

Centro Universitário ETEP
Guilherme Augusto Moraes de Carvalho



**ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: PANORAMAS
E DESAFIOS**

São José dos Campos

2025

Guilherme Augusto Moraes de Carvalho

**ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: PANORAMAS
E DESAFIOS**

Trabalho de Graduação apresentado ao
Centro Universitário ETEP, como parte dos
requisitos necessários para a obtenção do
título de Bacharel em Engenharia Elétrica.

São José dos Campos

2025

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

Divisão de Informação e Documentação

CARVALHO, Guilherme Augusto Moraes de
Energias Renováveis no Brasil: Panorama e Desafios
São José dos Campos, 2025.
66f. (número total de folhas do TG)

Trabalho de Graduação – Curso (Bacharel em Engenharia Elétrica).
Centro Universitário ETEP, 2025.
Orientador Interno ou Principal: Professora Especialista Andiará Vicente.
Orientador Externo ou Coorientador: Titulação Rogério Costa.

1. Energia Renováveis 1. 2. Matriz Elétrica Brasileira 2. 3. Sustentabilidade Energética 3.
I. Centro Universitário ETEP. Divisão de Informação e Documentação. II. Título

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

CARVALHO, Guilherme Augusto Moraes de. **Energias Renováveis no Brasil: Panorama e Desafios**. 2025. 66f. Trabalho de Graduação - Centro Universitário ETEP.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME(S) DO(S) AUTOR(ES): Guilherme Augusto Moraes de Carvalho
TÍTULO DO TRABALHO: Energias Renováveis no Brasil: Panorama e Desafios
TIPO DO TRABALHO/ANO: Trabalho de Graduação/2025

É concedida ao Centro Universitário ETEP permissão para reproduzir cópias deste Trabalho e para emprestar ou vender cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. O autor reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte deste Trabalho pode ser reproduzida sem a autorização do autor.

Guilherme Augusto Moraes de Carvalho
Rua Santa Clara 224, Jardim Califórnia
12305-790, Jacareí – SP

GUILHERME AUGUSTO MORAES DE CARVALHO

ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL : PANORAMAS E DESAFIOS

Trabalho de Graduação apresentado
ao Centro Universitário ETEP, como
parte dos requisitos necessários para
a obtenção do título de Bacharel em
Engenharia Elétrica.

Professora Especialista, Andiara Vicente - ETEP

Professor Especialista, Rogério Costa - ETEP

Coordenadora Acadêmica, Suellen Patari Miragaia - ETEP

Titulação, Nome do Componente da Banca - Sigla da Instituição

____/____/____
DATA DA APROVAÇÃO

AGRADECIMENTOS

Agradeço, antes de tudo, a Deus, por me conduzir com sabedoria e firmeza até este momento tão especial.

Reconheço com carinho o papel fundamental da minha família e da minha esposa, que me ofereceram apoio, paciência e confiança ao longo de toda a caminhada. Foram meu alicerce, mesmo nos momentos em que a motivação parecia falhar.

Aos amigos que compartilharam comigo o universo dos estudos, deixo meu apreço. Em especial, ao grupo do EET: Juquinha (Paulo Sergio), Chaves (André), João, Alan, Dalmo, Ehgon, Tamara, Varejão (Jonatas), Paçoca (Jeferson), Max, Isla, Juliano, Luiz Guilherme e a todos os colegas que estiveram presentes nas horas de dificuldade, alegria, descontração e compromisso.

Expresso meu reconhecimento às empresas por onde passei, que contribuíram significativamente para meu desenvolvimento. De modo especial, agradeço ao senhor Raimundo, pelas ideias compartilhadas e pelo incentivo constante.

Aos orientadores acadêmicos, Andara Vicente e Rogério Costa, deixo minha sincera consideração pelo apoio, orientação e compreensão, que foram essenciais para a conquista dos objetivos propostos.

Também valorizo a dedicação dos professores, funcionários e coordenadores do Centro Universitário ETEP, que tanto colaboraram para minha formação acadêmica e pessoal.

Por fim, deixo minha profunda estima a todos que, de forma direta ou indireta, estiveram presentes nesta etapa de crescimento e realização.

Epígrafe

“O homem erudito é um descobridor de fatos que já existem, mas o homem sábio é um criador de valores que não existem e que ele faz existir.”

Albert Einstein

RESUMO

O Brasil detém uma posição estratégica no cenário global de energia, com uma matriz elétrica notavelmente renovável, impulsionada historicamente pela energia hidráulica. Contudo, a transição energética global exige uma diversificação e modernização contínuas para além das fontes tradicionais, visando maior resiliência e sustentabilidade. Este relatório detalha o panorama atual das energias renováveis no Brasil, examinando os avanços tecnológicos que as tornam cada vez mais competitivas e os desafios estruturais e regulatórios que ainda limitam sua expansão plena e equitativa.

Apesar do vasto potencial eólico e solar, o país enfrenta gargalos significativos na infraestrutura de transmissão, na gestão da intermitência dessas fontes e na complexidade burocrática dos processos de licenciamento. A dificuldade de acesso a financiamento adequado e a dependência de tecnologias importadas também representam obstáculos, somados à resistência de setores energéticos tradicionais. Para superar esses entraves, o relatório propõe um conjunto de recomendações estratégicas, incluindo planejamento energético integrado de longo prazo, fortalecimento regulatório, fomento à inovação e à indústria nacional, ampliação do acesso a financiamento, investimento em soluções de flexibilidade e promoção de uma transição energética justa e inclusiva. A implementação coordenada dessas medidas é fundamental para que o Brasil não apenas atinja suas metas de descarbonização, mas também se consolide como um líder global em um futuro energético limpo e resiliente.

Palavras-chave: Energia Renováveis. Matriz Elétrica Brasileira. Sustentabilidade Energética.

ABSTRACT

Brazil holds a strategic position in the global energy scenario, with a notably renewable electricity mix, historically driven by hydropower. However, the global energy transition requires continued diversification and modernization beyond traditional sources, aiming for greater resilience and sustainability. This report details the current landscape of renewable energy in Brazil, examining the technological advances that make them increasingly competitive and the structural and regulatory challenges that still limit their full and equitable expansion. Despite the vast potential of wind and solar energy, the country faces significant bottlenecks in transmission infrastructure, in managing the intermittency of these sources, and in the bureaucratic complexity of licensing processes. Difficulty in accessing adequate financing and dependence on imported technologies also represent obstacles, combined with the resistance of traditional energy sectors. To overcome these obstacles, the report proposes a set of strategic recommendations, including long-term integrated energy planning, regulatory strengthening, fostering innovation and domestic industry, expanding access to financing, investing in flexibility solutions, and promoting a fair and inclusive energy transition. The coordinated implementation of these measures is essential for Brazil to not only achieve its decarbonization goals, but also to consolidate itself as a global leader in a clean and resilient energy future.

Keywords: Renewable Energy. Brazilian Electricity Matrix. Energy Sustainability.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Comparativo de Custos Nivelados de Energia (LCOE) para Diferentes Fontes no Brasil	24
Tabela 2 - Principais Políticas Públicas e Marcos Regulatórios para Energias Renováveis no Brasil.....	34
Tabela 3 - Tecnologias de Armazenamento de Energia e Suas Aplicações Estratégicas.....	43
Tabela 4 - Desafios Comuns na Integração de Renováveis e Soluções Adotadas Globalmente	58

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Comparativo da Matriz Elétrica Brasileira e Matriz Mundial	21
Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira (Distribuição Percentual) 2023.	22
Figura 3 - Comparativo Matriz Elétrica Brasileira 2022 - 20223	22
Figura 4 - Evolução da Geração de Energia 2007-2023	23
Figura 5 - Mapa do Brasil com distribuição de Energia Renováveis	25
Figura 6 - Evolução do tamanho das turbinas eólicas de grande porte.....	26
Figura 7 - Evolução da Eficiência de Painéis Solares Fotovoltaicos e do Capacidade Média de Turbinas Eólicas 2010 - 2024	27

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	14
1.1 Problema	15
1.2 Objetivos	16
1.2.1 Objetivo Geral	16
1.2.2 Objetivos Específicos.....	16
1.3 Justificativa.....	17
1.4 Delimitação do Tema	18
2 METODOLOGIA.....	19
3 REVISÃO DA LITERATURA	20
3.1 Panorama das Energias Renováveis no Brasil	20
3.1.1 Composição Histórica e Diversificação Recente da Matriz Elétrica Brasileira.....	20
3.1.2 Análise de Custos e Potencial de Geração das Fontes Renováveis	23
3.2 Avanços Tecnológicos no Setor de Energias Renováveis	26
3.2.1 Inovação em Geração: Eólica e Solar Fotovoltaica	26
3.2.2 Tecnologia Habilitadores: Armazenamento de Energia e Redes Inteligentes (Smart Grids)	27
3.3 Energia Renováveis e Sustentabilidade	29
3.3.1 Contribuições para a Descarbonização e Mitigação das Mudanças Climáticas	29
3.3.2 Impactos Socioeconômicos e a Promoção da Inclusão Energética..	30
3.4 Políticas Públicas para Energias Renováveis	31

3.4.1. Estabilidade Regulatória e Inovação Política: Aprendendo com Modelos Diversos	32
3.5 Desafios e Perspectivas para as Energias Renováveis no Brasil	34
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	37
4.1 Infraestrutura da Transmissão e Distribuição Desigual	37
4.1.1 Lições de Modelos Internacionais para a Modernização da Rede....	38
4.2 Intermitência das Fontes Renováveis e a Necessidade de Armazenamento	39
4.2.1 Soluções Abrangentes de Armazenamento de Energia: Além das Baterias.....	41
4.3 Entraves Burocráticos e Ambiente Regulatório Instável.....	43
4.3.1 Estabilidade Regulatória e Inovação Política: Aprendendo com Modelos Diversos	44
4.4 Dificuldade de Financiamento e Baixo Investimento em Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico.....	46
4.4.1 Fomento à Inovação Doméstica e Cadeias de Suprimentos: Reduzindo a Dependência Externa	46
4.5 Resistência dos Setores Tradicionais da Matriz Energética.....	48
4.5.1 Navegando as Dinâmicas Sociopolíticas: Além da Resistência Técnica	50
4.6 Articulação dos Desafios e Implicação para Transição Energética	51
4.7 O Crescente Protagonismo das Renováveis na Matriz Brasileira	52
4.8 O Impacto dos Avanços Tecnológicos na Viabilidade das Renováveis	53

4.9 Análise Crítica dos Desafios e Barreiras Identificados na Literatura	54
4.10 Perspectivas Futuras e Recomendações Estratégicas	55
4.10.1. Explorando Tecnologias Emergentes e Tendências Futuras: O Horizonte de Possibilidades.....	55
4.10.2. Planejamento Energético Integrado e de Longo Prazo: Lições Internacionais	57
4.10.3. Fortalecimento e Modernização do Arcabouço Regulatório	58
4.10.4. Fomento à Inovação, Pesquisa e Desenvolvimento da Indústria Nacional.....	58
4.10.5. Estratégias para Ampliar e Democratizar o Acesso a Financiamento	59
4.10.6. Investimento em Soluções de Armazenamento e Resiliência da Rede	59
4.10.7. Promoção de uma Transição Energética Justa e Inclusiva	59
4.10.8. Avenidas de Pesquisa Futura	60
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS.....	63

1 INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a busca por fontes de energia sustentáveis tem adquirido crescente relevância no cenário internacional. Este movimento é impulsionado pela intensificação das preocupações com os impactos ambientais decorrentes dos combustíveis fósseis e pela imperativa necessidade de diversificação das matrizes energéticas dos países. A mudança para um sistema de geração de energia mais sustentável e ambientalmente responsável, fundamentado em fontes renováveis, é considerada essencial para mitigar os efeitos das alterações climáticas e assegurar um fornecimento de energia confiável e sustentável a longo prazo.

No contexto brasileiro, essa temática assume um papel estratégico devido à abundância de recursos naturais e às condições geográficas e climáticas favoráveis à produção de energia limpa. A matriz elétrica do país já se destaca globalmente por sua forte presença de fontes renováveis, com aproximadamente 89% da eletricidade gerada em 2023 originando-se de fontes como a hidráulica, eólica, solar e biomassa. Esses dados posicionam o Brasil em uma vanguarda mundial em termos de geração renovável.

Apesar dessa expressiva participação, a predominância histórica da energia hidráulica na matriz brasileira, embora renovável, acarreta desafios socioambientais significativos, como o deslocamento de populações e alterações em ecossistemas aquáticos e terrestres. Essa dependência de uma única fonte renovável, mesmo que limpa, pode gerar vulnerabilidades, especialmente diante de cenários de escassez hídrica induzidos por mudanças climáticas, como observado em países como a Albânia, que, apesar de sua alta dependência hidrelétrica, busca diversificar sua matriz para mitigar riscos de disponibilidade hídrica. Assim, a alta porcentagem de energia renovável no Brasil não se traduz automaticamente em uma matriz plenamente diversificada ou livre de impactos, revelando a necessidade de uma evolução qualitativa na composição energética. A diversificação do portfólio de renováveis no Brasil, portanto, emerge não apenas como uma forma de aumentar a oferta de energia verde, mas como uma

estratégia fundamental para construir um sistema energético mais resiliente e com menor pegada ambiental.

