não empregou protocolo de exaustividade, dupla triagem independente, avaliação padronizada de qualidade metodológica ou metanálise. Essa escolha é assumida explicitamente, com as consequências detalhadas na subseção 2.5.

2.2 FONTES CONSULTADAS E ESTRATÉGIA DE BUSCA

O levantamento foi realizado entre julho e agosto de 2026 e encerrado em 28 de agosto de 2026. Consultaram-se plataformas editoriais de conteúdo científico, bases bibliográficas, o IEEE Xplore, a SciELO e portais institucionais e normativos. No IEEE Xplore empregaram-se combinações de hosting capacity, ancillary services, inverter-based resources, protection, grid-forming e flexibility; na SciELO, justiça energética, geração distribuída, políticas públicas, impactos territoriais e setor elétrico brasileiro. Verificaram-se igualmente a legislação e os dados setoriais publicados até a data de encerramento. Os recursos consultados possuem naturezas distintas e são classificados no Quadro 1. As expressões orientadoras da busca, por dimensão analítica, constam no Apêndice A.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

Quadro 1 - Recursos consultados, natureza e função no corpus

Recurso consultado	Natureza do recurso	Descritores ou documentos buscados	Função no corpus
ScienceDirect	Plataforma editorial de conteúdo científico (Elsevier)	Descritores técnicos em inglês, com filtro temporal 2015-2026	Artigos de revisão sobre flexibilidade, serviços ancilares, capacidade de hospedagem e cibersegurança
MDPI	Portal de editora de acesso aberto	Descritores sobre microrredes, armazenamento e gestão de energia	Artigos empíricos e de modelagem
RePEc	Base bibliográfica especializada em economia	Descritores sobre regulação tarifária e subsídios cruzados	Literatura econômico-regulatória
IET Digital Library	Plataforma editorial de conteúdo científico (Institution of Engineering and Technology)	Descritores sobre gestão de ativos e programação de manutenção	Literatura de engenharia sobre manutenção de redes
Páginas oficiais de periódicos	Acesso direto a metadados e textos completos	Verificação de volume, número, paginação e DOI	Confirmação bibliográfica
EPE	Portal institucional de planejamento energético	Balanço Energético Nacional; Plano Decenal de Expansão de Energia; notas técnicas	Dados consolidados e cenários de expansão
ANEEL	Portal institucional regulatório	Resoluções normativas; PRODIST; dados de micro e minigeração distribuída	Marco regulatório e estatísticas setoriais
ONS	Portal institucional de operação do sistema	Notas técnicas sobre gestão de excedentes energéticos	Evidência operativa sobre restrição de geração
MME	Portal institucional de política energética	Documentos de política e planejamento	Contexto de política pública
Presidência da República	Portal oficial de legislação federal	Leis nº 14.300/2022, nº 15.190/2025, nº 15.269/2025 e nº 15.300/2025	Marco legal setorial e ambiental
IPCC, IEA e IRENA	Portais de organismos internacionais	Relatórios de avaliação, custos, redes e minerais críticos	Referencial comparativo internacional
IEEE Xplore	Base bibliográfica e biblioteca digital de engenharia	Grid-forming, inversores, serviços ancilares, proteção, flexibilidade e cibersegurança	Literatura de engenharia elétrica e de sistemas de potência
SciELO	Biblioteca científica de acesso aberto	Justiça energética, geração distribuída, governança e impactos territoriais no Brasil	Evidência brasileira sobre território, governança e políticas públicas

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

Por se tratar de revisão narrativa, os quantitativos de registros recuperados, duplicatas e exclusões não foram sistematicamente registrados. Não se apresenta fluxograma de seleção e a reprodutibilidade integral não pode ser assegurada. Foi constituído um corpus analítico final de 41 documentos selecionados por aderência ao problema de pesquisa, integralmente identificados nas referências e rastreados no Apêndice B. As buscas no IEEE Xplore e na SciELO foram direcionadas, não



REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

exaustivas, e não convertem o estudo em revisão sistemática. Scopus e Web of Science não foram consultadas sistematicamente, permanecendo essa limitação.

2.3 CRITÉRIOS DE INCLUSÃO E EXCLUSÃO

Foram priorizados trabalhos publicados entre 2015 e 2026, normas vigentes e documentos institucionais primários com dados consolidados ou metodologia explicitada. Estudos anteriores foram mantidos quando conceitualmente indispensáveis, critério aplicado a revisões seminais cujo conteúdo permanece corrente. Os critérios de inclusão foram aderência direta ao problema de pesquisa, clareza metodológica, relevância para o Brasil ou utilidade comparativa e confirmação independente dos dados bibliográficos junto ao editor ou ao registro de DOI. Excluíram-se textos promocionais, duplicidades, referências sem autoria ou procedência verificável e experiências internacionais cuja transferência ao Brasil não pudesse ser contextualizada.

2.4 COMPOSIÇÃO DO CORPUS FINAL

O corpus analítico final é composto por 41 documentos, distribuídos conforme o Quadro 2. A proporção entre literatura revisada por pares e documentação institucional reflete a natureza do objeto: dados de matriz, operação e regulação vigente estão disponíveis primariamente em fontes institucionais e legais, enquanto mecanismos técnicos, controvérsias conceituais e evidências territoriais são tratados na literatura científica.

Quadro 2 - Composição do corpus final por tipo de documento

Tipo de documento	Quantidade	Papel analítico predominante
Artigos em periódicos revisados por pares	19	Mecanismos técnicos, controvérsias conceituais e evidências empíricas
Relatórios e notas técnicas institucionais	12	Dados de matriz e operação, cenários e sínteses institucionais
Atos normativos e legais	7	Marco legal, regulatório e ambiental vigente
Normas técnicas internacionais	3	Terminologia e princípios de gestão e manutenção
Total	41	Corpus analisado nas seções 3 a 10

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

2.5 CATEGORIAS DE ANÁLISE E LIMITAÇÕES DO DELINEAMENTO

A análise foi organizada em cinco dimensões, aplicadas de forma uniforme a todo o corpus: desempenho técnico e confiabilidade; viabilidade econômica e tarifária; impactos ambientais de ciclo de vida; distribuição social e territorial de benefícios e danos; capacidade institucional de planejar, regular e operar a transição. A codificação foi realizada por leitura integral de cada documento, com registro do trecho pertinente a cada dimensão. Documentos podem contribuir para mais de uma dimensão. Evidências divergentes foram mantidas e explicitadas como controvérsia na síntese apresentada na seção 10, e não harmonizadas.

As limitações do delineamento são as seguintes. O artigo não produz simulação própria, estudo de caso inédito ou estimativa causal. A ausência de registro quantitativo das etapas da busca e de dupla triagem independente impede replicação exata e não elimina risco de viés de seleção. Não foi aplicada avaliação padronizada da qualidade metodológica individual dos estudos. A classificação do estatuto evidencial empregada neste artigo é apenas descritiva: evidência primária quantitativa; evidência científica de síntese; evidência científica primária; documento institucional de síntese ou planejamento; e referencial normativo ou conceitual. Ela identifica a natureza da fonte, não constitui instrumento validado de qualidade ou risco de viés e não substitui avaliação metodológica. A codificação nas cinco dimensões foi realizada por um único pesquisador, sem concordância entre codificadores; por isso, as convergências são sínteses interpretativas. A cobertura permanece desigual entre as dimensões, sobretudo quanto aos efeitos distributivos residenciais no Brasil. Dados de 2025 representam o período consolidado mais recente, enquanto cenários até 2035 são condicionais, não previsões garantidas.

3 DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL E TRANSIÇÃO ELÉTRICA

3.1 SUSTENTABILIDADE, CONFIABILIDADE E SEGURANÇA DE SUPRIMENTO

Desenvolvimento sustentável aplicado à eletricidade exige compatibilizar expansão dos serviços energéticos com limites ecológicos, inclusão social e continuidade operacional. Confiabilidade designa a aptidão do sistema para atender à

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

demanda com continuidade e qualidade; segurança de suprimento abrange recursos, infraestrutura, capacidade operativa e exposição a choques; e resiliência acrescenta a capacidade de antecipar, absorver, adaptar-se e recuperar-se de eventos extremos. Capacidade firme é empregada como a contribuição confiável de um recurso para atender à demanda nos períodos críticos, podendo ser estimada por capacidade acreditada ou por métricas como a capacidade efetiva de atendimento à carga (ELCC); não é sinônimo automático de potência nominal, geração termelétrica ou simples despachabilidade. Essas formulações são convenções operacionais explicitadas pelos autores.

Essas propriedades não podem ser inferidas apenas pela participação anual de renováveis. Energia, medida em MWh ou TWh ao longo de um período, expressa produção acumulada. Potência, medida em MW ou GW, expressa capacidade instantânea. Fator de capacidade relaciona a energia produzida àquela que seria gerada se a usina operasse continuamente na potência nominal. Disponibilidade indica a fração do tempo em que o ativo está apto a operar. Despachabilidade descreve a possibilidade de ajustar a produção conforme instruções operativas, dentro das restrições da tecnologia. Uma fonte variável pode ser altamente previsível em determinados horizontes, mas não completamente controlável. Uma usina despachável pode estar indisponível por falha, combustível ou restrição hídrica. Portanto, nenhum indicador isolado substitui a análise sistêmica.

O IPCC avalia que sistemas compatíveis com emissões líquidas nulas dependem de eletricidade amplamente descarbonizada, integração setorial, redes inteligentes, resposta da demanda, armazenamento e variedade de recursos (IPCC, 2022). Em modelos de descarbonização profunda, recursos firmes de baixo carbono podem reduzir custos ao complementar renováveis variáveis, baterias, transmissão e flexibilidade da demanda. Os resultados quantitativos de Sepulveda *et al.* (2018), obtidos para sistemas e premissas específicos, não devem ser transportados mecanicamente ao Brasil, mas reforçam um princípio funcional: políticas devem remunerar atributos necessários ao sistema, não apenas categorias tecnológicas.

No Brasil, reservatórios hidrelétricos, interligações regionais e diversidade de regimes de vento e radiação oferecem flexibilidade relevante. Isso não significa disponibilidade ilimitada. Secas prolongadas reduzem afluências, restrições

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

ambientais limitam operação, usos múltiplos da água criam compromissos conflitantes e mudanças climáticas alteram padrões hidrológicos. Termelétricas podem fornecer potência, reserva e resposta, mas sua contribuição precisa ser confrontada com emissões, custos, disponibilidade de combustível e risco de prolongar dependências fósseis. A decisão racional é manter, modernizar, converter ou retirar ativos conforme função sistêmica, custo total, emissões e alternativas, em vez de defender sua permanência ou eliminação por princípio.

3.2 DESCARBONIZAÇÃO COMO TRANSFORMAÇÃO SOCIOTÉCNICA

O sistema elétrico é simultaneamente físico e social. Linhas, subestações, usinas, medidores e centros de controle operam sob regras de mercado, contratos, licenciamento, capacidades profissionais e decisões territoriais. Por isso, a transição é sociotécnica: tecnologias alteram instituições, enquanto instituições definem quais tecnologias prosperam, onde são instaladas e quem paga por elas.

A redução de custos da energia solar e eólica ampliou sua competitividade. Em 2023, o custo nivelado médio global da geração solar fotovoltaica caiu 12% em relação a 2022, segundo a IRENA (2024). O custo nivelado, contudo, não representa sozinho o custo do sistema. Ele não incorpora necessariamente reforços de rede, reserva, congestionamento, perfil horário, risco de corte de geração ou custos de integração. Comparações honestas devem separar custo da usina, valor da energia produzida, contribuição para potência e serviços sistêmicos.

A sustentabilidade econômica do setor também não equivale à rentabilidade de cada projeto. Um empreendimento pode ser lucrativo e deslocar custos para outros agentes. Inversamente, um investimento em rede pode não gerar receita comercial direta, embora produza benefício coletivo ao reduzir perdas, conectar recursos e elevar a resiliência. A regulação deve tornar visíveis essas diferenças e alinhar incentivos privados ao valor sistêmico.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

4 EXPANSÃO DAS FONTES RENOVÁVEIS E IMPACTOS DE CICLO DE VIDA

4.1 DIVERSIDADE TECNOLÓGICA E COMPLEMENTARIDADE

Solar, eólica, hidráulica, biomassa e biogás contribuem de maneiras distintas. A geração fotovoltaica é modular, possui curto prazo de implantação e pode ser instalada junto à carga. Sua produção se concentra durante o dia e varia com irradiância, nebulosidade, temperatura e orientação. A eólica apresenta fatores de capacidade e perfis regionais próprios, com produção condicionada aos regimes de vento. A hidráulica pode oferecer energia, potência, controle e armazenamento em reservatórios, mas seus impactos dependem do porte, do desenho, do território e da hidrologia. Biomassa e biogás podem ser despacháveis e aproveitar resíduos, embora sustentabilidade de origem, logística, emissões atmosféricas e uso do solo precisem ser verificados.

Complementaridade não é simples coexistência anual. Deve ser examinada em escalas horárias, sazonais e espaciais. Perfis de vento noturno podem complementar a produção solar diurna. Regiões hidrologicamente distintas podem compartilhar recursos por transmissão. Armazenamento pode deslocar energia entre horas, mas não substitui automaticamente capacidade de longa duração. A resposta da demanda pode reduzir picos ou absorver excedentes quando consumidores e agregadores recebem sinais adequados. Revisões da literatura de flexibilidade classificam essas alternativas em quatro famílias, a saber, geração despachável, armazenamento em diferentes durações, gestão do lado da demanda e reforço de redes e interligações, e advertem que a escolha entre elas depende do horizonte temporal do desequilíbrio a ser tratado (Lund *et al.*, 2015).

O crescimento de solar e eólica no Brasil demonstra a velocidade da transformação. Em 2025, a geração solar total cresceu 24,7% e a eólica, 8,2%, enquanto a queda hidrelétrica mostrou que a composição anual responde a condições hidrológicas e à expansão de capacidade (EPE, 2026a). Esses dados não autorizam concluir que uma fonte substituiu outra em termos de potência firme ou serviços ancilares. Eles indicam diversificação da energia produzida e reforçam a necessidade de planejamento horário.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

4.2 EMISSÕES, MATERIAIS, TERRITÓRIO E RESÍDUOS

Fontes renováveis em geral apresentam emissões de ciclo de vida inferiores às fósseis, mas nenhuma infraestrutura é materialmente neutra. Painéis requerem vidro, alumínio, silício, cobre e outros insumos. Aerogeradores demandam aço, concreto, cobre e, em algumas configurações, elementos de terras raras. Baterias utilizam lítio, grafite, níquel, manganês ou outras químicas. Redes exigem grandes volumes de cobre e alumínio. A concentração geográfica de mineração e refino pode criar dependências, volatilidade e riscos socioambientais.

Em 2024, a demanda global de lítio cresceu quase 30%, enquanto a de níquel, cobalto, grafite e terras raras aumentou entre 6% e 8%, impulsionada por veículos elétricos, armazenamento, renováveis, redes e outros usos industriais. Os dados agregados da IEA não representam exclusivamente a geração de eletricidade. O refino permaneceu concentrado em poucos países, elevando a exposição a interrupções e tensões geopolíticas (IEA, 2025). Isso não constitui argumento para retardar a descarbonização, mas mostra que segurança energética inclui segurança mineral, diversificação, rastreabilidade e inovação em materiais.

Como recomendação interpretativa, a economia circular deve começar no projeto. Critérios de contratação podem exigir durabilidade, reparabilidade, informação sobre composição, logística reversa e planos de descomissionamento. Reciclagem de minerais reduz pressão sobre extração primária, emissões e dependência externa, embora sua escala dependa de volumes, tecnologia e viabilidade econômica. A base documental para essa recomendação é a defesa de melhor governança de dados sobre materiais críticos apresentada por IRENA e NUPI (2024), não uma avaliação empírica de políticas brasileiras de circularidade.

Os impactos territoriais também diferem. Grandes usinas e linhas podem afetar biodiversidade, paisagens, sítios culturais e modos de vida. Estudos brasileiros documentam conflitos e impactos percebidos em comunidades quilombolas atingidas por projetos solares e eólicos, com recortes localizados que não autorizam generalização nacional, mas fornecem evidência empírica de que renovabilidade não elimina injustiças territoriais (Furtado; Paim, 2024; Cavalcante; Sousa; Assis, 2025). Solar em telhados tende a demandar menos nova área, sem eliminar impactos da

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

cadeia produtiva. A nota socioambiental do PDE 2035 também reconhece interferências e desafios específicos por fonte (EPE, 2026b).

Licenciamento eficiente não significa licenciamento frágil. A Lei Geral do Licenciamento Ambiental, Lei nº 15.190/2025, estabeleceu normas gerais, modalidades e procedimentos nacionais, enquanto a Lei nº 15.300/2025 disciplinou o Licenciamento Ambiental Especial para atividades e empreendimentos estratégicos (Brasil, 2025a, 2025b). Esses marcos tornam mais concreta a tensão entre celeridade, previsibilidade, participação, análise de alternativas e proteção territorial. Para infraestrutura elétrica, a sustentabilidade exige compatibilizar prazos e coordenação institucional com estudos adequados, consulta e avaliação de impactos cumulativos. A afirmação de que corredores podem produzir efeitos superiores aos de projetos isolados permanece inferência analítica, pois o corpus não os quantifica em escala nacional.

5 GERAÇÃO DISTRIBUÍDA, GERAÇÃO PRÓPRIA E DESCENTRALIZAÇÃO

5.1 BENEFÍCIOS CONDICIONAIS E TRANSFORMAÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO

Geração própria, neste artigo, abrange analiticamente arranjos distintos, sem substituir suas categorias jurídicas. Autoprodução corresponde à condição do consumidor titular de outorga que produz energia por sua conta e risco e às hipóteses legais de equiparação, independentemente de o empreendimento se conectar à transmissão ou à distribuição (Brasil, 2025c). Produção independente possui regime próprio. A MMGD integra o regime da Lei nº 14.300/2022, conecta-se à distribuição e pode participar do SCEE por autoconsumo local, autoconsumo remoto, geração compartilhada ou empreendimento com múltiplas unidades consumidoras (Brasil, 2022). Essa taxonomia separa finalidade ou regime, localização ou conexão e regime específico de compensação.