A relevância deste estudo reside na importância estratégica que as energias renováveis representam para o desenvolvimento sustentável do país. A expansão das fontes limpas não só contribui para a redução da emissão de gases de efeito estufa, mas também promove o uso racional dos recursos naturais e impulsiona a geração de emprego e renda em diversas regiões. A compreensão aprofundada dos avanços tecnológicos, das políticas públicas implementadas e das limitações operacionais do setor é crucial para orientar ações futuras, tanto no âmbito da engenharia quanto na formulação de estratégias energéticas nacionais.

1.1 Problema

Apesar do vasto potencial brasileiro para a geração de energia por meio de fontes renováveis, observam-se diversos obstáculos que impedem a plena consolidação dessas tecnologias como base predominante e diversificada da matriz elétrica nacional. Entre os principais desafios estão a intermitência de fontes como a solar e a eólica, as deficiências na infraestrutura de transmissão, a desigualdade no acesso aos incentivos regulatórios e a necessidade de uma política energética de longo prazo mais articulada com os interesses ambientais, econômicos e sociais do país. Embora o Brasil possua um dos maiores índices de geração renovável do mundo, a concentração dessa produção em determinadas regiões e o investimento desproporcional entre as fontes dificultam uma distribuição equitativa e eficiente da energia gerada. Adicionalmente, a implementação de novas usinas renováveis ainda enfrenta barreiras como altos custos iniciais, complexidades burocráticas e regulatórias, e a resistência de setores tradicionais da indústria energética.

Neste cenário, este trabalho se propõe a investigar: Quais são os principais fatores que limitam o crescimento sustentável e integrado das energias renováveis na matriz elétrica brasileira, apesar do potencial técnico e ambiental do país?

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo Geral

Analisar, sob uma perspectiva teórica, os principais fatores que limitam e os que favorecem o crescimento sustentável das energias renováveis na matriz elétrica brasileira, com foco na identificação dos desafios técnicos, econômicos, regulatórios e políticos que afetam a consolidação dessas fontes no país.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Investigar os conceitos fundamentais relacionados às fontes de energia renovável, diferenciando-as das fontes não renováveis no contexto da matriz elétrica.
- Descrever o panorama atual da geração de energia elétrica no Brasil, com base em dados oficiais, evidenciando a evolução e a participação das fontes renováveis.
- Identificar as principais tecnologias utilizadas na geração de energia renovável no Brasil (solar fotovoltaica, eólica, hidráulica e biomassa) e suas respectivas aplicações no setor elétrico.
- Analisar os principais entraves técnicos, econômicos, regulatórios, infraestruturais e políticos que dificultam a ampliação da participação das fontes renováveis na matriz energética nacional.

- Examinar as políticas públicas, os programas de incentivo e os instrumentos de regulação existentes, avaliando sua eficácia e limitações na promoção de um sistema energético mais sustentável e diversificado.

1.3 Justificativa

A escolha do tema "Energias Renováveis no Brasil: Panorama e Desafios" justifica-se pela crescente importância que a matriz energética sustentável tem assumido no cenário global e, especialmente, no contexto brasileiro. Em um momento em que o planeta enfrenta os efeitos das mudanças climáticas e da degradação ambiental, a necessidade de substituição das fontes fósseis por alternativas renováveis é uma demanda urgente e estratégica. O Brasil, por sua diversidade de recursos naturais, apresenta condições privilegiadas para liderar essa transição energética, mas ainda enfrenta limitações técnicas, econômicas, regulatórias e políticas que comprometem a expansão equilibrada e eficiente das fontes renováveis.

Do ponto de vista acadêmico, o tema é relevante por oferecer uma oportunidade de aprofundamento teórico sobre a estrutura energética do país, abordando conceitos fundamentais da engenharia elétrica e energética, além de permitir uma análise crítica das políticas públicas e das tecnologias envolvidas. A produção científica sobre o setor de energias renováveis, embora crescente, ainda carece de estudos integrativos que articulem os aspectos técnicos com os institucionais, ambientais e sociais, sobretudo no contexto brasileiro.

No aspecto social, a pesquisa contribui para o entendimento de como a adoção de fontes renováveis pode promover o desenvolvimento regional, melhorar o acesso à energia em áreas isoladas e reduzir os impactos ambientais associados à geração convencional. Além disso, fornece subsídios para o debate público e para a formulação de políticas mais eficazes, que considerem

não apenas a viabilidade econômica, mas também os benefícios ambientais e sociais.

Profissionalmente, o tema é pertinente à formação de engenheiros eletricitas e demais profissionais da área tecnológica, pois envolve conhecimentos diretamente aplicáveis ao planejamento, operação e modernização do setor elétrico. A compreensão dos fatores que dificultam a consolidação das energias renováveis permite que futuros profissionais atuem de forma mais estratégica, tanto na iniciativa privada quanto no setor público.

Portanto, o presente estudo busca preencher uma lacuna ao reunir, de forma teórica e crítica, os principais aspectos que envolvem o avanço das energias renováveis no Brasil, oferecendo uma visão ampla e atualizada sobre os desafios e possibilidades que envolvem essa área essencial para o futuro energético do país.

1.4 Delimitação do Tema

A presente pesquisa está delimitada à análise teórica das principais fontes de energia renovável utilizadas na geração de eletricidade no Brasil, com enfoque nas tecnologias solar fotovoltaica, eólica, hidráulica (incluindo grandes hidrelétricas e Pequenas Centrais Hidrelétricas - PCHs) e biomassa. O estudo aborda os aspectos técnicos, econômicos, regulatórios, políticos e ambientais relacionados à geração elétrica de origem renovável, excluindo, portanto, temas correlatos como mobilidade elétrica com foco exclusivo em veículos, biocombustíveis líquidos para transporte e outras aplicações energéticas não elétricas, a menos que sua interconexão com a matriz elétrica seja relevante (como o potencial do hidrogênio verde).

Além disso, por tratar-se de uma pesquisa bibliográfica, a investigação se restringe à coleta e análise de documentos acadêmicos, relatórios institucionais, publicações oficiais e artigos científicos disponíveis até o ano de 2025. O recorte temporal para análise de dados e políticas compreende, prioritariamente, o

período a partir de 2010, no qual as fontes renováveis, especialmente solar e eólica, começaram a ter crescimento expressivo na matriz elétrica brasileira, impulsionadas por avanços tecnológicos, leilões de energia e a regulamentação da geração distribuída. A delimitação geográfica considera o território nacional como referência, com exemplos regionais utilizados para ilustrar particularidades técnicas, econômicas ou desafios específicos.

2 METODOLOGIA

A metodologia adotada neste trabalho baseia-se em uma abordagem qualitativa e exploratória, de natureza teórica, com ênfase em pesquisa bibliográfica. A investigação propõe-se a compreender, por meio de levantamento e análise de material já publicado, os avanços, desafios e perspectivas relacionados ao uso de fontes renováveis na matriz elétrica brasileira. Não haverá aplicação de instrumentos empíricos, como questionários ou entrevistas, uma vez que o objetivo é examinar, interpretar e sintetizar conceitos e dados disponíveis em obras científicas, documentos oficiais de órgãos como a Empresa de Pesquisa Energética (EPE) e a Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL), relatórios institucionais e artigos de periódicos especializados.

Segundo Gil (2008), a pesquisa bibliográfica é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros, artigos científicos, teses, dissertações e publicações especializadas. Nesse sentido, foram utilizadas fontes como o Balanço Energético Nacional (BEN) da EPE, relatórios da ANEEL, artigos indexados em bases como Scielo e IEEE Xplore, e periódicos acadêmicos da área de engenharia elétrica, energia e sustentabilidade. Também foram consultadas obras de referência, como as de Tolmasquim (2016) e Goldemberg (2009), que oferecem fundamentos teóricos sólidos sobre energia renovável no Brasil.

A pesquisa foi conduzida a partir de uma seleção criteriosa de materiais publicados preferencialmente entre 2010 e 2025, priorizando dados atualizados,

autores com reconhecimento acadêmico na área e estudos que abordassem o contexto brasileiro. As informações foram organizadas, analisadas de forma descritiva e interpretativa, e sintetizadas para permitir a compreensão da evolução histórica do setor, os fatores que influenciam sua expansão e as barreiras estruturais, políticas, econômicas e tecnológicas ainda existentes.

Essa metodologia permite atingir os objetivos propostos, oferecendo uma visão abrangente e crítica sobre a temática, sem a necessidade de experimentação ou coleta de dados primários. Portanto, o trabalho contribui com uma reflexão fundamentada sobre as condições e perspectivas para o fortalecimento das energias renováveis no Brasil, identificando lacunas e propondo caminhos para a superação dos desafios.

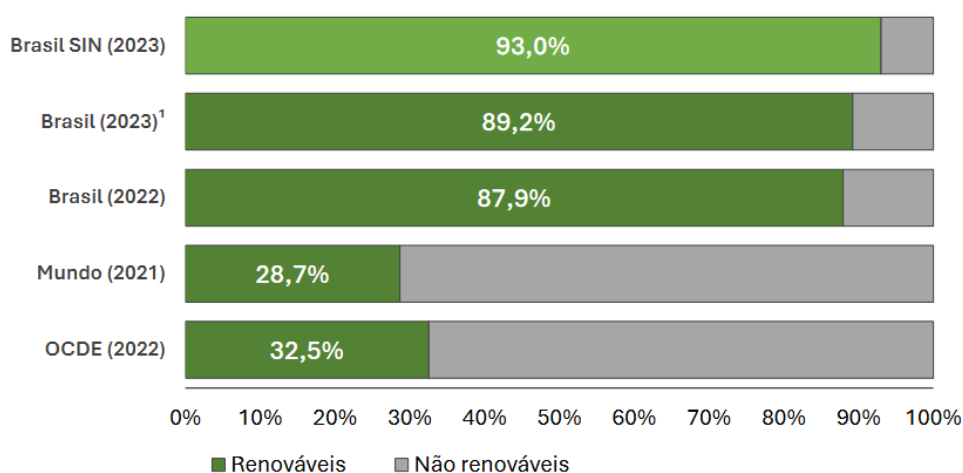
3 REVISÃO DA LITERATURA

3.1 Panorama das Energias Renováveis no Brasil

3.1.1 Composição Histórica e Diversificação Recente da Matriz Elétrica Brasileira

O Brasil possui uma matriz elétrica reconhecida internacionalmente por sua elevada participação de fontes renováveis. Segundo o Balanço Energético Nacional (BEN, 2024), referente ao ano base 2023, cerca de 89,2% da oferta interna de energia elétrica no país proveio de fontes renováveis, conforme ilustrada na Figura 1. Embora este percentual seja expressivo, é crucial analisar sua composição.

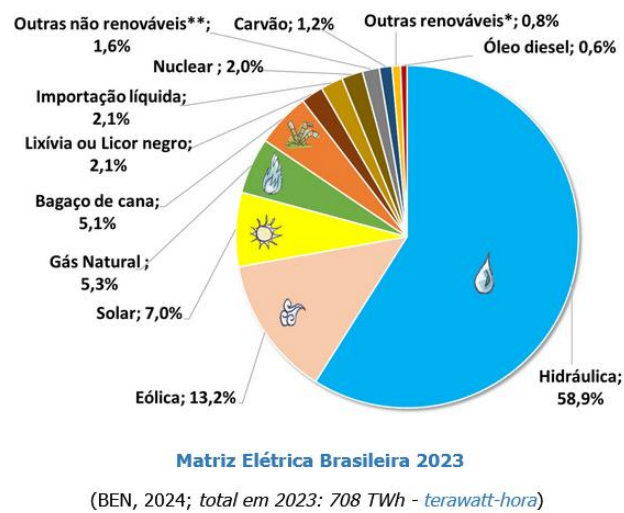
Figura 1 - Comparativo da Matriz Elétrica Brasileira e Matriz Mundial



Fonte: EPE, 2024

Historicamente, a maior parcela dessa energia renovável origina-se de grandes usinas hidrelétricas (vide Figura 2), que, apesar de sua natureza renovável, podem acarretar significativos impactos socioambientais, como o deslocamento de populações e alterações em ecossistemas aquáticos e terrestres.

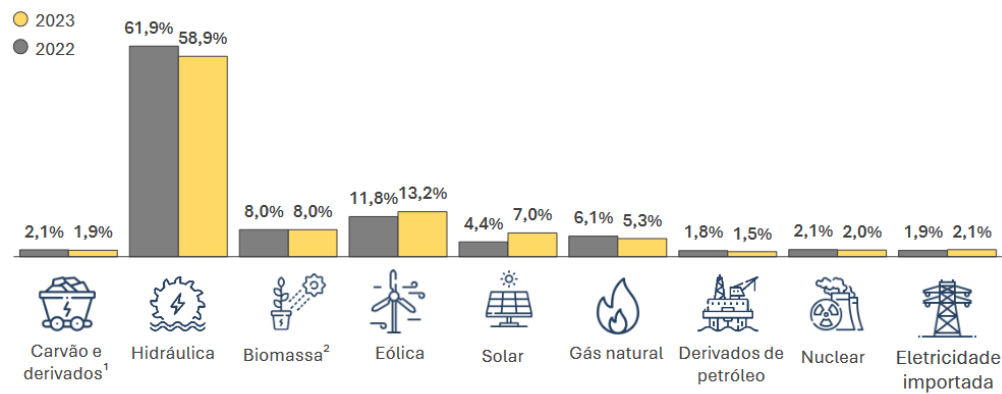
Figura 2 - Matriz Elétrica Brasileira (Distribuição Percentual) 2023.



Fonte: BEN, 2024

Nos últimos anos, observa-se uma diversificação progressiva da matriz renovável brasileira. De acordo com dados mais recentes da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2024), a energia eólica já representava cerca de 13,2% da capacidade instalada, e a solar fotovoltaica (centralizada e distribuída) ultrapassava os 7%, ambas com tendências de forte crescimento, visto nas Figuras 3. A energia proveniente da biomassa, principalmente do bagaço da cana-de-açúcar, também desempenha um papel relevante, especialmente no setor sucroalcooleiro e como complemento em épocas de pouca chuva.

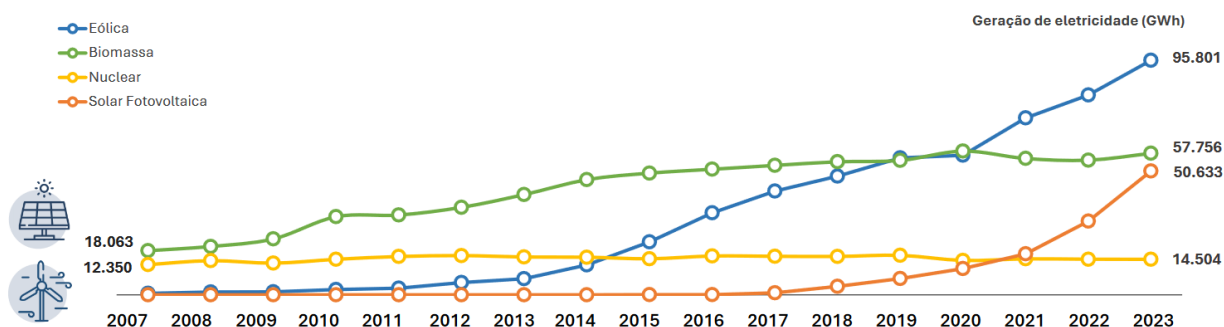
Figura 3 - Comparativo Matriz Elétrica Brasileira 2022 - 20223



Fonte: EPE, 2024

Apesar do crescimento notável, fontes como a solar e a eólica ainda estão distantes de atingir seu vasto potencial técnico no Brasil, vide Figura 4 com a evolução do crescimento. A liderança brasileira em energias renováveis, embora expressiva em termos percentuais, precisa evoluir para uma composição mais diversificada e resiliente. A dependência excessiva da energia hidráulica, sujeita às variações climáticas e seus impactos na disponibilidade hídrica, como exemplificado pela experiência da Albânia, que, apesar de sua alta dependência hidrelétrica, busca diversificar sua matriz para mitigar riscos de disponibilidade hídrica, demonstra que a segurança energética do Brasil se beneficia da expansão de outras fontes. A diversificação para um mix robusto de renováveis intermitentes e despacháveis é crucial para mitigar riscos e assegurar a estabilidade do sistema elétrico nacional frente a eventos climáticos extremos.

Figura 4 - Evolução da Geração de Energia 2007-2023



Fonte: EPE, 2024

3.1.2 Análise de Custos e Potencial de Geração das Fontes Renováveis

A energia solar, em particular os projetos de grande escala (utility-scale), apresenta um dos menores custos nivelados de geração (LCOE) no Brasil, o que

a torna economicamente muito competitiva. A Tabela 1, a seguir, oferece um comparativo dos custos nivelados de energia para diferentes fontes no país, evidenciando a atratividade econômica das fontes eólica e solar.

Fonte de Energia	LCOE Estimado (US\$/MWh)	Observações
Solar Fotovoltaica (utility-scale)	24 – 96	Valores variam conforme tecnologia e localização.
Solar Fotovoltaica (distribuída)	117 – 282	Inclui sistemas residenciais e comerciais.
Eólica Onshore	24 – 75	Competitiva em diversas regiões.
Biomassa (ex: bagaço de cana)	60 – 100	Estimativas baseadas em dados da EPE e estudos setoriais.
Pequenas Centrais Hidrelétricas (PCHs)	41	Valor médio estimado para o Brasil.
Termelétricas a Gás Natural (ciclo combinado)	60 – 101	Variabilidade conforme tecnologia e preços do gás.

Tabela 1 - Comparativo de Custos Nivelados de Energia (LCOE) para Diferentes Fontes no Brasil

Fonte: Autor.

A análise dos valores de LCOE demonstra que a energia solar e eólica são altamente competitivas, o que serve como um sinal positivo para investimentos e justifica a priorização dessas fontes em políticas energéticas. No entanto, a distribuição geográfica da geração eólica e solar impõe desafios consideráveis. Grande parte das usinas dessas fontes está localizada na região Nordeste (Figura 5), que possui excelentes recursos naturais, enquanto os principais centros de consumo de energia se concentram nas regiões Sudeste e Sul.

Figura 5 - Mapa do Brasil com distribuição de Energia Renováveis



Fonte: ABRHIDRO, 2024

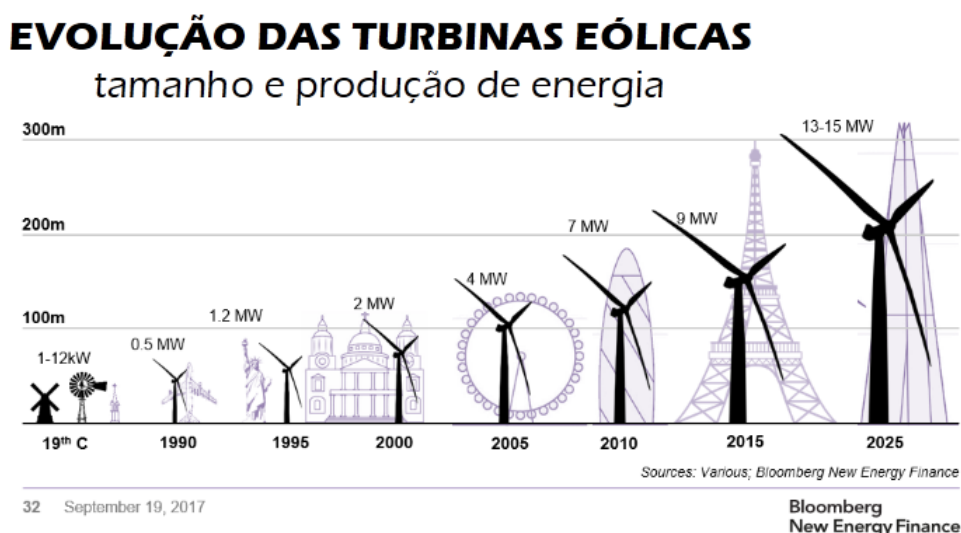
Essa disparidade geográfica exige investimentos robustos e contínuos em linhas de transmissão de longa distância para escoar a energia gerada, minimizar perdas e assegurar a confiabilidade do Sistema Interligado Nacional (SIN). A questão é que o baixo custo de geração dessas fontes pode ser mitigado pelos elevados custos e complexidades associadas à infraestrutura de transmissão. Isso significa que, embora a produção da energia renovável seja barata na fonte, o custo final de entrega ao consumidor pode ser significativamente maior devido aos gargalos de infraestrutura. A superação desses desafios de transmissão é, portanto, essencial para que a competitividade econômica inerente à geração solar e eólica se traduza em benefícios sistêmicos e para o consumidor.

3.2 Avanços Tecnológicos no Setor de Energias Renováveis

3.2.1 Inovação em Geração: Eólica e Solar Fotovoltaica

Os avanços tecnológicos têm desempenhado um papel crucial no desenvolvimento e na crescente competitividade das energias renováveis, tornando-as progressivamente mais eficientes, confiáveis e economicamente acessíveis. No setor de energia eólica, as turbinas estão se tornando maiores e mais potentes, com pás mais longas e aerodinâmicas. Essa evolução permite que capturem mais energia dos ventos, inclusive em locais com velocidades de vento menores, expandindo as fronteiras de viabilidade dessa fonte. Essa tendência de aumento de escala e eficiência é um fenômeno global no setor eólico. Veja abaixo na Figura 6 uma ilustração da evolução das turbinas eólicas.

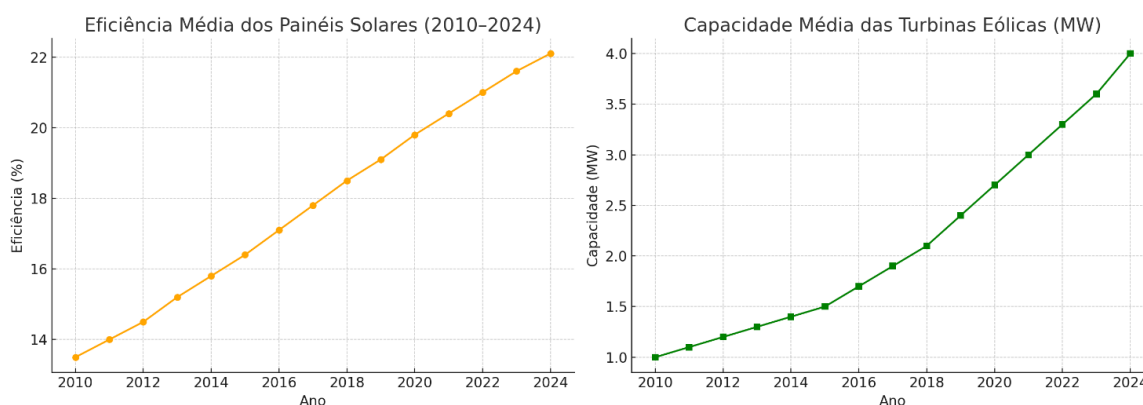
Figura 6 - Evolução do tamanho das turbinas eólicas de grande porte



Fonte: Bloomberg, 2017

Na energia solar fotovoltaica, as células solares continuam a evoluir em termos de eficiência de conversão da luz solar em eletricidade. Novas tecnologias, como células de perovskita e tandem, estão demonstrando resultados promissores em laboratório e começando a ingressar no mercado. A melhoria contínua na eficiência de conversão e a redução dos custos de produção dos painéis solares têm sido fatores determinantes para que a energia solar se torne uma das opções mais baratas em leilões de energia em diversos países, incluindo o Brasil. A constante inovação tecnológica atua como um motor que impulsiona a redução do LCOE, criando um ciclo virtuoso em que a maior competitividade econômica estimula mais investimentos em pesquisa e desenvolvimento, que por sua vez, geram novas reduções de custos e melhorias de desempenho. Veja abaixo um gráfico de evolução de eficiência como demonstrado na Figura 7.

Figura 7 - Evolução da Eficiência de Painéis Solares Fotovoltaicos e do Capacidade Média de Turbinas Eólicas 2010 - 2024



Fonte: Fonte Autor

3.2.2 Tecnologia Habilitadores: Armazenamento de Energia e Redes Inteligentes (Smart Grids)

Paralelamente aos avanços na geração, o desenvolvimento de tecnologias habilitadoras é fundamental para a integração eficiente das energias renováveis. Sistemas de armazenamento de energia, como as baterias de íon-lítio, estão se tornando mais acessíveis e eficientes. Isso permite que a energia solar seja utilizada mesmo durante a noite ou em períodos nublados, aumentando significativamente a confiabilidade dessa fonte. A capacidade de armazenar energia é essencial para mitigar a intermitência inerente às fontes solar e eólica, garantindo um fornecimento mais estável e contínuo.

A digitalização e a automação também estão transformando o setor de energias renováveis. O uso de inteligência artificial (IA), Internet das Coisas (IoT) e análise de Big Data permite otimizar a operação e a manutenção (O&M) de usinas solares e eólicas, prever a geração com maior acurácia e identificar falhas de forma proativa, reduzindo custos e aumentando a disponibilidade dos ativos. A China, por exemplo, tem demonstrado um aumento expressivo em depósitos de patentes para tecnologias emergentes de energia limpa, incluindo baterias, sistemas de armazenamento e redes inteligentes, o que reflete a importância dessas inovações para a transição energética global. Essas ferramentas digitais não são meramente incrementais; elas alteram fundamentalmente a forma como os sistemas de energia são gerenciados, passando de operações estáticas para modelos dinâmicos, preditivos e otimizados, o que é crucial para lidar com a variabilidade das fontes renováveis.

As redes elétricas inteligentes (smart grids) são outro componente fundamental, pois facilitam uma integração mais eficiente e flexível das fontes renováveis intermitentes na rede elétrica. Elas permitem o gerenciamento dinâmico da demanda, o fluxo bidirecional de energia e a melhoria da estabilidade e segurança do sistema. A China está ativamente empenhada em projetar um "megasistema" que incorpora redes inteligentes impulsionadas por IA e sistemas de armazenamento de energia de longa duração para equilibrar a oferta e a demanda de energia. Da mesma forma, a Austrália tem enfatizado o uso de tecnologias inteligentes, inversores híbridos e Usinas Virtuais de Energia (VPPs) para a integração de sua crescente capacidade solar. O sucesso da

expansão das energias renováveis intermitentes está intrinsecamente ligado à maturidade e à implantação dessas tecnologias de rede complementares. Sem elas, o vasto potencial de geração de baixo custo não pode ser plenamente realizado, o que pode levar a restrições na geração e instabilidade no sistema.