Os benefícios potenciais incluem redução de compras da rede, diversificação de investimento, aprendizado tecnológico, participação do consumidor e, em alguns locais e horários, redução de perdas e postergação de reforços. Esses benefícios não são automáticos. Uma unidade solar que produz quando a rede local já está saturada pode agravar sobretensão e fluxos reversos. Uma instalação bem localizada,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

associada a carga flexível ou armazenamento, pode reduzir picos e melhorar o uso de ativos.

A literatura internacional consolidou o conceito de capacidade de hospedagem como o limite a partir do qual a inserção adicional de geração distribuída viola restrições operativas relativas a tensão, carregamento de condutores e transformadores, coordenação da proteção ou qualidade da energia. Revisão do estado da arte sistematiza métodos determinísticos, estocásticos e baseados em otimização para sua avaliação, e registra que regras práticas de percentual fixo sobre a demanda máxima, historicamente utilizadas por distribuidoras, são insuficientes diante da heterogeneidade dos alimentadores (Ismael *et al.*, 2019). Esse resultado é diretamente pertinente ao Brasil, onde a expansão da micro e minigeração ocorreu em ritmo superior ao da atualização dos estudos de conexão.

O estudo de Paixão, Abaide e Sausen (2021) modelou uma rede de distribuição do Sul do Brasil com geração fotovoltaica, utilizando OpenDSS, lógica fuzzy e simulação de Monte Carlo para construir cenários de inserção. Sua principal contribuição para este debate é mostrar que os impactos dependem do nível de penetração, da localização, dos perfis de geração e carga e das características da rede. A geração distribuída não deve ser tratada como carga negativa homogênea.

Revisões internacionais mostram efeitos sobre coordenação da proteção, magnitude e direção de correntes de falta, regulação de tensão e operação de dispositivos originalmente projetados para fluxos unidirecionais (Razavi *et al.*, 2019). Distribuidoras precisam, portanto, conhecer a capacidade de hospedagem de alimentadores, atualizar estudos de conexão, adotar inversores com funções avançadas, aperfeiçoar medição e integrar recursos distribuídos aos sistemas de operação. No plano normativo brasileiro, os requisitos técnicos de conexão desses recursos estão disciplinados no Módulo 3 do PRODIST (ANEEL, 2021b).

5.2 REDES COMUNS, AUTONOMIA E COMUNIDADES DE ENERGIA

Autonomia não significa independência física. A maioria dos consumidores com geração própria continua usando a rede para importar energia em horas sem produção, exportar excedentes e acessar qualidade e reserva. A infraestrutura comum presta serviço de potência, balanceamento e segurança mesmo quando a energia

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

líquida faturada é pequena. O desenho tarifário deve reconhecer esse uso sem inviabilizar investimentos socialmente úteis.

Microrredes acrescentam capacidade de coordenar cargas, geração e armazenamento em uma fronteira elétrica definida e, quando tecnicamente preparadas, operar de forma ilhada. Podem elevar resiliência de hospitais, campi, comunidades remotas e instalações críticas. Entretanto, seus resultados dependem de controle, proteção, governança, manutenção e modelo econômico (Hirsch; Parag; Guerrero, 2018).

Paixão *et al.* (2025) analisaram uma microrrede conectada à rede, composta por geração solar, eólica, bateria e recarga rápida de veículos elétricos. O algoritmo de gestão minimizou custos operacionais e incorporou degradação do armazenamento. O estudo evidencia uma condição frequentemente omitida: baterias não são recursos gratuitos. Cada ciclo produz desgaste, e a estratégia ótima depende de tarifa, eficiência, estado de carga, reserva requerida e custo de substituição. A conclusão é aplicável além da mobilidade elétrica, pois indica que a flexibilidade deve ser valorada pelo serviço prestado e pelo custo de ciclo de vida.

Comunidades de energia podem democratizar a participação ao permitir investimentos coletivos, mas exigem regras claras de governança, repartição de créditos, responsabilidade por inadimplência, proteção de dados e saída de participantes. No Brasil, iniciativas coletivas devem ser analisadas dentro das modalidades legais existentes, sem importar modelos estrangeiros incompatíveis com concessões, tarifas e estrutura do mercado nacional.

6 INTEGRAÇÃO AO SISTEMA ELÉTRICO

6.1 FLEXIBILIDADE, POTÊNCIA E SERVIÇOS ANCILARES

Sistemas elétricos equilibram oferta e demanda continuamente. O aumento de recursos variáveis altera a necessidade de rampas, reserva e previsão, mas não torna o problema insolúvel. Flexibilidade é a capacidade de ajustar injeções, consumo ou fluxos ao longo do tempo, e pode ser provida por hidrelétricas, termelétricas, armazenamento, interligações, resposta da demanda, veículos elétricos, controle de inversores e corte coordenado de geração. Levantamento da literatura sobre

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

penetração de renováveis variáveis indica que o efeito principal não é a impossibilidade do balanço, mas o deslocamento das exigências de flexibilidade para horizontes mais curtos, com aumento da relevância de rampas, previsão e reserva operativa, além da necessidade de métricas específicas para medir a flexibilidade disponível em cada sistema (Impram; Varbak Nese; Oral, 2020).

Serviços ancilares sustentam frequência, tensão, reserva, potência reativa, recomposição ou black start e resposta rápida. Máquinas síncronas tradicionalmente fornecem inércia e potência de curto-circuito. Recursos baseados em inversores podem oferecer resposta rápida, controle de potência reativa e, com projeto adequado, funções de formação de rede. Revisão recuperada no IEEE Xplore mostra que controles grid-forming podem regular tensão e frequência em sistemas de baixa inércia, mas sua aplicação exige enfrentar estabilidade, correntes de falta, testes e coordenação (Mahmoud *et al.*, 2022). A agenda também alcança redes ativas de distribuição e depende de medição e responsabilidades explícitas entre operadores (Kryonidis *et al.*, 2021). Não basta contar MWh renováveis.

Armazenamento deve ser associado à duração e ao serviço. Baterias são adequadas à resposta rápida, ao deslocamento intradiário, à redução de picos e ao controle local, mas custo e degradação limitam usos. Usinas hidrelétricas reversíveis podem fornecer potência e maior duração, condicionadas a geografia, licenciamento e investimento. A Lei nº 15.269/2025 reconheceu sistemas de armazenamento como atividade regulada, previu múltiplos serviços e tratamento específico para armazenamento hidráulico e hidrelétricas reversíveis, inserindo essas opções na política setorial e no novo contexto de licenciamento (Brasil, 2025c). Hidrogênio pode ser relevante para longa duração ou usos industriais, mas suas perdas de conversão exigem comparação com redes, resposta da demanda e demais alternativas.

6.2 MARCO REGULATÓRIO EMERGENTE DO ARMAZENAMENTO E DA CAPACIDADE

A Lei nº 15.269/2025 alterou qualitativamente o tratamento do armazenamento no Brasil. A ANEEL passou a regular, fiscalizar e estabelecer regras de remuneração e acesso para sistemas conectados ao SIN ou aos sistemas isolados; a regulamentação pode admitir operação autônoma ou integrada e múltiplos serviços,

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

como flexibilidade, potência, serviços ancilares e comercialização. A lei também incluiu projetos de armazenamento em incentivo fiscal com limite anual de renúncia, vigência de 2026 a 2030 e possibilidade de redução a zero do imposto de importação de BESS e componentes, nos termos regulamentares (Brasil, 2025c). Assim, armazenamento deixou de ser apenas alternativa tecnológica prospectiva e tornou-se objeto explícito de política e regulação.

O mesmo marco redefiniu a reserva de capacidade em termos de potência ou flexibilidade, estabeleceu critérios de rateio e previu mecanismo competitivo para geração e resposta do consumo nos horários de maior demanda. Há, contudo, tensão entre a recomendação analítica de neutralidade tecnológica por atributos e escolhas legais direcionadas, como contratações de biomassa, pequenas hidrelétricas e regras específicas para determinadas tecnologias. O artigo mantém a neutralidade como princípio normativo dos autores, mas reconhece que a legislação vigente combina competição por atributos com contratações tecnológicas explícitas (Brasil, 2025c).

A contratação deve distinguir energia, potência, flexibilidade e serviços ancilares. Mecanismos de capacidade podem assegurar recursos para momentos críticos, desde que comparem a contribuição efetiva dos recursos, considerem emissões e evitem remuneração excessiva de ativos sem desempenho verificável. A neutralidade tecnológica quanto ao atributo continua recomendação interpretativa, não descrição integral do marco vigente, que contém escolhas específicas discutidas na subseção anterior. Agregadores podem reunir recursos distribuídos, mas exigem medição, linha de base, comunicação e responsabilização.

6.3 TRANSMISSÃO, DISTRIBUIÇÃO E RESTRIÇÕES DE GERAÇÃO

A expansão de geração sem rede suficiente produz fila de conexão, congestionamento e cortes. A Agência Internacional de Energia estima que, globalmente, o investimento anual em redes, próximo de US$ 300 bilhões no início da década de 2020, precisa mais que dobrar até 2030 em trajetórias compatíveis com metas nacionais de clima e energia (IEA, 2023). A magnitude não deve ser transposta ao Brasil, mas o diagnóstico é pertinente: redes possuem prazos longos e podem se tornar gargalo quando o planejamento de geração e transmissão ocorre em ritmos distintos.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

No Sistema Interligado Nacional, a concentração de novos projetos eólicos e solares no Nordeste, combinada com a expansão da MMGD fora do controle direto do ONS, aumentou a complexidade de administrar excedentes. Nota técnica do ONS indicou que 9,4% do potencial eólico e fotovoltaico de 2024 foi restringido (ONS, 2025). O curtailment pode decorrer de limitações elétricas, balanço energético, confiabilidade, carga líquida, indisponibilidades e distribuição espacial da geração. É ferramenta operacional legítima em determinadas horas; níveis persistentes constituem evidência de desafios de coordenação e adequação sistêmica, sem equivaler automaticamente a perda econômica ou prejuízo social da mesma magnitude.