3.3 Energia Renováveis e Sustentabilidade

3.3.1 Contribuições para a Descarbonização e Mitigação das Mudanças Climáticas

O conceito de sustentabilidade está intrinsecamente ligado à necessidade de transformações profundas na matriz energética global, e as energias renováveis desempenham um papel central nesse processo. O uso de fontes renováveis de energia responde diretamente às exigências ambientais, principalmente pela redução significativa da emissão de gases de efeito estufa (GEE) em comparação com os combustíveis fósseis, contribuindo para o combate às mudanças climáticas. A transição para fontes limpas é não apenas desejável, mas imprescindível para assegurar um fornecimento de energia confiável e sustentável e o equilíbrio ambiental no longo prazo.

Além da redução de GEE, as energias renováveis oferecem benefícios ambientais mais amplos, que vão além da descarbonização. A diminuição da dependência de combustíveis fósseis implica em menor impacto ambiental associado à sua extração, transporte e combustão, como a poluição do ar e da água, e o risco de acidentes ambientais. Dessa forma, a adoção de renováveis contribui para uma sustentabilidade ambiental mais holística, protegendo ecossistemas e a saúde humana. No entanto, uma análise verdadeiramente criteriosa da sustentabilidade deve abranger a pegada ambiental completa do ciclo de vida das tecnologias renováveis. Para solar e eólica, preocupações mais amplas incluem o uso da terra para grandes parques, o consumo de água (especialmente para biomassa e energia solar concentrada), impactos na

biodiversidade (por exemplo, mortalidade de aves/morcegos por turbinas eólicas) e a intensidade de recursos na fabricação (por exemplo, minerais de terras raras para ímãs em turbinas eólicas, silício para painéis solares). Além disso, a gestão do fim da vida útil dos componentes (por exemplo, reciclagem de painéis solares, pás de turbinas eólicas) é um desafio emergente que se liga aos princípios da economia circular.

3.3.2 Impactos Socioeconômicos e a Promoção da Inclusão Energética

O avanço das energias renováveis também está atrelado à dimensão da equidade social. Projetos de energias renováveis, quando bem planejados e implementados com participação comunitária, podem gerar emprego e renda em regiões menos desenvolvidas. Eles promovem o acesso universal à energia elétrica em áreas remotas ou isoladas, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida das populações. Isso é particularmente relevante em países em desenvolvimento com grandes desigualdades sociais e regionais, como o Brasil. A descentralização proporcionada por fontes como a solar fotovoltaica distribuída empodera os consumidores, transformando-os em produtores e consumidores de energia ao mesmo tempo, um fenômeno conhecido como "prosumers". Exemplos internacionais, como os projetos de alívio da pobreza solar na China, onde painéis solares são fornecidos a famílias carentes para que possam gerar eletricidade para uso próprio e vender o excedente, ilustram o potencial das energias renováveis para promover a inclusão social e econômica. A abordagem do Quênia, elogiada por "abordar a desigualdade social e a acessibilidade" e seu "foco no desenho e implementação de planos de energia em nível de condado, em vez de nacional" para fomentar a "inclusão e a equidade energética", oferece um exemplo concreto de como as políticas podem ser projetadas para o impacto social. Essa mudança na relação entre produção e consumo de energia tem implicações significativas para o desenho de mercados e marcos regulatórios, pois permite que indivíduos e comunidades

participem ativamente do sistema energético, democratizando o acesso à energia limpa e impulsionando o desenvolvimento regional.

3.4 Políticas Públicas para Energias Renováveis

As políticas públicas exercem papel crucial no estímulo ou na estagnação do desenvolvimento das fontes renováveis de energia. Segundo Tolmasquim (2016), programas como o PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica), criado em 2002, foram fundamentais para introduzir e impulsionar inicialmente a energia eólica e a biomassa na matriz elétrica brasileira, que antes era quase exclusivamente dominada por grandes usinas hidrelétricas e termelétricas fósseis. Os leilões de energia, implementados a partir de meados dos anos 2000, também se tornaram um importante instrumento para contratar nova capacidade de geração renovável a custos competitivos.

No entanto, autores como Castro e Dantas (2020) argumentam que os avanços institucionais e regulatórios nem sempre têm acompanhado o dinamismo tecnológico e as necessidades de expansão do setor. O Brasil ainda carece de uma política de Estado mais estável, previsível e de longo prazo para o setor energético renovável, o que pode gerar incertezas para investidores e desenvolvedores de projetos, especialmente em um cenário de rápidas mudanças tecnológicas e econômicas. Além disso, a burocracia nos processos de licenciamento ambiental e a falta de incentivos fiscais mais robustos e direcionados para toda a cadeia produtiva, incluindo a nacionalização de componentes, são frequentemente citadas como fatores que limitam um desenvolvimento ainda mais acelerado de novos projetos. O estudo de Oliveira e Maciel (2019) também aponta para a importância de integrar as políticas energéticas com as políticas de inovação, ciência e tecnologia. Para os autores, é essencial que o país invista consistentemente em pesquisa e desenvolvimento (P&D) de tecnologias nacionais para o setor de energias renováveis, a fim de

reduzir a dependência de equipamentos e soluções importadas, o que frequentemente encarece os projetos e fragiliza a balança comercial do setor. O recente Marco Legal da Geração Distribuída (Lei nº 14.300/2022) representou um avanço importante ao estabelecer diretrizes para a micro e minigeração distribuída, principalmente solar fotovoltaica, em residências, comércios e indústrias. Contudo, as discussões em torno da valoração dos atributos da geração distribuída e da tarifação pelo uso da rede elétrica (TUSD Fio B) ainda geram debates e podem afetar a atratividade futura desse modelo se não forem cuidadosamente equacionadas.

3.4.1. Estabilidade Regulatória e Inovação Política: Aprendendo com Modelos Diversos

A mera existência de políticas é insuficiente; sua previsibilidade de longo prazo, consistência e eficácia na promoção de investimentos e na condução da mudança são de suma importância. Sucessos internacionais enfatizam a qualidade e a estabilidade dos arcabouços regulatórios. Suécia, Dinamarca e Noruega, consistentemente classificadas entre os primeiros na transição energética, beneficiam-se de "arcabouços regulatórios estáveis". O Quênia tem feito "esforços agressivos em direção à prontidão para a transição" ao "melhorar seus arcabouços regulatórios". Isso demonstra que as políticas precisam ser elaboradas para fornecer sinais claros e consistentes aos investidores, ao mesmo tempo em que mitigam potenciais impactos negativos sobre os consumidores e garantem uma transição justa, aprendendo tanto com os sucessos quanto com os desafios de outros países. A experiência da "Energiewende" na Alemanha, apesar de sua ambição, enfrentou "custos significativos" e "duras verdades", com a "inflação verde" impactando as contas de eletricidade dos consumidores. Isso ressalta a necessidade de políticas que não apenas promovam as energias renováveis, mas também equilibrem os

objetivos ambientais com as realidades econômicas e a equidade social, para evitar a oposição pública e garantir um crescimento sustentável.

A monografia discute o Marco Legal da Geração Distribuída (Lei nº 14.300/2022) como um avanço importante. No entanto, países com alta penetração de geração distribuída (GD), como a Austrália, enfrentam desafios com a infraestrutura de rede tradicional não projetada para "fluxo de energia bidirecional e descentralizado". Suas soluções incluem "códigos de rede atualizados", "limites dinâmicos de exportação" e a promoção de "Usinas de Energia Virtuais (VPPs)". O sucesso da Dinamarca na integração de altas participações de energia eólica também depende de um "mercado de eletricidade bem funcionando". Esses exemplos ilustram que a inovação política se estende além de subsídios diretos ou mandatos para incluir mecanismos de mercado sofisticados e códigos de rede adaptativos que podem gerenciar as complexidades de um sistema de energia descentralizado e dinâmico. A evolução regulatória do Brasil para a geração distribuída precisa abordar proativamente os desafios de integração da rede por meio de precificação dinâmica, medição inteligente e códigos de rede atualizados que facilitem, em vez de restringir, o fluxo bidirecional de energia e a agregação de recursos distribuídos em VPPs. Isso garantirá que o crescimento da GD contribua positivamente para a estabilidade e eficiência da rede.

A Tabela 2, a seguir, apresenta um panorama das principais políticas públicas e marcos regulatórios que moldaram o desenvolvimento das energias renováveis no Brasil.

Política / Lei / Programa	Ano de Criação / Implementação	Objetivo Principal	Principais Resultados / Impactos
PROINFA (Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica)	2002	Incentivar as fontes eólica, biomassa e PCH na matriz elétrica	Inserção de mais de 3.000 MW de fontes renováveis nos primeiros anos; impulsionou o setor eólico no país

Leilões de Energia	Desde 2005	Planejar e contratar energia de forma competitiva e transparente	Redução significativa nos custos de geração (especialmente solar e eólica); atração de investimentos privados
Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012	2012	Estabelecer regras para micro e minigeração distribuída	Crescimento acelerado da geração distribuída (GD), com milhões de unidades consumidoras aderindo ao modelo
Resolução Normativa ANEEL nº 687/2015	2015	Atualizar e expandir as regras da RN 482/2012	Expansão dos limites de potência; inclusão de novas modalidades como geração compartilhada
Lei nº 14.300/2022 (Marco Legal da Geração Distribuída)	2022	Instituir um marco legal para a geração distribuída de energia	Estabeleceu transição para cobrança gradual de encargos; segurança jurídica e previsibilidade para investidores
Plano Decenal de Expansão de Energia (PDE)	Atualizado anualmente	Planejar a expansão da matriz energética brasileira a médio e longo prazo	Direcionamento de políticas públicas e investimentos em fontes renováveis
RenovaBio	2017	Promover a produção de biocombustíveis com base na redução de emissões de carbono	Emissão de Créditos de Descarbonização (CBIOS); fortalecimento do setor de biocombustíveis, especialmente o etanol

Tabela 2 - Principais Políticas Públicas e Marcos Regulatórios para Energias Renováveis no Brasil

Fonte: Autor.

3.5 Desafios e Perspectivas para as Energias Renováveis no Brasil

Apesar do avanço expressivo nas últimas décadas e do imenso potencial, o setor de energias renováveis no Brasil ainda enfrenta diversos desafios complexos que dificultam sua plena expansão e a consolidação de uma matriz

energética verdadeiramente diversificada e de baixo carbono. Esses obstáculos abrangem desde questões estruturais e regulatórias até fatores econômicos, tecnológicos e sociais.

Segundo Almeida e Silva (2020), um dos principais entraves continua sendo a infraestrutura de transmissão de energia. Como mencionado anteriormente, as regiões com maior potencial de geração eólica e solar, como o Nordeste e partes do Centro-Oeste e Sudeste, muitas vezes não estão conectadas de forma suficientemente robusta e eficiente aos grandes centros consumidores localizados predominantemente no Sudeste e Sul. Isso pode gerar gargalos no escoamento da energia, necessidade de curtailment (redução da geração por falta de capacidade de transmissão) e desperdício de energia renovável, além de exigir elevados investimentos em novas linhas de transmissão, cujos projetos são complexos e de longa maturação.

Outro desafio relevante diz respeito à intermitência inerente a fontes como a solar (que não gera à noite e tem sua produção afetada pela nebulosidade) e a eólica (cuja geração depende da velocidade do vento). Conforme observa Prado (2021), essa característica exige o desenvolvimento e a implementação de soluções para conferir maior flexibilidade e confiabilidade ao sistema, como sistemas de armazenamento de energia em larga escala (baterias, usinas hidrelétricas reversíveis), gerenciamento avançado da demanda, maior capacidade de previsão de geração e uma gestão mais inteligente e dinâmica da rede elétrica. O Brasil, embora avance, ainda investe de forma incipiente nessas tecnologias complementares quando comparado ao seu potencial e às necessidades futuras.

A burocracia excessiva e a percepção de instabilidade regulatória também são apontadas como barreiras críticas por diversos agentes do setor. Estudos como o de Ferreira e Cunha (2019) demonstram que os processos de licenciamento ambiental para projetos de energias renováveis, embora necessários, podem ser excessivamente morosos, complexos e apresentar inconsistências entre diferentes esferas governamentais, o que atrasa significativamente a implantação de novos projetos e eleva os custos de

transação. Além disso, mudanças frequentes em regras e a ausência de uma política energética de longo prazo com metas claras e sinais regulatórios estáveis podem afastar investidores e comprometer a confiança no setor.

Em termos de financiamento, o custo inicial elevado para a implementação de sistemas solares ou eólicos, especialmente para pequenos produtores, cooperativas ou consumidores residenciais, ainda se configura como um entrave significativo. Embora existam linhas de crédito específicas, como as oferecidas pelo BNDES e outros bancos de fomento, pesquisadores como Santos et al. (2022) afirmam que muitos projetos encontram dificuldades para se adequar aos critérios exigidos, enfrentam taxas de juros que podem ser elevadas dependendo do cenário econômico, ou se deparam com garantias consideradas excessivas.