Cabe registrar o limite dessa evidência. O percentual de restrição é um dado operativo agregado e não constitui, por si, medida do custo social ou do desperdício econômico associado. A conversão desse indicador em perda de bem-estar dependeria de informações sobre contratos, custo de oportunidade da energia não gerada, alocação contratual do risco e alternativas de rede disponíveis, que não integram o documento citado nem o restante do corpus. As afirmações subsequentes sobre custo sistêmico devem, portanto, ser lidas como interpretação analítica, e não como resultado quantificado.

A resposta não consiste em prometer eliminação total de cortes, pois expandir rede para absorver todo pico raro pode ser antieconômico. O objetivo deve ser minimizar custo sistêmico por combinação de transmissão, armazenamento, demanda flexível, sinais locacionais, hibridização e regras de conexão. Contratos precisam definir alocação de riscos com transparência, evitando que geradores assumam restrições imprevisíveis ou que consumidores paguem integralmente por ativos subutilizados.

Na distribuição, a capacidade de hospedagem deve ser publicada com granularidade suficiente, sem expor informações sensíveis, e avaliada por métodos compatíveis com a heterogeneidade dos alimentadores (Ismael *et al.*, 2019). Planos de desenvolvimento precisam incorporar cenários de geração, veículos elétricos, bombas de calor e baterias. Medição inteligente e automação podem melhorar a observabilidade, porém não substituem condutores, transformadores e proteção adequadamente dimensionados.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

6.4 DIGITALIZAÇÃO E CIBERSEGURANÇA

Redes inteligentes, ou smart grids, integram medição, comunicação, automação e análise de dados para operar recursos distribuídos. Sensores e sistemas de gerenciamento possibilitam manutenção preditiva, localização de faltas, recomposição automática e tarifas horárias. Gêmeos digitais podem apoiar simulação e gestão de ativos. Esses benefícios aumentam a dependência de software, telecomunicações e dados.

A digitalização transfere vulnerabilidades de ambientes informacionais para a infraestrutura física, com potencial de impacto econômico e social (Sun; Hahn; Liu, 2018). Ahn *et al.* (2024) sistematizam modelos práticos de ataque a inversores inteligentes e propõem segurança e resiliência incorporadas ao projeto, abrangendo comunicações, firmware, controle e resposta. A evidência internacional reforça que a expansão de recursos distribuídos amplia a superfície ciberfísica e requer medidas específicas ao longo do ciclo de vida.

Decorre daí que a cibersegurança deve integrar o ciclo de vida do ativo, e não constituir camada adicionada ao final do projeto. Equipamentos conectados requerem autenticação, atualização, segmentação de redes, gestão de vulnerabilidades e planos de resposta. A interoperabilidade evita aprisionamento tecnológico e facilita a integração de fornecedores. Investimentos digitais sem governança podem criar ilhas de informação e elevar a superfície de ataque. A modernização sustentável combina tecnologia operacional, tecnologia da informação e qualificação das equipes.

7 MANUTENÇÃO, MODERNIZAÇÃO E RESILIÊNCIA DOS ATIVOS EXISTENTES

7.1 GESTÃO DE ATIVOS COMO POLÍTICA DE TRANSIÇÃO

Grande parte das redes, subestações e usinas que atenderá à demanda em 2035 já está em operação. Sua condição define a capacidade de conectar novos recursos. A terminologia adotada nesta seção segue a normalização internacional. A ISO 55000:2024 define gestão de ativos como o conjunto de atividades coordenadas por meio das quais uma organização realiza valor a partir de seus ativos, mediante equilíbrio entre custos, oportunidades, riscos e desempenho desejado ao longo do

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

ciclo de vida (ISO, 2024). A IEC 60300-3-10:2025 trata da mantenabilidade e dos programas de manutenção, descrevendo suas interfaces com confiabilidade, disponibilidade e suportabilidade, bem como os compromissos entre esses atributos ao longo do ciclo de vida do item (IEC, 2025). A IEC 60300-3-11:2009 estabelece diretrizes para políticas de gestão de falhas por meio de manutenção centrada em confiabilidade, ou RCM, aplicável a qualquer setor industrial (IEC, 2009).

Sobre essa base, as modalidades de manutenção distinguem-se do seguinte modo. A manutenção preventiva executa intervenções programadas em intervalos definidos. A manutenção baseada em condição utiliza a condição observada do ativo, obtida por inspeção ou monitoramento, como critério de decisão da intervenção. A manutenção preditiva constitui desenvolvimento dessa abordagem, ao acrescentar modelos de prognóstico que estimam o instante provável da falha ou a vida útil remanescente. Os termos não são equivalentes: toda manutenção preditiva pressupõe informação de condição, mas nem toda manutenção baseada em condição incorpora prognóstico. A manutenção corretiva atua após o defeito e permanece necessária, embora a dependência excessiva eleve interrupções e custos. A abordagem centrada em confiabilidade não seleciona uma dessas modalidades a priori: ela deriva a política de manutenção da função do item, dos modos de falha relevantes e das consequências de cada falha (IEC, 2009).

Gestão de ativos deve integrar criticidade, idade, condição, probabilidade de falha, consequência e custo do ciclo de vida. Revisão da literatura sistematiza abordagens de manutenção em sistemas de distribuição e registra lacuna no tratamento das incertezas introduzidas pela variação de carga e pela geração renovável (Mirhosseini; Keynia, 2021). Idade, isoladamente, não é medida suficiente de condição ou risco, embora possa permanecer variável explicativa relevante. A decisão entre reparar, repotenciar, digitalizar ou retirar precisa combinar dados de condição, consequência sistêmica e custo do ciclo de vida.

No plano decisório, substituir precocemente um equipamento pode desperdiçar capital e materiais, enquanto manter indefinidamente um ativo degradado pode elevar a probabilidade e a consequência da falha. A escolha entre reparar, repotenciar, digitalizar ou retirar deve combinar condição, criticidade, consequência sistêmica e custo do ciclo de vida, e não se apoiar apenas em regras de calendário. Como o

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

corpus não inclui aplicação empírica de manutenção centrada em risco a ativos do Sistema Interligado Nacional, a transposição dessas formulações ao caso brasileiro permanece hipótese de trabalho.

Repotenciação de hidrelétricas e outras usinas pode elevar eficiência ou potência com menor ocupação adicional, mas requer avaliação ambiental e de segurança. Recondução de linhas, compensação reativa e transformação de subestações podem ampliar capacidade em corredores existentes. Essas soluções devem ser comparadas com novas obras, considerando indisponibilidade durante intervenções e limites físicos.

Ativos termelétricos apresentam dilema específico. Alguns fornecem potência e serviços úteis em períodos críticos; outros podem se tornar ociosos ou incompatíveis com metas climáticas. Uma trajetória planejada pode restringir horas de operação, substituir combustíveis quando técnica e ambientalmente justificável, converter funções ou desativar unidades. O conceito de ativo encalhado não deve servir para socializar prejuízos privados automaticamente. A repartição de custos deve considerar contratos, decisões regulatórias e responsabilidade pelo risco de investimento.

7.2 RESILIÊNCIA CLIMÁTICA

Mudanças climáticas afetam geração, redes e demanda. Temperaturas elevadas reduzem a capacidade de condutores e a eficiência de equipamentos, ao mesmo tempo em que aumentam o consumo de refrigeração. Secas alteram a geração hidrelétrica e a disponibilidade de água para térmicas. Incêndios ameaçam linhas e usinas. Tempestades, inundações e ventos extremos danificam a distribuição. A IEA (2021) recomenda incorporar projeções climáticas ao planejamento, à operação e à manutenção, pois a adaptação reativa tende a ser mais cara e socialmente danosa.

Resiliência não se resume a endurecimento físico. Redundância, diversidade de fontes, microrredes para cargas críticas, estoques de componentes, equipes de emergência, comunicação com consumidores e capacidade de recomposição são igualmente relevantes. A priorização deve considerar consequências sociais. Interrupções em hospitais, sistemas de água, telecomunicações e territórios isolados geram danos muito superiores ao valor da energia não fornecida.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

Indicadores regulatórios tradicionais de continuidade são necessários, mas podem não capturar eventos raros e severos. Planos de resiliência devem testar cenários de baixa probabilidade e alto impacto, identificar dependências entre infraestruturas e definir responsabilidades por prevenção e recuperação. O custo dessas medidas precisa ser reconhecido nas tarifas quando prudente e eficiente, com metas verificáveis. Essas proposições constituem recomendações interpretativas, apoiadas na orientação geral de incorporação de projeções climáticas, e não em avaliação empírica de planos de resiliência brasileiros.

8 REGULAÇÃO, FINANCIAMENTO E REPARTIÇÃO DE CUSTOS

8.1 TARIFAS E SUBSÍDIOS

Tarifas de eletricidade desempenham funções de arrecadação e sinalização. Devem recuperar custos eficientes de energia, potência, rede e políticas públicas, sem tornar o serviço inacessível. Estruturas predominantemente volumétricas podem se tornar inadequadas quando consumidores geram parte da própria energia, mas continuam demandando capacidade de rede em outros horários.

A Lei nº 14.300/2022 criou transição para incidência gradual de componentes tarifárias sobre a energia compensada e determinou a valoração de custos e benefícios da MMGD (Brasil, 2022). A Lei nº 15.269/2025 alterou dispositivos desse marco e redefiniu aspectos do custeio e da modernização setorial, devendo ser lida conjuntamente com as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição, a Resolução Normativa nº 1.059/2023 e o Módulo 3 do PRODIST (ANEEL, 2021a, 2021b, 2023; Brasil, 2025c). O desafio permanece: benefícios locais variam com horário, localização e perfil da rede, enquanto compensações uniformes simplificam a administração, mas podem produzir subsídios cruzados.

Da Silva e Rato (2024) analisaram a regulação tarifária da geração distribuída no Brasil e identificaram persistência de subsídios cruzados com potenciais repercussões sociais e financeiras. Isso não significa que toda geração distribuída prejudique consumidores sem painéis. Significa que a remuneração deve ser baseada em valor e custo evitado comprováveis. Estudos devem incluir perdas, postergação de investimentos, emissões, capacidade, uso da rede e custos administrativos.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

Estudo quantitativo brasileiro aponta na mesma direção e acrescenta a dimensão distributiva. Santana, Monastério e Caldeira (2023) estimaram a distribuição do subsídio decorrente da alocação de custos do Sistema de Compensação de Energia Elétrica, sob a regra anterior à Resolução Normativa nº 1.059/2023, empregando curva de Lorenz, índice de concentração e índice de Kakwani. O recorte foram as unidades consumidoras de pessoas jurídicas do Estado de Minas Gerais, escolhido pela representatividade do mercado de geração distribuída e pela tratabilidade computacional. Ao cruzar a base da ANEEL com a Relação Anual de Informações Sociais, os autores identificaram subsídios mais elevados para as empresas de maior porte, o que caracteriza regressividade no interior do próprio segmento beneficiado. O alcance do resultado é estritamente delimitado: um estado, um recorte de pessoas jurídicas e um marco regulatório posteriormente alterado. Não se trata de estimativa nacional, e a conclusão não deve ser transposta ao país, ao segmento residencial nem ao regime vigente sem nova apuração.

Uma tarifa mais eficiente pode combinar componente de potência, preços temporais e mecanismos locacionais, preservando simplicidade e proteção social. Mudanças bruscas elevam risco regulatório e penalizam investimentos feitos sob regras anteriores. Transições devem ser previsíveis, com avaliação periódica e cláusulas de revisão. Subsídios, quando justificados por aprendizado, descarbonização ou equidade, precisam ter objetivo, beneficiário, fonte de custeio, prazo e indicador de saída. Esse conjunto de proposições é interpretativo e deriva do diagnóstico de subsídios cruzados, não de simulação tarifária conduzida neste estudo.

8.2 FINANCIAMENTO, INDÚSTRIA E QUALIFICAÇÃO

Projetos renováveis possuem alto custo de capital inicial e baixo custo operacional. Taxas de juros, risco cambial, licenciamento, atraso de conexão e incerteza regulatória afetam a competitividade. O setor público pode reduzir riscos por garantias, leilões, crédito e planejamento, mas não deve blindar investidores de riscos que podem gerir. Instrumentos devem privilegiar desempenho, integração e benefícios socioambientais.

A expansão também é política industrial. A dependência de módulos, inversores, baterias e componentes de rede expõe o país a câmbio, logística e

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

concentração produtiva, dimensão reforçada pela concentração do refino de minerais críticos registrada internacionalmente (IEA, 2025). Conteúdo local imposto sem escala ou produtividade pode encarecer projetos. Uma estratégia mais robusta combina pesquisa, formação, compras públicas, padrões de qualidade, reciclagem e inserção em segmentos nos quais o Brasil possui capacidades.

Qualificação profissional é condição de segurança. Engenheiros, técnicos, eletricistas, operadores, planejadores, reguladores e equipes ambientais precisam dominar eletrônica de potência, análise de dados, cibersegurança, proteção adaptativa, armazenamento e processos de participação social. A associação entre digitalização e ampliação da superfície de vulnerabilidade cibernética torna essa formação um requisito operacional, e não apenas uma agenda de recursos humanos (Sun; Hahn; Liu, 2018). A transição justa inclui a requalificação de trabalhadores de atividades em retração e a criação de oportunidades nos territórios que recebem novos investimentos. Cabe registrar que o corpus não reúne evidência empírica sobre déficits de qualificação no setor elétrico brasileiro, de modo que esta subseção tem caráter prospectivo.

9 TERRITÓRIO, PARTICIPAÇÃO E JUSTIÇA ENERGÉTICA

Justiça energética oferece estrutura para avaliar quem recebe benefícios, quem suporta danos e quem participa das decisões. Jenkins *et al.* (2016) organizam o conceito em justiça distributiva, de reconhecimento e procedimental. A evidência brasileira permanece restrita em número, mas é convergente: Lampis e Bermann (2022) analisam narrativas institucionais e conflitos de governança da energia distribuída; Furtado e Paim (2024) contrastam discursos de transição com experiências de mulheres de comunidade quilombola atingida por empreendimento eólico; e Cavalcante, Sousa e Assis (2025) documentam, em estudo de caso, impactos cumulativos associados a parque solar sobre comunidade quilombola. Esses estudos fortalecem a dimensão territorial, mas seus recortes não autorizam inferência para todos os projetos ou territórios brasileiros.

Aplicada ao Brasil, essa abordagem impede reduzir justiça à tarifa média. Os estudos territoriais incorporados mostram que comunidades específicas podem enfrentar alterações ambientais, restrições de uso do território e assimetrias de

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

participação (Furtado; Paim, 2024; Cavalcante; Sousa; Assis, 2025). No eixo tarifário, Santana, Monastério e Caldeira (2023) identificam concentração do subsídio em empresas de maior porte apenas entre pessoas jurídicas de Minas Gerais e sob regra anterior. Esse resultado não demonstra regressividade residencial nacional. Permanecem sem comprovação no corpus as hipóteses sobre acesso desigual a telhado, crédito e propriedade formal entre famílias brasileiras.

Programas de geração compartilhada, eficiência em habitação social e energia solar em equipamentos públicos podem ampliar o acesso aos benefícios, desde que não substituam políticas de renda e de qualidade do serviço. A Tarifa Social protege consumo essencial, mas não corrige sozinha desigualdades territoriais, interrupções frequentes ou baixa eficiência de edificações.

Participação social deve ocorrer antes da escolha definitiva de local e tecnologia. Consultas tardias tendem a discutir apenas a mitigação de decisões já tomadas. Planejamento espacial participativo, dados abertos e repartição de benefícios podem reduzir conflitos. Compensações financeiras não legitimam danos irreversíveis automaticamente. Em alguns territórios, a decisão sustentável pode ser não implantar o projeto ou alterar sua escala.

Justiça também possui dimensão intergeracional. Adiar a descarbonização transfere riscos climáticos ao futuro, enquanto a expansão apressada sem reciclagem e descomissionamento cria passivos. Decisões precisam considerar emissões evitadas, materiais, território, dívida e capacidade institucional ao longo da vida útil.

A dimensão social e territorial ganhou densidade com os estudos brasileiros recuperados na SciELO, mas continua heterogênea. Há evidência qualitativa localizada sobre governança, impactos e conflitos territoriais, enquanto permanecem escassos estudos nacionais sobre distribuição de renda, efeitos tarifários residenciais por faixa de renda e qualidade comparável dos processos participativos. Casos locais não devem ser generalizados; sua função é demonstrar mecanismos plausíveis e orientar novas investigações.

10 SÍNTESE ANALÍTICA DAS EVIDÊNCIAS POR DIMENSÃO

O Quadro 3 reúne, para cada uma das cinco dimensões de análise, as evidências que constam das fontes, as controvérsias e insuficiências que

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

permanecem e as implicações interpretativas que delas decorrem para o Brasil. As implicações correspondem à leitura dos autores, e não a resultado extraído diretamente da literatura.