Outro ponto crucial é a necessidade de maiores investimentos em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) na cadeia produtiva das energias renováveis. De acordo com Vasconcelos (2023), o Brasil ainda demonstra uma dependência considerável de tecnologias e componentes importados, especialmente no setor fotovoltaico (células, painéis, inversores) e em alguns componentes de aerogeradores, onde grande parte dos equipamentos tem origem asiática, principalmente da China. A ausência de uma indústria nacional mais sólida e competitiva em todos os elos da cadeia limita a criação de empregos de alta qualificação, encarece os projetos devido à variação cambial e torna o setor mais vulnerável a oscilações do mercado internacional e a questões geopolíticas.

Por fim, é importante destacar a resistência, por vezes sutil, de setores tradicionalmente dominantes na matriz energética. Segundo Rodrigues e Almeida (2020), pode haver uma pressão política e econômica por parte de grupos ligados aos combustíveis fósseis e, em alguns casos, a modelos de grandes hidrelétricas centralizadas, que historicamente moldaram o setor elétrico brasileiro. Essa resistência pode se manifestar na lentidão para a formulação de políticas públicas mais arrojadas e verdadeiramente transformadoras em prol de uma matriz mais diversificada e descentralizada.

Diante desses desafios multifacetados, torna-se evidente a necessidade de uma abordagem integrada, estratégica e colaborativa para o desenvolvimento sustentável das energias renováveis no Brasil. Essa discussão será aprofundada no capítulo seguinte, onde os principais problemas enfrentados pelo setor serão analisados de forma mais detalhada, com base nos pontos levantados nesta revisão.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Infraestrutura da Transmissão e Distribuição Desigual

Apesar do vasto potencial energético do Brasil, um dos maiores gargalos reside no descompasso entre a localização geográfica das principais fontes renováveis (especialmente eólica e solar) e os grandes centros consumidores. Regiões como o Nordeste concentram uma parcela significativa da nova capacidade de geração eólica e solar, devido aos seus excelentes recursos naturais, enquanto a maior parte da demanda por eletricidade está concentrada no Sudeste e Sul. De acordo com dados da Empresa de Pesquisa Energética (EPE, 2023), esse desequilíbrio geográfico impõe uma forte demanda por expansão da infraestrutura de transmissão, frequentemente resultando em congestionamentos na rede, perdas técnicas e, em alguns casos, a necessidade de restringir a geração (curtailment) para evitar sobrecargas no sistema.

Ademais, a expansão da infraestrutura de transmissão é um processo intrinsecamente lento, complexo e de alto custo. Projetos de novas linhas de alta tensão, essenciais para conectar as novas usinas renováveis ao Sistema Interligado Nacional (SIN), enfrentam longos processos de licenciamento ambiental, que podem se estender por vários anos, além de complexas questões fundiárias e desafios de engenharia. Conforme apontado por Almeida e Silva (2020), a ineficiência e a morosidade nesse processo comprometem a tempestividade da integração de novas fontes ao sistema elétrico, podendo gerar descasamento entre a entrada em operação de usinas e a disponibilidade da

infraestrutura de escoamento, prejudicando a confiabilidade do abastecimento e a atratividade dos investimentos. Esse cenário cria um dilema, pois a falta de transmissão dificulta novos projetos de geração, enquanto a ausência de geração garantida pode atrasar os investimentos em transmissão, exigindo um planejamento proativo e coordenado de longo prazo.

4.1.1 Lições de Modelos Internacionais para a Modernização da Rede

A simples expansão da infraestrutura física pode não ser suficiente para uma rede cada vez mais dominada por fontes de energia renovável variáveis. A China, o maior país em implantação de energia renovável, defende explicitamente uma mudança de paradigma de apenas adicionar megawatts para projetar um megasistema abrangente. Esse megasistema engloba não apenas linhas físicas, mas também redes inteligentes alimentadas por IA para equilibrar oferta e demanda, armazenamento de energia de longa duração e estratégias avançadas de controle. Da mesma forma, a experiência da Austrália com alta penetração de energia solar em telhados revela que as redes tradicionais não foram inicialmente projetadas para fluxo de energia bidirecional e descentralizado, levando a problemas como instabilidade de tensão, fluxo de energia reverso e balanceamento de carga. Isso indica que a solução para os desafios da rede brasileira não se limita a construir mais, mas a redesenhar fundamentalmente a arquitetura da rede e a inteligência operacional para lidar com fluxos de energia bidirecionais e geração variável. O Brasil precisa ir além de uma abordagem reativa de construção de linhas de transmissão para uma estratégia proativa e holística de modernização da rede. Isso implica um investimento significativo em infraestrutura digital, sistemas de controle avançados e a capacidade de gerenciar a geração descentralizada de forma eficaz, garantindo a resiliência e a estabilidade da rede em um futuro altamente renovável.

Além disso, exemplos internacionais demonstram que mecanismos de mercado e cooperação regional são igualmente vitais para a estabilidade da rede e a alocação eficiente de recursos. A Dinamarca, líder global na integração da energia eólica, depende fortemente do intercâmbio de energia baseado no mercado com países vizinhos e de interconexões robustas (6,4 GW de capacidade líquida de transferência) para gerenciar sua alta participação eólica. Isso permite à Dinamarca exportar o excedente de eletricidade durante a alta produção eólica e importar durante a baixa produção, utilizando efetivamente as redes de seus vizinhos como armazenamento em larga escala. A comissão de especialistas da Alemanha, enfrentando desafios semelhantes na rede, recomenda "dividir a zona de preço único de eletricidade da Alemanha" para incentivar novas capacidades onde são realmente necessárias e reduzir os custos gerais de expansão da rede e de redispatch. Esses exemplos destacam que as questões da rede não são apenas técnicas, mas estão profundamente interligadas com sinais econômicos e colaboração transfronteiriça. O Brasil poderia explorar oportunidades para uma maior integração do mercado regional de energia na América do Sul, aproveitando os diversos recursos dos países vizinhos. Internamente, reformas no desenho do mercado, como a consideração de preços zonais ou outros mecanismos que reflitam melhor os valores locais da geração e da demanda, poderiam otimizar futuros investimentos na rede e o despacho de energia renovável, reduzindo a necessidade de projetos de transmissão caros e demorados.

4.2 Intermitência das Fontes Renováveis e a Necessidade de Armazenamento

As fontes renováveis que mais crescem no Brasil e no mundo — solar fotovoltaica e eólica — são caracterizadas pela sua intermitência, ou seja, sua capacidade de gerar energia não é constante, variando conforme as condições climáticas (disponibilidade de sol e vento). Essa característica representa um

desafio técnico relevante para o Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS), que tem a responsabilidade de garantir o equilíbrio instantâneo entre a oferta e a demanda de energia em todo o país.

Segundo Prado (2021), para lidar com essa variabilidade e garantir a estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico com uma penetração crescente de renováveis intermitentes, o Brasil ainda carece de investimentos mais expressivos em tecnologias de armazenamento de energia em larga escala. Soluções como baterias de grande porte, usinas hidrelétricas reversíveis (UHRs) e, futuramente, o hidrogênio verde produzido a partir de eletrólise com energia renovável excedente, são fundamentais para armazenar energia em momentos de alta geração e baixa demanda, e injetá-la na rede quando a geração renovável diminui ou a demanda aumenta. Sem esses recursos de flexibilidade, a variabilidade da produção pode comprometer a estabilidade da rede elétrica, especialmente em momentos de pico de demanda ou de baixa concomitante de múltiplas fontes intermitentes. Essa limitação é agravada pela ainda incipiente implementação de sistemas verdadeiramente inteligentes de gestão da rede elétrica (smart grids) em escala nacional, que permitiriam maior controle, automação, otimização do fluxo de energia e resposta da demanda.

A necessidade de flexibilidade no sistema elétrico, para acomodar a variabilidade das fontes renováveis, representa um custo adicional que precisa ser considerado no planejamento energético. Embora a energia solar e eólica apresentem um LCOE baixo, a infraestrutura e as tecnologias complementares para garantir a estabilidade da rede adicionam uma camada de custo ao sistema total. Países como a Dinamarca, que atingiu 39% de sua demanda elétrica com energia eólica em 2014, desenvolveram diversas opções de flexibilidade, como o uso de interconectores para troca de energia com países vizinhos (Noruega, Suécia e Alemanha), a flexibilização de termelétricas convencionais para rampas de subida mais íngremes e tempos de partida mais curtos, e a otimização de sistemas de aquecimento distrital para que atuem como consumidores de eletricidade em momentos de alta produção eólica. A Alemanha também reconhece a necessidade de mecanismos de capacidade e novas usinas a gás

para garantir a segurança do suprimento em períodos de baixa produção renovável. Essas experiências demonstram que o sucesso da integração de renováveis exige um investimento em um conjunto diversificado de soluções que permitam a adaptação do sistema à natureza intermitente dessas fontes.

4.2.1 Soluções Abrangentes de Armazenamento de Energia: Além das Baterias

O papel do armazenamento de energia vai muito além de um simples backup. A transição energética da China enfatiza o "armazenamento de energia de longa duração para estabilizar a geração renovável" e seu papel crítico na construção de um "futuro de eletricidade limpa resiliente e confiável", particularmente para "gerenciar a variabilidade de longa duração". A experiência da Austrália com alta penetração de energia solar em telhados destaca como tecnologias inteligentes como "inversores híbridos e armazenamento em baterias" não só permitem o uso de energia noturna, mas também "melhoram a regulação de tensão e o suporte de frequência em redes locais". Isso indica que as tecnologias de armazenamento estão se tornando participantes ativos na estabilidade da rede e na eficiência operacional, permitindo uma maior penetração de energias renováveis ao fornecer serviços auxiliares e otimizar o desempenho da rede. Para o Brasil, o foco deve mudar de ver o armazenamento apenas como um meio para preencher lacunas de geração para reconhecê-lo como um integrador de sistema crítico

que aumenta a flexibilidade, a confiabilidade e o valor geral da energia renovável. Isso exige um arcabouço político mais amplo que valorize essas contribuições sistêmicas.

O cenário global de armazenamento de energia é muito mais diversificado do que apenas baterias e hidrelétricas reversíveis. Os avanços da China incluem "tecnologias de bateria e outras soluções de armazenamento, como sistemas de armazenamento de hidrogênio, térmico e mecânico". O Paraguai, apesar de sua

dominância hidrelétrica, está "voltando sua atenção para outras opções renováveis, como bioenergia, solar e eólica, em um esforço para diversificar sua matriz elétrica" , o que implica a necessidade de soluções de armazenamento variadas. O Brasil, com sua vasta infraestrutura hidrelétrica existente, possui uma vantagem única em potencial para expandir a capacidade de armazenamento por bombeamento, que oferece armazenamento em larga escala e de longa duração. No entanto, para geração distribuída e necessidades de menor duração, as baterias são cruciais. Isso sugere que uma abordagem multifacetada para o armazenamento, adaptada às necessidades específicas da rede e aos recursos disponíveis, é essencial. O Brasil deve desenvolver um portfólio estratégico de soluções de armazenamento de energia. Isso inclui otimizar a operação dos grandes reservatórios hidrelétricos existentes para flexibilidade, investir ativamente em novos projetos de armazenamento por bombeamento, acelerar a implantação de armazenamento em baterias em escala de rede e distribuída, e explorar o potencial de longo prazo de tecnologias emergentes como o hidrogênio verde para o balanço energético sazonal e aplicações industriais.

A Tabela 3 a seguir apresenta uma visão comparativa das tecnologias de armazenamento de energia e suas aplicações estratégicas:

Tipo de Tecnologia	Características Principais	Aplicação Primária em Redes Renováveis	Relevância para o Brasil
Baterias de Íon-Lítio	Resposta rápida, modular, duração curta a média (horas), alta eficiência.	Regulação de frequência, corte de picos, serviços auxiliares de rede, backup para geração distribuída.	Crescente em GD e projetos de grande escala. Essencial para flexibilidade e estabilidade da rede.
Armazenamento Hidrelétrico por Bombeamento (PHS)	Grande escala, longa duração (dias/semanas), alta eficiência, tecnologia madura.	Armazenamento sazonal, despacho de capacidade, suporte de rede em larga escala.	Grande potencial devido à vasta infraestrutura hidrelétrica existente. Crucial para balanceamento de longa duração.

Hidrogênio Verde (H ₂)	Produção via eletrólise de água com energia renovável. Armazenamento de longa duração, transporte.	Descarbonização industrial (aço, amônia), combustível para transporte pesado, armazenamento sazonal de energia, exportação.	Potencial significativo para se tornar um grande produtor e exportador, aproveitando abundância de renováveis.
Armazenamento de Energia por Ar Comprimido (CAES)	Grande escala, longa duração (horas a dias), tecnologia madura, mas menos comum.	Armazenamento de energia em grande volume, suporte de capacidade.	Potencial em regiões com formações geológicas adequadas (cavernas de sal, aquíferos).
Armazenamento de Energia Térmica (TES)	Armazena calor ou frio para uso posterior.	Aquecimento/resfriamento de edifícios, processos industriais, integração com energia solar concentrada.	Relevância para eficiência energética em setores industriais e edificações.
Volantes (Flywheels)	Resposta ultrarrápida, duração muito curta (segundos a minutos).	Regulação de frequência, estabilidade de rede de curto prazo.	Niche, mas importante para serviços auxiliares muito rápidos.