Quadro 3 - Matriz de síntese das evidências por dimensão analítica

Dimensão	Evidências reunidas e fontes	Controvérsias e limitações	Implicações interpretativas
Desempenho técnico e confiabilidade	Renováveis com 86,8% da matriz elétrica em 2025 (EPE, 2026a). Flexibilidade e recursos firmes (Lund *et al.*, 2015; Sepulveda *et al.*, 2018). Capacidade de hospedagem, proteção, serviços ancilares e controles grid-forming (Ismael *et al.*, 2019; Razavi *et al.*, 2019; Kryonidis *et al.*, 2021; Mahmoud *et al.*, 2022).	Resultados internacionais dependem de sistema e premissas. Sem avaliação horária própria do SIN, ELCC ou quantificação de inércia.	Participação renovável não equivale a capacidade firme ou serviços suficientes; prioridade a observabilidade, testes e coordenação entre transmissão e distribuição.
Viabilidade econômica e tarifária	MMGD com 45,0 GW ao final de 2025 (EPE, 2026d). Evidência de subsídios cruzados e concentração em pessoas jurídicas de MG no regime anterior (Da Silva; Rato, 2024; Santana; Monastério; Caldeira, 2023). A Lei nº 15.269/2025 atualizou custeio e capacidade.	Sem simulação tarifária própria ou estimativa residencial nacional. Custo nivelado não incorpora integração.	Tarifas e mecanismos de capacidade devem reconhecer atributos e proteger vulneráveis; magnitude e cronograma exigem quantificação.
Impactos ambientais de ciclo de vida	Concentração mineral e governança de dados (IEA, 2025; IRENA; NUPI, 2024). Leis nº 15.190/2025 e nº 15.300/2025 alteram o licenciamento. Estudos brasileiros documentam impactos localizados de projetos solares e eólicos (Furtado; Paim, 2024; Cavalcante; Sousa; Assis, 2025).	Sem inventário nacional de ciclo de vida ou avaliação comparativa dos efeitos das novas leis.	Licenciamento deve combinar previsibilidade, participação, análise territorial e garantias de descomissionamento.
Distribuição social e territorial	Quadro de justiça energética (Jenkins *et al.*, 2016), governança da geração distribuída (Lampis; Bermann, 2022) e estudos de caso em comunidades quilombolas (Furtado; Paim, 2024; Cavalcante; Sousa; Assis, 2025).	Evidência qualitativa localizada; o estudo tarifário de MG não abrange famílias. Sem distribuição residencial nacional por renda.	Casos demonstram mecanismos plausíveis, não frequência nacional; ampliar pesquisa empírica e participação antecipada.
Capacidade institucional	Curtailment de 9,4% do potencial em 2024 (ONS, 2025); planejamento (EPE, 2026c); armazenamento e capacidade regulados pela Lei nº 15.269/2025; ciber-resiliência de inversores (Ahn *et al.*, 2024); gestão de ativos normalizada.	Curtailment agregado não mede custo social; sem avaliação da eficácia da coordenação institucional ou dupla codificação.	Há desafios de coordenação e adequação sistêmica; a nova regulação amplia instrumentos, mas requer implementação e avaliação.

Fonte: elaborado pelos autores (2026) a partir do corpus descrito na seção 2.

Duas convergências atravessam as cinco dimensões. A primeira é que o valor de qualquer recurso depende de localização e de horário, e não apenas de sua categoria tecnológica, proposição sustentada de modo independente pela literatura de portfólio, de flexibilidade, de capacidade de hospedagem e de regulação tarifária. A segunda é que a coordenação institucional aparece como restrição efetiva em

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

quatro das cinco dimensões. Ambas as convergências foram identificadas por leitura qualitativa conduzida por um único codificador, sem verificação de concordância independente, e devem, portanto, ser tratadas como síntese interpretativa e não como resultado mensurado. A principal divergência identificada refere-se ao tratamento da restrição de geração: documentos operativos a apresentam como instrumento legítimo de gestão, enquanto a leitura econômica tende a tratá-la como perda, sem que o corpus permita arbitrar quantitativamente entre as duas interpretações.

11 CAMINHOS PARA UMA TRANSIÇÃO ELÉTRICA COORDENADA

As proposições reunidas nesta seção constituem recomendações derivadas da interpretação dos autores sobre as evidências sintetizadas no Quadro 3. Elas não são resultados extraídos diretamente da literatura analisada. Para cada princípio, indica-se a evidência que o motiva e a principal limitação associada, de modo que o leitor possa avaliar a distância entre a base empírica e a proposição normativa.

Primeiro, planejar geração, transmissão, distribuição, armazenamento e demanda em conjunto, com resolução horária e análise regional. A motivação é a restrição documentada de geração (ONS, 2025), os prazos longos de rede (IEA, 2023) e o reconhecimento legal do armazenamento como recurso capaz de prestar potência, flexibilidade e serviços ancilares (Brasil, 2025c). A limitação é que o corpus não avalia a eficácia dos arranjos atuais de coordenação.

Segundo, contratar atributos, e não apenas energia, reconhecendo potência, flexibilidade, controle de tensão, resposta de frequência, recomposição e redução verificável de emissões. A motivação decorre da literatura técnica (Sepulveda *et al.*, 2018; Kryonidis *et al.*, 2021; Mahmoud *et al.*, 2022) e do novo marco de capacidade (Brasil, 2025c). A limitação é a tensão entre neutralidade por atributos recomendada pelos autores e contratações tecnológicas específicas previstas em lei, que exige avaliação transparente de custo, desempenho e emissões.

Terceiro, tratar a distribuição como plataforma ativa, com padrões mínimos para mapas de capacidade de hospedagem, planos de desenvolvimento, interoperabilidade e requisitos de conexão de inversores, incentivando a comparação entre reforços convencionais, flexibilidade contratada, eficiência e armazenamento. A motivação é a insuficiência das regras de percentual fixo (Ismael *et al.*, 2019) e os

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

efeitos sobre proteção e tensão (Razavi *et al.*, 2019). A limitação é que a definição de granularidade adequada para publicação desses mapas não é tratada pelo corpus.

Quarto, reformar tarifas com gradualidade e proteção social, mediante componentes temporais e de potência acompanhados de comunicação, medição adequada e salvaguardas para consumidores vulneráveis. A motivação é a persistência de subsídios cruzados (Da Silva; Rato, 2024) sob o marco vigente (Brasil, 2022; ANEEL, 2021a, 2023). A limitação é decisiva: sem quantificação dos efeitos distributivos por faixa de renda, não é possível recomendar magnitude nem cronograma, e a proposição permanece qualitativa.

Quinto, integrar gestão de ativos e adaptação climática, com cadastros de condição, planos de manutenção baseados em risco, cenários climáticos e protocolos de resposta, cujo reconhecimento regulatório seja condicionado a indicadores verificáveis. A motivação é a orientação de incorporação de projeções climáticas ao planejamento e à manutenção (IEA, 2021). A limitação é que o corpus não inclui literatura específica sobre modelos formais de manutenção centrada em risco.

Sexto, internalizar ciclo de vida e território em leilões, financiamentos e licenças, por meio de rastreabilidade, planos de resíduos, garantias de descomissionamento, consulta e avaliação de impactos cumulativos. A motivação combina concentração mineral (IEA, 2025), governança de materiais (IRENA; NUPI, 2024), estudos territoriais brasileiros (Furtado; Paim, 2024; Cavalcante; Sousa; Assis, 2025) e o novo regime federal de licenciamento (Brasil, 2025a, 2025b). A limitação é a ausência de inventário nacional integrado e de avaliação comparativa dos efeitos do novo marco.

Sétimo, constituir governança de transição, reunindo MME, EPE, ANEEL, ONS, órgãos ambientais, governos subnacionais, empresas, universidades e sociedade civil em fóruns permanentes com dados comuns, responsabilidades e metas. A motivação é a recorrência da coordenação institucional como restrição em quatro das cinco dimensões do Quadro 3. A limitação é que essa recorrência foi identificada por leitura qualitativa do corpus, sem medida de frequência ou de intensidade.

O PDE 2035 constitui referência para o horizonte de 2026 a 2035 e explicita que projeções envolvem riscos e incertezas (EPE, 2026c). Essa cautela deve orientar

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

políticas adaptativas. Metas precisam ser firmes quanto a resultados, mas flexíveis quanto a instrumentos quando as evidências mudarem.

12 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O artigo analisou como expandir renováveis e geração própria sem comprometer confiabilidade, segurança de suprimento, modicidade e justiça. A resposta ao problema de pesquisa é apresentada a seguir em três níveis: resultados da síntese, interpretação e recomendação.

No plano dos resultados da síntese, o corpus permite afirmar que as fontes renováveis representaram 86,8% da matriz elétrica brasileira em 2025 (EPE, 2026a); que a MMGD alcançou 45,0 GW ao final daquele ano (EPE, 2026d); que 9,4% do potencial eólico e fotovoltaico de 2024 foi restringido, sem equivalência automática com prejuízo econômico (ONS, 2025); que a inserção distribuída altera proteção, tensão e capacidade de hospedagem; e que serviços ancilares e funções grid-forming se tornam relevantes em sistemas com alta presença de recursos baseados em inversores. A legislação de 2025 incorporou armazenamento, capacidade, autoprodução e novos regimes de licenciamento à agenda setorial. Estudos brasileiros acrescentam evidência localizada sobre governança e impactos territoriais, mas não sustentam generalizações nacionais.

No plano interpretativo, esses achados sustentam a tese de que sustentabilidade elétrica não decorre da adição de megawatts renováveis. Adicionar capacidade reduz emissões potenciais, mas seu valor depende do momento e do local da geração, da rede disponível, da flexibilidade e dos impactos de ciclo de vida. A geração distribuída amplia participação e inovação, mas permanece apoiada na infraestrutura comum e requer regras compatíveis com custos e benefícios sistêmicos. A infraestrutura existente deve ser tratada como plataforma a ser avaliada, mantida e transformada, e não como legado a ser preservado por inércia ou descartado por princípio.

No plano das recomendações, as sete proposições da seção 11 possuem status normativo e força desigual. As relativas a planejamento integrado, contratação por atributos e distribuição ativa apoiam-se em evidência técnica consistente. As relativas a reforma tarifária, território e qualificação profissional apoiam-se em

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

diagnóstico qualitativo e carecem de quantificação antes de conversão em desenho regulatório.