Tabela 3 - Tecnologias de Armazenamento de Energia e Suas Aplicações Estratégicas

Fonte: Autor.

4.3 Entraves Burocráticos e Ambiente Regulatório Instável

Outro problema recorrente, apontado por pesquisadores e diversos agentes do setor energético, é o excesso de burocracia e a percepção de instabilidade no ambiente regulatório para a implantação de projetos de energias renováveis. O processo de licenciamento ambiental, por exemplo, embora crucial para garantir a sustentabilidade dos empreendimentos, é frequentemente descrito como lento, excessivamente complexo, descentralizado (envolvendo órgãos federais, estaduais e, por vezes, municipais) e sujeito a interpretações divergentes, o que gera incerteza e aumenta os custos e os prazos dos projetos. Ferreira e Cunha (2019) destacam que, em muitos casos, os atrasos e as

dificuldades no processo de licenciamento podem inviabilizar economicamente projetos que seriam viáveis do ponto de vista técnico e ambiental.

Além disso, a falta de uma regulação estável, com regras claras, previsíveis e de longo prazo, pode desestimular o investimento no setor. Mudanças frequentes na legislação ou em normativas infralegais, ou mesmo a sinalização de possíveis alterações, criam um ambiente de insegurança jurídica que afeta o planejamento e a decisão de investimento, especialmente para projetos de capital intensivo e longa maturação, como são os de geração de energia. Um exemplo recente dessa instabilidade percebida foi o período de discussão e transição até a aprovação da Lei nº 14.300/2022, que estabeleceu o novo marco legal para a geração distribuída. Apesar dos avanços que a lei representou ao trazer maior segurança jurídica para o segmento, o período de debates e as mudanças nas regras de compensação geraram incertezas que afetaram o ritmo de crescimento de sistemas fotovoltaicos residenciais e comerciais durante certo tempo. A instabilidade regulatória introduz um risco político significativo que pode deter investimentos, independentemente da atratividade econômica intrínseca dos projetos. O licenciamento ambiental, embora vital, pode se tornar um gargalo administrativo que, paradoxalmente, retarda a transição energética que visa proteger.

4.3.1 Estabilidade Regulatória e Inovação Política: Aprendendo com Modelos Diversos

A mera existência de políticas é insuficiente; sua previsibilidade de longo prazo, consistência e eficácia na promoção de investimentos e na condução da mudança são de suma importância. Sucessos internacionais enfatizam a qualidade e a estabilidade dos arcabouços regulatórios. Suécia, Dinamarca e Noruega, consistentemente classificadas entre os primeiros na transição energética, beneficiam-se de "arcabouços regulatórios estáveis". O Quênia tem feito "esforços agressivos em direção à prontidão para a transição" ao "melhorar

seus arcabouços regulatórios". Isso demonstra que as políticas precisam ser elaboradas para fornecer sinais claros e consistentes aos investidores, ao mesmo tempo em que mitigam potenciais impactos negativos sobre os consumidores e garantem uma transição justa, aprendendo tanto com os sucessos quanto com os desafios de outros países. A experiência da "Energiewende" na Alemanha, apesar de sua ambição, enfrentou "custos significativos" e "duras verdades", com a "inflação verde" impactando as contas de eletricidade dos consumidores. Isso ressalta a necessidade de políticas que não apenas promovam as energias renováveis, mas também equilibrem os objetivos ambientais com as realidades econômicas e a equidade social, para evitar a oposição pública e garantir um crescimento sustentável.

A monografia discute o Marco Legal da Geração Distribuída (Lei nº 14.300/2022) como um avanço importante. No entanto, países com alta penetração de geração distribuída (GD), como a Austrália, enfrentam desafios com a infraestrutura de rede tradicional não projetada para "fluxo de energia bidirecional e descentralizado". Suas soluções incluem "códigos de rede atualizados", "limites dinâmicos de exportação" e a promoção de "Usinas de Energia Virtuais (VPPs)". O sucesso da Dinamarca na integração de altas participações de energia eólica também depende de um "mercado de eletricidade bem funcionando". Esses exemplos ilustram que a inovação política se estende além de subsídios diretos ou mandatos para incluir mecanismos de mercado sofisticados e códigos de rede adaptativos que podem gerenciar as complexidades de um sistema de energia descentralizado e dinâmico. A evolução regulatória do Brasil para a geração distribuída precisa abordar proativamente os desafios de integração da rede por meio de precificação dinâmica, medição inteligente e códigos de rede atualizados que facilitem, em vez de restringir, o fluxo bidirecional de energia e a agregação de recursos distribuídos em VPPs. Isso garantirá que o crescimento da GD contribua positivamente para a estabilidade e eficiência da rede.

4.4 Dificuldade de Financiamento e Baixo Investimento em Pesquisa e Desenvolvimento Tecnológico

A transição para uma matriz energética mais limpa e diversificada exige investimentos vultosos, e o acesso a financiamento em condições adequadas representa um dos maiores entraves à expansão mais acelerada das energias renováveis no Brasil, especialmente para determinados segmentos. O financiamento de projetos, principalmente os de pequeno e médio porte ou aqueles propostos por cooperativas e consumidores individuais (no caso da geração distribuída), ainda é limitado e, muitas vezes, de difícil acesso.

Instituições financeiras tradicionais podem tratar o setor com maior cautela devido à percepção de riscos associados à intermitência, à necessidade de contratos de longo prazo ou à complexidade tecnológica, impondo exigências burocráticas complexas, prazos de amortização que nem sempre se alinham com o fluxo de caixa dos projetos, taxas de juros elevadas (especialmente em cenários de política monetária restritiva) e a necessidade de garantias robustas, que nem sempre estão ao alcance de empreendedores locais ou pequenos produtores. Segundo Santos et al. (2022), apesar da existência de linhas de crédito específicas para energias renováveis — como programas do BNDES, fundos constitucionais e o Fundo Clima — a maior parte dos projetos, especialmente os de menor escala, enfrenta dificuldades para se enquadrar nos critérios técnicos e financeiros exigidos ou para navegar pela complexidade dos processos de aprovação. Esse cenário limita a democratização do acesso à energia solar e eólica, podendo concentrar os investimentos em grandes grupos econômicos com maior capacidade de estruturação financeira e negociação.

4.4.1 Fomento à Inovação Doméstica e Cadeias de Suprimentos: Reduzindo a Dependência Externa

Adicionalmente, o Brasil ainda investe comparativamente pouco em pesquisa, desenvolvimento e inovação tecnológica (PD&I) no setor energético renovável, quando contrastado com seu potencial e com o investimento de países líderes na transição energética. Conforme apontado por Vasconcelos (2023), a dependência de tecnologias e componentes importados, como painéis solares fotovoltaicos, inversores de frequência e alguns componentes críticos de aerogeradores, especialmente da China e de outros países asiáticos, deixa o país vulnerável a oscilações do mercado internacional, variações cambiais e interrupções em cadeias de suprimento globais. Esse déficit de inovação e de produção local competitiva compromete não apenas a competitividade da indústria nacional e a geração de empregos de maior valor agregado, mas também a capacidade do Brasil de desenvolver soluções tecnológicas adaptadas às suas específicas condições climáticas, geográficas e socioeconômicas. A ausência de uma política industrial mais robusta e coordenada para o setor de energia renovável — com foco no adensamento da cadeia produtiva local, na capacitação técnica especializada e no fomento a parcerias estratégicas entre universidades, centros de pesquisa e o setor privado — é um fator que compromete o fortalecimento e a soberania tecnológica do país na transição energética. Leite et al. (2016) argumentam que essa lacuna em inovação tecnológica pode perpetuar um modelo de desenvolvimento dependente, dificultando a consolidação de uma transição energética verdadeiramente justa, inclusiva e soberana.

O investimento em P&D não se limita apenas ao financiamento de pesquisa básica; ele exige um ecossistema abrangente que apoie todo o ciclo de vida da inovação, desde o conceito até a implantação no mercado. A experiência da China, embora demonstre rápidos avanços tecnológicos e um aumento nas patentes, também destaca o desafio persistente do "vale da morte da inovação" — a lacuna entre protótipos de laboratório e soluções comercialmente viáveis. A China aborda isso por meio de "esforços acelerados de P&D, rápida escalada de projetos piloto e arcabouços políticos mais fortes". Isso sugere que o Brasil precisa de uma abordagem mais estratégica e

coordenada para P&D em energia renovável. Isso envolve não apenas aumentar o financiamento, mas também criar mecanismos robustos (por exemplo, capital de risco, incubadoras, parcerias público-privadas, sandboxes regulatórios) para mitigar riscos e acelerar a comercialização de inovações domésticas, superando o "vale da morte" para tecnologias desenvolvidas localmente.

A dependência do Brasil de componentes importados, especialmente da China, embora atualmente econômica, representa um risco de segurança energética a longo prazo e limita a criação de valor doméstico. A escala massiva da China impulsionou a redução dos custos globais, mas sua dominância também cria um ponto único de falha para as cadeias de suprimentos globais e, potencialmente, alavancagem geopolítica. A pressão global por políticas verdes e a ênfase na segurança energética sugerem que a nacionalização das cadeias de suprimentos não é apenas um benefício econômico (criação de empregos, valor agregado), mas também um imperativo estratégico para a independência e resiliência energética. A experiência da Alemanha com a "inflação verde" devido às políticas verdes globais também aponta para as vulnerabilidades econômicas de depender fortemente de cadeias de suprimentos externas. Uma política industrial robusta é necessária para fomentar a manufatura, montagem e produção local de componentes para tecnologias de energia renovável. Isso não só criaria empregos de alta qualidade e estimularia o crescimento econômico, mas também aumentaria a soberania tecnológica do Brasil e reduziria sua vulnerabilidade a interrupções na cadeia de suprimentos global e flutuações cambiais.

4.5 Resistência dos Setores Tradicionais da Matriz Energética

Outro obstáculo importante, frequentemente discutido na literatura sobre transição energética, reside na resistência, por vezes velada, dos setores que historicamente dominaram a matriz energética brasileira. Estes incluem segmentos ligados à exploração e uso de petróleo e gás natural, e também, em

certos contextos, o modelo tradicional de grandes hidrelétricas centralizadas. Esses setores, representados por empresas consolidadas e com considerável influência política e econômica, podem atuar para manter seu protagonismo na formulação de políticas públicas e na definição das diretrizes energéticas do país, o que pode retardar uma transição mais ágil para fontes renováveis mais modernas, descentralizadas e de menor impacto ambiental.

Rodrigues e Almeida (2020) destacam que o lobby dos combustíveis fósseis ainda se faz presente em diversas instâncias decisórias do setor elétrico e no Congresso Nacional. Essa influência pode se traduzir em subsídios diretos ou indiretos para fontes fósseis, na manutenção de um arcabouço regulatório que, em alguns aspectos, pode favorecê-las, ou em atrasos na plena regulamentação e incentivo a fontes renováveis mais disruptivas, como a geração distribuída ou o hidrogênio verde. A hegemonia histórica das grandes hidrelétricas, embora sejam fontes renováveis, também é, por vezes, tratada como um fator que pode dificultar uma diversificação mais rápida e equilibrada da matriz. Grandes usinas, apesar de sua importância para o sistema, causam impactos ambientais e sociais significativos, como o alagamento de vastas áreas, perda de biodiversidade, alteração de regimes hídricos e o deslocamento compulsório de comunidades tradicionais e ribeirinhas. A priorização contínua de grandes empreendimentos hidrelétricos em detrimento de um portfólio mais diversificado de renováveis (incluindo PCHs, solar, eólica e biomassa) pode, segundo alguns analistas, refletir uma inércia institucional e a influência de interesses já estabelecidos. Essa resistência institucional, seja ela ativa ou passiva, pode tornar mais lenta a transição energética e reforçar um modelo de geração mais centralizado e concentrador, que pode não estar plenamente alinhado com as diretrizes internacionais de descarbonização profunda, justiça climática e desenvolvimento sustentável distribuído.

4.5.1 Navegando as Dinâmicas Sociopolíticas: Além da Resistência Técnica

A transição energética não é apenas uma mudança técnica ou econômica, mas uma profunda transformação social que pode levar ao deslocamento de empregos e à disrupção econômica em comunidades específicas. A "Energiewende" da Alemanha fornece um exemplo claro dos desafios sociais: "regiões conhecidas pela mineração de carvão... ainda dependem fortemente da produção de carvão para seu bem-estar", e a "mudança do carvão apresenta obstáculos para essas áreas, pois o emprego na mineração desempenha um papel em sua força de trabalho". Em contraste, o sucesso do Quênia é parcialmente atribuído a "abordar a desigualdade social e a acessibilidade" e fomentar a "inclusão e a equidade energética" por meio do planejamento energético em nível de condado. Isso demonstra que abordar proativamente os impactos sociais é crucial para obter e manter o apoio público à transição. Superar a resistência à expansão da energia renovável exige mais do que argumentos técnicos e econômicos; exige um arcabouço robusto de "transição justa". Esse arcabouço deve abordar os impactos sociais da descarbonização, incluindo a requalificação profissional, a diversificação econômica para as comunidades afetadas (por exemplo, regiões carboníferas) e a garantia de que os benefícios da energia renovável (por exemplo, acesso à energia, empregos locais) sejam distribuídos equitativamente em todos os segmentos da sociedade.