As limitações deste estudo são: revisão narrativa sem registro quantitativo integral das etapas da busca; buscas direcionadas, não exaustivas; ausência de dupla triagem e dupla codificação; classificação descritiva das fontes sem instrumento validado de qualidade; ausência de simulação própria ou estimativa causal; e densidade ainda desigual entre as dimensões. A matriz documento × dimensão do Apêndice B aumenta a rastreabilidade, mas não elimina a subjetividade do codificador único.

Pesquisas futuras devem combinar modelos horários, análise locacional, cenários climáticos e avaliação distributiva. São igualmente necessários estudos empíricos brasileiros sobre capacidade de hospedagem por alimentador, comportamento da demanda, desempenho e degradação de baterias em operação real, comunidades de energia, efeitos tarifários por faixa de renda e qualidade dos processos participativos no licenciamento. A conversão desta revisão em revisão sistemática, com protocolo registrado, dupla triagem independente e cobertura ampliada de bases, constitui desdobramento natural do trabalho.

A elevada participação de fontes renováveis confere ao Brasil posição favorável na transição para um sistema elétrico de baixo carbono, mas não elimina requisitos de potência, flexibilidade, serviços ancilares, capacidade de rede, manutenção e coordenação institucional. A expansão simultânea da geração solar, eólica e distribuída altera fluxos, rampas e necessidades de observabilidade, enquanto o armazenamento e as mudanças regulatórias ampliam os instrumentos disponíveis. A sustentabilidade depende menos da maximização de uma tecnologia do que da capacidade de coordenar geração, transmissão, distribuição, armazenamento, demanda e gestão de ativos ao longo do tempo e do território. Essa coordenação deve incorporar ciclo de vida, resiliência climática, participação social e repartição transparente de custos e benefícios. As evidências são mais robustas nas dimensões técnica e regulatória; os efeitos distributivos e territoriais residenciais no Brasil ainda demandam investigação empírica mais ampla.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 1.000, de 7 de dezembro de 2021. Estabelece as Regras de Prestação do Serviço Público de Distribuição de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2021a. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20211000.pdf. Acesso em: 25 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional (PRODIST): Módulo 3, conexão ao sistema de distribuição de energia elétrica. Anexo III da Resolução Normativa nº 956, de 7 de dezembro de 2021. Brasília, DF: ANEEL, 2021b. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/aren2021956_prodist_modulo_3_v8.pdf. Acesso em: 25 jul. 2026.

AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (ANEEL). Resolução Normativa nº 1.059, de 7 de fevereiro de 2023. Aprimora as regras para conexão e faturamento de centrais de microgeração e minigeração distribuída e do Sistema de Compensação de Energia Elétrica. Brasília, DF: ANEEL, 2023. Disponível em: https://www2.aneel.gov.br/cedoc/ren20231059.html. Acesso em: 25 jul. 2026.

AHN, B. *et al.* An overview of cyber-resilient smart inverters based on practical attack models. *IEEE Transactions on Power Electronics*, v. 39, n. 4, p. 4657-4673, 2024. DOI: 10.1109/TPEL.2023.3342842.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída, o Sistema de Compensação de Energia Elétrica e o Programa de Energia Renovável Social. Brasília, DF: Presidência da República, 2022. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2022/lei/l14300.htm. Acesso em: 25 jul. 2026.

BRASIL. Lei nº 15.190, de 8 de agosto de 2025. Dispõe sobre o licenciamento ambiental e estabelece normas gerais para o licenciamento de atividades e empreendimentos. Brasília, DF: Presidência da República, 2025a. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15190.htm. Acesso em: 28 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 15.300, de 22 de dezembro de 2025. Dispõe sobre o licenciamento ambiental especial para atividades e empreendimentos estratégicos e altera as Leis nº 15.190/2025 e nº 13.116/2015. Brasília, DF: Presidência da República, 2025b. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15300.htm. Acesso em: 28 ago. 2026.

BRASIL. Lei nº 15.269, de 24 de novembro de 2025. Moderniza o marco regulatório do setor elétrico, estabelece diretrizes para o armazenamento de energia elétrica e altera, entre outras, as Leis nº 9.074/1995 e nº 14.300/2022. Brasília, DF: Presidência da República, 2025c. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2023-2026/2025/lei/l15269.htm. Acesso em: 28 ago. 2026.

CAVALCANTE, L. V.; SOUSA, J. A.; ASSIS, T. M. F. As contradições da energia renovável no Semiárido: o caso da injustiça ambiental produzida por

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

empreendimento de energia solar na Comunidade Quilombola Pitombeira (Paraíba - Brasil). *Revista NERA*, v. 28, n. 1, e10639, 2025. DOI: 10.47946/rnera.v28i1.10639.

DA SILVA, A. V.; RATO, T. A. T. Navigating the transition: the impacts of electricity tariff regulation on distributed generation in Brazil. *Utilities Policy*, v. 90, art. 101794, 2024. DOI: 10.1016/j.jup.2024.101794.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Balanço Energético Nacional 2026*: relatório síntese, ano-base 2025. Rio de Janeiro: EPE, 2026a. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-975/topico-847/BEN_S%C3%ADntese_2026_PT.pdf. Acesso em: 25 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Análise socioambiental das fontes energéticas do PDE 2035*. Nota Técnica EPE/DEA/SMA/006/2026. Rio de Janeiro: EPE, 2026b. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-894/topico-831/An%C3%A1lise%20socioambiental%20das%20fontes%20energ%C3%A9ticas%20do%20PDE%202035.pdf. Acesso em: 25 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *Plano Decenal de Expansão de Energia 2035*: consolidação de resultados. Rio de Janeiro: EPE, 2026c. Disponível em: https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-894/PDE%202035_Consolida%C3%A7%C3%A3o%20de%20Resultados.pdf. Acesso em: 25 jul. 2026.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA (EPE). *EPE atualiza painel interativo sobre MMGD com dados de 2025*. Rio de Janeiro: EPE, abr. 2026d. Disponível em: https://www.epe.gov.br/pt/imprensa/noticias/epe-atualiza-painel-interativo-sobre-mmgd-com-dados-de-2025. Acesso em: 28 ago. 2026.

FURTADO, F.; PAIM, E. Energia renovável e extrativismo verde: transição ou reconfiguração? *Revista Brasileira de Estudos Urbanos e Regionais*, v. 26, e202416pt, p. 1-28, 2024. DOI: 10.22296/2317-1529.rbeur.202416pt.

HIRSCH, A.; PARAG, Y.; GUERRERO, J. Microgrids: a review of technologies, key drivers, and outstanding issues. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 90, p. 402-411, 2018. DOI: 10.1016/j.rser.2018.03.040.

IMPRAM, S.; VARBAK NESE, S.; ORAL, B. Challenges of renewable energy penetration on power system flexibility: a survey. *Energy Strategy Reviews*, v. 31, art. 100539, 2020. DOI: 10.1016/j.esr.2020.100539.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2022*: mitigation of climate change. Cambridge: Cambridge University Press, 2022. Disponível em: https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg3/chapter/chapter-6/. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). *Climate Change 2023*: synthesis report. Geneva: IPCC, 2023. DOI: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *IEC 60300-3-11:2009*: dependability management, part 3-11: application guide, reliability centred maintenance. 2. ed. Geneva: IEC, 2009. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/1296. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION (IEC). *IEC 60300-3-10:2025*: dependability management, part 3-10: application guide, maintainability and maintenance. 2. ed. Geneva: IEC, 2025. Disponível em: https://webstore.iec.ch/en/publication/65334. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Climate resilience*. Paris: IEA, 2021. Disponível em: https://www.iea.org/reports/climate-resilience. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Electricity grids and secure energy transitions*. Paris: IEA, 2023. Disponível em: https://www.iea.org/reports/electricity-grids-and-secure-energy-transitions. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERNATIONAL ENERGY AGENCY (IEA). *Global critical minerals outlook 2025*. Paris: IEA, 2025. Disponível em: https://www.iea.org/reports/global-critical-minerals-outlook-2025. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION (ISO). *ISO 55000:2024*: asset management, vocabulary, overview and principles. 2. ed. Geneva: ISO, 2024. Disponível em: https://www.iso.org/standard/83053.html. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA). *Renewable power generation costs in 2023*. Abu Dhabi: IRENA, 2024. Disponível em: https://www.irena.org/Publications/2024/Sep/Renewable-Power-Generation-Costs-in-2023. Acesso em: 25 jul. 2026.

INTERNATIONAL RENEWABLE ENERGY AGENCY (IRENA); NORWEGIAN INSTITUTE OF INTERNATIONAL AFFAIRS (NUPI). *Critical materials for renewable energy*: improving data governance. Abu Dhabi: IRENA, 2024. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2024/Oct/IRENA_Critical_materials_for_renewables_Improving_data_governance_2024.pdf. Acesso em: 25 jul. 2026.

ISMAEL, S. M. *et al.* State-of-the-art of hosting capacity in modern power systems with distributed generation. *Renewable Energy*, v. 130, p. 1002-1020, 2019. DOI: 10.1016/j.renene.2018.07.008.

JENKINS, K. *et al.* Energy justice: a conceptual review. *Energy Research & Social Science*, v. 11, p. 174-182, 2016. DOI: 10.1016/j.erss.2015.10.004.

KRYONIDIS, G. C. *et al.* Ancillary services in active distribution networks: a review of technological trends from operational and online analysis perspective. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 147, art. 111198, 2021. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111198.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

LAMPIS, A.; BERMANN, C. Narrativas de política pública e governança da energia distribuída no Brasil. *Ambiente & Sociedade*, v. 25, e0113, 2022. DOI: 10.1590/1809-4422asoc20200113r2vu2022L1AO.

LUND, P. D. *et al.* Review of energy system flexibility measures to enable high levels of variable renewable electricity. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 45, p. 785-807, 2015. DOI: 10.1016/j.rser.2015.01.057.

MAHMOUD, K. *et al.* Promising grid-forming VSC control schemes toward sustainable power systems: comprehensive review and perspectives. *IEEE Access*, v. 10, p. 130024-130039, 2022. DOI: 10.1109/ACCESS.2022.3228742.

MIRHOSSEINI, M.; KEYNIA, F. Asset management and maintenance programming for power distribution systems: a review. *IET Generation, Transmission & Distribution*, v. 15, n. 16, p. 2287-2297, 2021. DOI: 10.1049/gtd2.12177.

OPERADOR NACIONAL DO SISTEMA ELÉTRICO (ONS). *Critérios para gestão de excedentes energéticos*. Nota Técnica NT-ONS DOP 0022/2025. Rio de Janeiro: ONS, 2025. Disponível em: https://www.ons.org.br/AcervoDigitalDocumentosEPublicacoes/NT-ONS%20DOP%200022.2025%20-%20Crit%C3%A9rios%20para%20Gest%C3%A3o%20de%20Excedentes%20Energ%C3%A9ticos.pdf. Acesso em: 25 jul. 2026.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R.; SAUSEN, J. P. Análise do impacto da microgeração fotovoltaica na rede de distribuição de energia elétrica. *Brazilian Journal of Development*, v. 7, n. 1, p. 2887-2911, 2021. DOI: 10.34117/bjdv7n1-197.

PAIXÃO, J. L. *et al.* Optimized strategy for energy management in an EV fast charging microgrid considering storage degradation. *Energies*, v. 18, n. 5, art. 1060, p. 1-34, 2025. DOI: 10.3390/en18051060.

RAZAVI, S. E. *et al.* Impact of distributed generation on protection and voltage regulation of distribution systems: a review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, v. 105, p. 157-167, 2019. DOI: 10.1016/j.rser.2019.01.050.

SANTANA, R.; MONASTÉRIO, L.; CALDEIRA, T. C. M. Regulação da microgeração e minigeração distribuída de energia elétrica no Brasil: estimação da distribuição do subsídio. *Revista do Serviço Público*, v. 74, n. 4, p. 778-801, 2023. DOI: 10.21874/rsp.v74i4.8526.

SEPULVEDA, N. A. *et al.* The role of firm low-carbon electricity resources in deep decarbonization of power generation. *Joule*, v. 2, n. 11, p. 2403-2420, 2018. DOI: 10.1016/j.joule.2018.08.006.

SUN, C.-C.; HAHN, A.; LIU, C.-C. Cyber security of a power grid: state-of-the-art. *International Journal of Electrical Power & Energy Systems*, v. 99, p. 45-56, 2018. DOI: 10.1016/j.ijepes.2017.12.020.

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

APÊNDICE A - EXPRESSÕES ORIENTADORAS DA BUSCA

As expressões reunidas neste apêndice registram as combinações que orientaram o levantamento. Elas não constituem registro sistemático de execução, pois os quantitativos por expressão e os motivos de exclusão não foram anotados. A reexecução integral com protocolo, quantitativos por etapa e dupla triagem seria necessária para converter o estudo em revisão sistemática.

Quadro A1 - Expressões orientadoras da busca, por dimensão analítica

Dimensão	Expressão orientadora	Recursos e filtros
Desempenho técnico e confiabilidade	("power system flexibility" OR "flexibility measures") AND ("variable renewable" OR "renewable penetration"); ("ancillary services") AND ("distribution network" OR "active distribution"); ("hosting capacity") AND ("distributed generation" OR photovoltaic); ("distributed generation") AND (protection OR "voltage regulation") AND review	ScienceDirect, MDPI e páginas de periódicos; 2015-2026; inglês; artigos de revisão e originais
Viabilidade econômica e tarifária	("tariff regulation" OR "net metering" OR "cross-subsidy") AND ("distributed generation") AND Brazil; ("regulação tarifária" OR "subsídios cruzados") AND ("geração distribuída")	ScienceDirect e RePEc; 2015-2026; inglês e português
Impactos ambientais de ciclo de vida	("critical minerals" OR "critical materials") AND ("energy transition" OR "renewable energy") AND (supply OR refining); ("life cycle" OR "ciclo de vida") AND (photovoltaic OR wind OR "transmissão")	Portais de IEA e IRENA; ScienceDirect; 2015-2026
Distribuição social e territorial	("energy justice" OR "energy poverty") AND (distributional OR procedural OR recognition); ("justiça energética" OR "pobreza energética") AND Brasil	ScienceDirect e páginas de periódicos; 2015-2026; inglês e português
Capacidade institucional	("asset management" OR "maintenance programming" OR "reliability centred maintenance") AND ("power distribution" OR "power system"); ("cyber security" OR cybersecurity) AND ("smart grid" OR "power grid") AND (survey OR review OR "state of the art"); ("curtailment" OR "excedentes energéticos") AND ("transmission" OR "transmissão")	ScienceDirect, IET Digital Library, portais de ISO, IEC, ANEEL e ONS; 2009-2026 para normas técnicas, conforme Quadro 1

Fonte: elaborado pelos autores (2026).

CC BY

REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

APÊNDICE B - MATRIZ DE RASTREABILIDADE DO CORPUS

A marca X indica contribuição material do documento para a dimensão. A classificação do tipo de evidência é descritiva e não representa avaliação validada de qualidade metodológica.

Documento	Tipo de evidência	Técnica	Econômica	Ambiental	Social/territorial	Institucional
ANEEL, 2021a	Normativo	-	X	-	-	X
ANEEL, 2021b	Normativo	X	-	-	-	X
ANEEL, 2023	Normativo	X	X	-	-	X
Ahn *et al.*, 2024	Síntese científica	X	-	-	-	X
Brasil, 2022	Legal	X	X	-	X	X
Brasil, 2025a	Legal	-	-	X	X	X
Brasil, 2025b	Legal	-	-	X	X	X
Brasil, 2025c	Legal	X	X	X	-	X
Cavalcante; Sousa; Assis, 2025	Estudo primário	-	-	X	X	X
Da Silva; Rato, 2024	Estudo científico	-	X	-	X	X
EPE, 2026a	Dado institucional	X	X	X	-	X
EPE, 2026b	Síntese institucional	-	-	X	X	X
EPE, 2026c	Planejamento	X	X	X	X	X
EPE, 2026d	Dado institucional	X	X	-	X	X
Furtado; Paim, 2024	Estudo primário	-	-	X	X	X
Hirsch; Parag; Guerrero, 2018	Síntese científica	X	X	-	X	X
Impram; Varbak Nese; Oral, 2020	Síntese científica	X	X	-	-	X
IPCC, 2022	Síntese institucional	X	X	X	X	X
IPCC, 2023	Síntese institucional	X	-	X	X	X
IEC, 2009	Norma técnica	X	X	-	-	X
IEC, 2025	Norma técnica	X	X	-	-	X
IEA, 2021	Síntese institucional	X	X	X	X	X
IEA, 2023	Síntese institucional	X	X	X	-	X
IEA, 2025	Síntese institucional	-	X	X	X	X
ISO, 2024	Norma técnica	X	X	-	-	X
IRENA, 2024	Síntese institucional	-	X	X	-	X
IRENA; NUPI, 2024	Síntese institucional	-	X	X	X	X
Ismael *et al.*, 2019	Síntese científica	X	X	-	-	X
Jenkins *et al.*, 2016	Síntese conceitual	-	-	-	X	X
Kryonidis *et al.*, 2021	Síntese científica	X	X	-	-	X



REMUNOM
ISSN 2178-6925

Received: 19/07/2026 - **Accepted:** 28/08/2026
Vol: 13.18 - August
DOI: 10.66104/5g63cn15
Pages: 1-38

Documento	Tipo de evidência	Técnica	Econômica	Ambiental	Social/territorial	Institucional
Lampis; Bermann, 2022	Estudo científico	-	X	-	X	X
Lund *et al.*, 2015	Síntese científica	X	X	-	-	X
Mahmoud *et al.*, 2022	Síntese científica	X	-	-	-	X
Mirhosseini; Keynia, 2021	Síntese científica	X	X	-	-	X
ONS, 2025	Dado operativo	X	X	-	-	X
Paixão; Abaide; Sausen, 2021	Estudo primário	X	-	-	-	X
Paixão *et al.*, 2025	Estudo primário	X	X	X	-	X
Razavi *et al.*, 2019	Síntese científica	X	X	-	-	X
Santana; Monastério; Caldeira, 2023	Estudo primário	-	X	-	X	X
Sepulveda *et al.*, 2018	Estudo científico	X	X	X	-	X
Sun; Hahn; Liu, 2018	Síntese científica	X	-	-	-	X

CC BY