A monografia menciona o "lobby" e a "pressão política e econômica" de grupos tradicionais. Isso não é meramente resistência passiva, mas uma força ativa que molda as políticas. A experiência da Alemanha mostra como "o governo de coalizão anterior não conseguiu adotar legislação para introduzir leilões de subsídios para construir novas usinas a gás", levando a atrasos. Isso ilustra como a inércia política, o lobby de interesses estabelecidos e a dependência de trajetória inerente a grandes sistemas de energia podem atrasar ou distorcer a transição energética, mesmo quando os argumentos técnicos e econômicos para as energias renováveis são fortes. A hegemonia histórica das grandes

hidrelétricas no Brasil também reflete uma forma de dependência de trajetória que pode dificultar a diversificação. A monografia se beneficiaria de uma análise mais explícita da economia política. Isso envolveria examinar como as estruturas de poder, os interesses estabelecidos e a inércia institucional influenciam a formulação e implementação de políticas no setor energético brasileiro. Compreender essas dinâmicas é crucial para projetar estratégias eficazes para construir um consenso político mais amplo e superar a resistência arraigada a uma matriz energética renovável mais diversificada e descentralizada.

4.6 Articulação dos Desafios e Implicação para Transição Energética

A análise dos principais entraves ao avanço das energias renováveis no Brasil revela um cenário complexo, no qual o vasto potencial técnico e ambiental do país colide com desafios estruturais, econômicos, institucionais e políticos profundamente interconectados. A carência de infraestrutura adequada para a transmissão da energia gerada, especialmente em regiões de grande potencial solar e eólico, limita o pleno aproveitamento dessas fontes e pode desencorajar novos investimentos se não for planejada e executada com antecedência e visão de longo prazo. Ao mesmo tempo, a intermitência intrínseca das energias renováveis variáveis exige investimentos significativos em tecnologias de armazenamento, em modernização da rede (smart grids) e em uma gestão mais flexível e inteligente do sistema elétrico, o que ainda está em estágios iniciais de desenvolvimento e implementação em larga escala no país.

A burocracia nos processos de licenciamento e a percepção de instabilidade regulatória prejudicam o ambiente de negócios, gerando insegurança jurídica, elevando os custos de transação e afastando investidores, especialmente os de capital internacional. Soma-se a isso a dificuldade de acesso a financiamentos com condições atrativas, principalmente para pequenos e médios produtores e para consumidores residenciais que desejam adotar a geração distribuída, o que compromete a descentralização da geração

e o papel das renováveis na promoção da inclusão energética e na democratização do acesso. O déficit de inovação tecnológica e a dependência de equipamentos e componentes importados são reflexos de uma ausência de política industrial mais assertiva e de longo prazo voltada ao setor energético renovável. Isso fragiliza a cadeia produtiva nacional, limita a geração de empregos qualificados no país e torna o Brasil mais vulnerável a variações do mercado externo e a questões geopolíticas que afetam as cadeias de suprimento globais.

Por fim, a resistência, ainda que sutil, de setores tradicionalmente dominantes na matriz energética brasileira representa uma barreira política e cultural à modernização e diversificação acelerada do setor. A atuação de grupos com interesses estabelecidos pode contribuir para manter um modelo energético mais centralizado e baseado em grandes empreendimentos, em detrimento de um sistema mais distribuído, resiliente e baseado em fontes limpas e sustentáveis. O enfrentamento articulado desses desafios é, portanto, crucial para que o Brasil possa efetivamente concretizar seu potencial na liderança da transição energética global.

4.7 O Crescente Protagonismo das Renováveis na Matriz Brasileira

A revisão bibliográfica confirmou o papel de destaque do Brasil no cenário mundial de energias renováveis, com uma matriz elétrica caracterizada por uma alta participação de fontes limpas, historicamente impulsionada pela energia hidráulica. No entanto, um dos achados mais significativos é o crescimento expressivo e a diversificação proporcionada por outras fontes renováveis nas últimas duas décadas, como a eólica, a solar fotovoltaica (tanto centralizada quanto distribuída) e a biomassa. Essas fontes vêm progressivamente aumentando sua participação, diversificando a matriz, reduzindo a dependência de termelétricas fósseis (especialmente em períodos de crise hídrica) e

contribuindo para os compromissos de redução de emissões de gases de efeito estufa assumidos pelo país.

A energia eólica consolidou-se como uma fonte altamente competitiva, especialmente na região Nordeste, que detém alguns dos melhores regimes de vento do mundo. A energia solar fotovoltaica, impulsionada pela queda acentuada nos custos dos equipamentos e por marcos regulatórios como a Resolução Normativa nº 482/2012 (atualizada pela Lei nº 14.300/2022 para geração distribuída), tem experimentado uma expansão exponencial, tanto em grandes usinas quanto em telhados de residências, comércios e indústrias. A biomassa, por sua vez, continua desempenhando um papel importante na geração de energia firme, especialmente a partir de resíduos agrícolas e florestais, contribuindo para a economia circular e a gestão de resíduos em certos setores produtivos.

4.8 O Impacto dos Avanços Tecnológicos na Viabilidade das Renováveis

A análise da literatura revelou que os avanços tecnológicos contínuos têm sido um dos principais vetores do desenvolvimento e da crescente competitividade das energias renováveis. A evolução das turbinas eólicas para modelos maiores, mais eficientes e capazes de operar em condições de vento menos intensas tem expandido as fronteiras de viabilidade dessa fonte. Similarmente, o aumento da eficiência de conversão das células fotovoltaicas e a redução dos custos de produção dos painéis solares tornaram a energia solar uma das opções mais baratas em leilões de energia em diversos países, incluindo o Brasil.

A digitalização, a automação, o uso de inteligência artificial e a Internet das Coisas (IoT) estão otimizando a operação e manutenção de plantas renováveis, melhorando a previsibilidade da geração e facilitando a integração dessas fontes variáveis ao sistema elétrico. O desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia, embora ainda em fase de maturação e com

custos relativamente elevados para algumas aplicações em larga escala, é apontado como crucial para mitigar a intermitência e aumentar a flexibilidade do sistema. As redes inteligentes (smart grids) surgem como um paradigma necessário para gerenciar um sistema com alta penetração de recursos energéticos distribuídos e fluxos bidirecionais de energia.

4.9 Análise Crítica dos Desafios e Barreiras Identificados na Literatura

Apesar dos avanços e do potencial, a revisão bibliográfica também apontou para a persistência de desafios e barreiras significativas que dificultam uma expansão ainda mais acelerada e equitativa das energias renováveis no Brasil. Os custos de investimento inicial para algumas tecnologias, embora decrescentes, ainda podem ser uma barreira, especialmente para pequenos consumidores ou em regiões com menor acesso a capital. A infraestrutura de transmissão e distribuição necessita de contínua expansão e modernização para acomodar o aumento da geração renovável, especialmente em áreas geograficamente distantes dos centros de carga, e para lidar com a bidirecionalidade imposta pela geração distribuída. As políticas públicas e os marcos regulatórios, embora tenham evoluído, ainda precisam de aprimoramento para garantir maior segurança jurídica de longo prazo, atrair investimentos de forma contínua, promover a concorrência e simplificar processos burocráticos, como o licenciamento ambiental, sem comprometer os rigores socioambientais. A integração eficiente das energias renováveis variáveis com as fontes despacháveis (como hidráulica com reservatório e térmica) requer um planejamento integrado e uma coordenação operacional sofisticada, além de mecanismos de mercado que valorizem os atributos de flexibilidade e confiabilidade. A falta de uma política industrial robusta para o setor, que fomente a produção local de componentes e a inovação tecnológica nacional, foi identificada como uma vulnerabilidade que limita a geração de valor agregado no país e mantém uma dependência externa.

4.10 Perspectivas Futuras e Recomendações Estratégicas

A análise dos resultados da revisão bibliográfica permite traçar perspectivas promissoras para o setor de energias renováveis no Brasil, condicionadas à superação dos desafios identificados. O país possui um vasto potencial de recursos naturais, uma crescente conscientização social e empresarial sobre a importância da sustentabilidade, e um setor produtivo cada vez mais engajado na transição para uma economia de baixo carbono. A expansão das energias renováveis pode trazer múltiplos benefícios, não apenas ambientais (redução de GEE), mas também econômicos (geração de empregos, atração de investimentos, desenvolvimento de novas cadeias produtivas) e sociais (melhora da segurança energética, desenvolvimento regional, redução da dependência de combustíveis fósseis importados em certos casos).

Para que esse potencial seja plenamente realizado, é fundamental que o governo, em suas diversas esferas, o setor privado, a academia e a sociedade civil trabalhem de forma coordenada e estratégica.

4.10.1. Explorando Tecnologias Emergentes e Tendências Futuras: O Horizonte de Possibilidades

A monografia aborda os avanços tecnológicos em energia solar e eólica e menciona brevemente o "potencial do hidrogênio verde" em sua delimitação do tema, mas o potencial transformador do hidrogênio verde pode ser significativamente expandido. Exemplos internacionais destacam seu potencial multifacetado. A "eletrificação profunda e descarbonização na indústria pesada" da China depende da "produção de hidrogênio baseada em energias renováveis, produção de aço e manufatura química baseadas em hidrogênio". A Visão 2030 da Arábia Saudita inclui investimentos em "projetos relacionados ao hidrogênio"

para "aumentar suas exportações não petrolíferas". Isso demonstra que o hidrogênio verde não é meramente um vetor de energia para eletricidade ou transporte, mas um facilitador crucial para a descarbonização de setores difíceis de eletrificar diretamente (por exemplo, indústria pesada, transporte marítimo, aviação) e uma potencial nova *commodity* de exportação. O Brasil, com seu vasto potencial de energia renovável (hidrelétrica, solar, eólica), está em uma posição única para produzir hidrogênio verde competitivo. O Brasil tem o potencial de se tornar um líder global na produção de hidrogênio verde, aproveitando seus abundantes recursos renováveis. Isso poderia criar uma nova fronteira econômica, atrair investimentos estrangeiros significativos e contribuir para a descarbonização tanto de sua economia doméstica quanto das cadeias de suprimentos globais, indo além das exportações de energia tradicionais.

O documento (China) observa que "quase 60% das tecnologias de energia de emissão líquida zero na China ainda não estão prontas para o mercado", exigindo "esforços acelerados de P&D, rápida escalada de projetos piloto e arcabouços políticos mais fortes" para superar o "vale da morte da inovação". Isso ressalta que as tecnologias emergentes, ao contrário da energia solar e eólica maduras, precisam de apoio político significativo e direcionado, bem como de investimento estratégico, para transitar da pesquisa para a viabilidade comercial. A lenta expansão do hidrogênio identificada na Alemanha ilustra ainda mais os desafios de escalar tecnologias nascentes sem políticas e mecanismos de mercado adequados. O Brasil precisa identificar estrategicamente quais tecnologias emergentes (além do domínio atual de solar/eólica) deseja impulsionar. Isso exige o desenvolvimento de arcabouços políticos específicos (por exemplo, financiamento de projetos piloto, *sandboxes* regulatórios, créditos fiscais de P&D, contratos por diferença de carbono) para mitigar riscos e acelerar seu desenvolvimento e adoção no mercado, garantindo que superem o "vale da morte da inovação".

4.10.2. Planejamento Energético Integrado e de Longo Prazo: Lições Internacionais

É essencial que o planejamento energético contemple a expansão da geração renovável de forma coordenada com a expansão da transmissão, internalizando os custos e benefícios socioambientais das diferentes fontes. A experiência de países como Suécia, Dinamarca e Noruega, que se destacam por estruturas energéticas diversificadas, marcos regulatórios estáveis, altos investimentos em pesquisa e desenvolvimento, e esquemas de precificação de carbono, oferece valiosas lições. A China, por sua vez, demonstra a necessidade de um "megasistema" que integre redes inteligentes e armazenamento de energia para gerenciar a crescente participação de renováveis.

A Tabela 4, a seguir, sintetiza desafios comuns na integração de energias renováveis e as soluções adotadas por diferentes países, oferecendo um panorama comparativo para o Brasil.

Desafio Comum	Soluções Adotadas Globalmente (Exemplos de Países)
Intermitência das Fontes	- Sistemas de armazenamento de energia (baterias, hidrogênio verde, armazenamento térmico/mecânico). - Flexibilização de usinas termelétricas convencionais (Dinamarca, Alemanha). - Gerenciamento avançado da demanda e previsão de geração.
Infraestrutura de Transmissão e Distribuição Inadequada	- Expansão e modernização de linhas de transmissão para conectar centros de geração e consumo (Austrália, Dinamarca). - Redes elétricas inteligentes (Smart Grids) para fluxo bidirecional e otimização (China, Austrália). - Interconectores para troca de energia com países vizinhos (Dinamarca).
Custos Iniciais Elevados e Acesso a Financiamento	- Leilões de energia competitivos para reduzir custos (Brasil). - Linhas de crédito de baixo juros e subsídios para projetos (China). - Fundos de fomento e mecanismos de garantia inovadores (Brasil).

Burocracia e Instabilidade Regulatória	- Marcos legais claros e estáveis para segurança jurídica (Brasil, Suécia, Dinamarca, Noruega). - Simplificação de processos de licenciamento ambiental. - Políticas de longo prazo com metas claras (China - 14º Plano Quinquenal, Alemanha - 80% renováveis até 2050).
Dependência Tecnológica e Baixo P&D Nacional	- Fomento à pesquisa, desenvolvimento e inovação (PD&I) em tecnologias nacionais (China - aumento de patentes). - Políticas industriais para adensamento da cadeia produtiva local.
Resistência de Setores Tradicionais	- Implementação de políticas de transição justa para requalificação de trabalhadores (Alemanha).
- Mecanismos de mercado que valorizem atributos de flexibilidade e confiabilidade de renováveis. - Combate a subsídios para combustíveis fósseis.
Equidade e Acesso Social	- Projetos de geração distribuída e programas de alívio da pobreza energética (China - PV Program). - Foco em planos energéticos em nível subnacional para inclusão (Quênia).

Tabela 4 - Desafios Comuns na Integração de Renováveis e Soluções Adotadas Globalmente

Fonte: Autor.

4.10.3. Fortalecimento e Modernização do Arcabouço Regulatório

É crucial estabelecer regras claras, estáveis e que incentivem a inovação e a competição, simplificando processos burocráticos sem renunciar ao rigor técnico e ambiental. A redução da incerteza regulatória é um fator determinante para atrair e reter investimentos de longo prazo no setor.

4.10.4. Fomento à Inovação, Pesquisa e Desenvolvimento da Indústria Nacional

Devem ser implementadas políticas de fomento à Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I), apoiando a cadeia produtiva local de equipamentos e componentes e promovendo a formação de mão de obra

qualificada. Esse investimento é vital para reduzir a dependência externa, fortalecer a indústria nacional e garantir a soberania tecnológica do Brasil na transição energética.

4.10.5. Estratégias para Ampliar e Democratizar o Acesso a Financiamento

É fundamental ampliar e facilitar o acesso a financiamento, especialmente para projetos de geração distribuída, cooperativas de energia e pequenos produtores, com linhas de crédito atrativas e mecanismos de garantia inovadores. Isso contribuirá para democratizar o acesso à energia limpa e impulsionar a adesão a essas tecnologias em diferentes escalas, promovendo a inclusão energética.

4.10.6. Investimento em Soluções de Armazenamento e Resiliência da Rede

É imprescindível investir em soluções de flexibilidade, como armazenamento de energia em larga escala, redes inteligentes (smart grids) e resposta da demanda, para garantir a segurança e confiabilidade do sistema com alta penetração de renováveis. A capacidade de gerenciar a intermitência das fontes solar e eólica é um pilar para a estabilidade do sistema elétrico.

4.10.7. Promoção de uma Transição Energética Justa e Inclusiva

As políticas públicas devem considerar os impactos sociais e econômicos da transição, buscando requalificar trabalhadores de setores tradicionais e garantir que os benefícios das energias renováveis alcancem todas as regiões e camadas da população. A experiência de países como Quênia e Tunísia, que

têm focado na equidade e no acesso universal à energia em suas estratégias de transição, serve de modelo para o Brasil.

4.10.8. Avenidas de Pesquisa Futura

Sugere-se áreas específicas para futuras pesquisas acadêmicas que emergem dos achados da monografia e das melhorias propostas, tais como:

- Modelagem tecnoeconômica detalhada de opções de armazenamento de energia de longa duração (por exemplo, hidrogênio verde, CAES, hidrelétricas por bombeamento avançadas) para as necessidades específicas da rede brasileira.
- Estudos empíricos sobre os impactos socioeconômicos e a aceitação comunitária de projetos renováveis descentralizados (por exemplo, energia solar comunitária, microrredes) em regiões brasileiras específicas.
- Análise comparativa de políticas de mecanismos de precificação de carbono, sua aplicabilidade e potencial impacto no setor energético e na economia brasileira em geral.
- Uma análise mais aprofundada da economia política da transição energética no Brasil, focando no engajamento das partes interessadas, na construção de coalizões e na superação da inércia institucional.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em conclusão, a exploração do cenário das energias renováveis no Brasil revela um horizonte promissor, marcado por avanços notáveis e desafios complexos que demandam atenção e ação coordenada. A investigação minuciosa empreendida nesta monografia descortina um emaranhado de obstáculos que ainda se interpõem à plena concretização de uma matriz energética nacional genuinamente renovável e amplamente diversificada.

Embora o país ostente uma matriz elétrica com significativa participação de fontes limpas, historicamente ancorada na robustez da energia hídrica, a estratégia de diversificação, abraçando a energia solar, eólica, a biomassa e as pequenas centrais hidrelétricas (PCHs), emerge como um imperativo categórico. Essa pluralidade de fontes transcende a mera mitigação das mudanças climáticas, tema de crescente urgência nos debates contemporâneos, erigindo-se como um pilar fundamental para a salvaguarda da segurança energética da nação perante eventos climáticos extremos, para o cultivo de uma sustentabilidade ambiental abrangente e para a disseminação da justiça social, ao impulsionar o desenvolvimento em diversas regiões e democratizar o acesso à energia.

A superação dos entraves identificados — como a infraestrutura de transmissão ainda aquém das necessidades, a natureza intermitente das fontes solar e eólica, a morosidade do licenciamento ambiental, as dificuldades de financiamento, a necessidade de maior inovação tecnológica nacional e a inércia de setores tradicionais — clama por um esforço coordenado e multifacetado. Neste cenário, algumas avenidas de ação se delineiam como cruciais para catalisar a transição energética brasileira de maneira eficaz e célere.

Em primeiro plano, torna-se essencial um planejamento integrado e de longo prazo que contemple a expansão da geração e da transmissão de energia de forma sinérgica e estratégica, estabelecendo conexões robustas entre as regiões de maior potencial renovável e os centros de consumo, otimizando o fluxo energético e minimizando as perdas. Concomitantemente, o investimento substancial e contínuo em Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação (PD&I) assume um papel primordial na criação de tecnologias adaptadas ao contexto brasileiro, na redução da dependência de equipamentos estrangeiros e no fortalecimento da indústria nacional. A otimização e a modernização dos processos de licenciamento ambiental, sem jamais negligenciar a proteção do meio ambiente e a participação da sociedade, representam outro passo fundamental para destravar projetos promissores e fomentar um ambiente de investimento mais atrativo e seguro.

Ademais, a ampliação do acesso a linhas de crédito especialmente direcionadas para projetos de energias renováveis, com condições financeiras favoráveis e adequadas às diversas categorias de produtores e consumidores, configura-se como um instrumento poderoso para democratizar a geração de energia limpa e impulsionar a adesão a essas tecnologias em diferentes escalas. A instituição de uma regulamentação clara, estável e com visão de futuro abrangente, que ofereça segurança jurídica aos investidores e estimule o desenvolvimento de novas tecnologias e modelos de negócio inovadores, como a geração distribuída, o armazenamento de energia e as redes inteligentes, é igualmente crucial para pavimentar o caminho para um sistema energético mais moderno e resiliente. A implementação de políticas públicas de transição justa, que considerem os impactos sociais e econômicos dessa transformação, garantindo a requalificação profissional de trabalhadores e a criação de empregos de qualidade nos novos setores da economia verde, representa um imperativo ético e uma estratégia inteligente para assegurar o apoio da sociedade a esse processo. Por fim, o fortalecimento da governança no setor energético e o combate a interesses que possam obstaculizar a transição para um modelo mais sustentável são medidas indispensáveis para garantir a efetividade das políticas públicas e o alinhamento das ações com os objetivos de descarbonização da economia e os compromissos climáticos assumidos pelo Brasil no cenário internacional.

Em suma, munido de firme vontade política, colaboração genuína e eficaz entre governo, setor empresarial, academia e sociedade civil, e uma visão de futuro clara e ambiciosa, o Brasil não apenas possui o potencial de alcançar suas metas de transição energética, mas também de se consagrar como um líder global na construção de um modelo de desenvolvimento energético que seja intrinsecamente limpo, profundamente inovador, verdadeiramente inclusivo e genuinamente sustentável, legando às futuras gerações um planeta mais saudável e um futuro mais próspero e resiliente.

REFERÊNCIAS

ABRHIDRO – Associação Brasileira de Recurso Hídricos. Principal fonte de energia de cada estado do Brasil, 03 de março de 2023. Disponível em: <https://www.site.abrhidro.org.br/post/principal-fonte-de-energia-de-cada-estado-do-brasil>. Acesso em: 27 maio 2025.

ALMEIDA, J. C.; SILVA, P. F. Desafios da energia solar no Brasil: potencial e barreiras. *Revista Brasileira de Energia*, v. 33, p. 45-60, 2020.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. Atlas de energia elétrica do Brasil. 4. ed. Brasília: ANEEL, 2022.

BLOOMBERG NEW ENERGY FINANCE. State of the Industry. Apresentação de Michael Liebreich no Bloomberg New Energy Finance Summit, Londres, 19 set. 2017. Disponível em: (<https://data.bloomberglp.com/professional/sites/24/2017/09/BNEF-Summit-London-2017-Michael-Liebreich-State-of-the-Industry.pdf>). Acesso em: 27 maio 2025.

BRASIL. Agência Nacional de Energia Elétrica. Resolução Normativa nº 482, de 17 de abril de 2012. Estabelece as condições gerais para o acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica. Disponível em: <https://www.gov.br/aneel/pt-br>. Acesso em: 6 maio 2025.

BRASIL. Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. Disponível em: <https://legislacao.presidencia.gov.br>. Acesso em: 7 maio 2025.

CASTRO, L. F.; DANTAS, C. L. Políticas públicas e a transição energética no Brasil: uma análise da geração distribuída. *Revista de Políticas Energéticas*, v. 12, p. 98-112, 2020.

Clean Energy Wire. Germany to face challenges in energy supply security in coming years, govt advisors. Disponível em: <https://www.cleanenergywire.org/news/germany-face-challenges-energy-supply-security-coming-years-govt-advisors>. Acesso em: 25 maio 2025.

CLOUGLOBAL. Green Policies and Economic Strain Lessons from Germany's Energiewende. Disponível em: <https://clouglobal.com/green-policies-and-economic-strain-lessons-from-germanys-energiewende/>. Acesso em: 25 maio 2025.

EPE – EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. Balanço Energético Nacional 2023: ano base 2022. Brasília: EPE, 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br>. Acesso em: 6 maio 2025.

FERREIRA, M. G.; CUNHA, A. P. O impacto dos licenciamentos ambientais na expansão de fontes renováveis no Brasil. *Revista de Meio Ambiente e Energia*, v. 45, p. 20-35, 2019.

GIL, A. C. Métodos e técnicas de pesquisa social. 6. ed. São Paulo: Atlas, 2008.

GOLDEMBERG, J. Energia: o estado e o futuro. São Paulo: Companhia das Letras, 2009.

GOLDEMBERG, J. Energia e desenvolvimento sustentável. *Estudos Avançados*, v. 26, n. 74, p. 7-20, 2012.

LEITE, F. S.; FERNANDES, C. R.; SOUSA, D. P. A indústria de energias renováveis no Brasil: uma análise da produção nacional e da dependência tecnológica. *Revista de Economia e Tecnologia*, v. 19, p. 44-60, 2016.

OLIVEIRA, R. S.; MACIEL, T. M. Integração das políticas de inovação e energia renovável no Brasil: desafios e oportunidades. *Revista Brasileira de Políticas Públicas*, v. 9, n. 2, p. 88-104, 2019.

PEREIRA, E. B. et al. Potencial da energia solar no Brasil: atualizações e projeções. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 10, n. 1, p. 15-32, 2021.

PRADO, S. R. O impacto da intermitência nas energias renováveis no Brasil: desafios e soluções. *Revista de Tecnologia Energética*, v. 21, p. 67-81, 2021.

ROCHA, T. M.; SILVA, A. C. Desigualdade na distribuição da geração eólica e solar no Brasil: um estudo regional. *Revista Brasileira de Energia Regional*, v. 5, n. 1, p. 22-38, 2022.

RODRIGUES, R.; ALMEIDA, A. O lobby das hidrelétricas e os desafios para a transição energética no Brasil. *Estudos Políticos e Econômicos*, v. 14, p. 123-139, 2020.

SACHS, I. Desenvolvimento: incluyente, sustentável, sustentado. Rio de Janeiro: Garamond, 2008.

SANTOS, R. L.; MENDES, T. F.; MOREIRA, J. O. O financiamento da energia solar no Brasil: uma análise das políticas públicas e do acesso ao crédito. *Revista Brasileira de Economia Energética*, v. 7, p. 34-49, 2022.

TOLMASQUIM, M. T. (Coord.). Fontes renováveis de energia elétrica no Brasil. Rio de Janeiro: Synergia Editora, 2016.

VASCONCELOS, F. T. Desafios para a inovação tecnológica no setor de energias renováveis no Brasil. *Revista de Ciência e Inovação*, v. 28, p. 88-102, 2023.