

OPORTUNIDADES E DESAFIOS DA EXPLORAÇÃO DE ENERGIAS RENOVÁVEIS NO BRASIL: UMA ANÁLISE INTEGRADA DO POTENCIAL EÓLICO E FOTOVOLTAICO NA TRANSIÇÃO ENERGÉTICA**OPPORTUNITIES AND CHALLENGES OF RENEWABLE ENERGY EXPLOITATION IN BRAZIL: AN INTEGRATED ANALYSIS OF WIND AND PHOTOVOLTAIC POTENTIAL IN THE ENERGY TRANSITION** <https://doi.org/10.63330/aurumpub.041-003>**Joelson Lopes da Paixão**

Doutorando e Mestre em Engenharia Elétrica. Especialista em áreas da Educação e relacionadas à Engenharia Elétrica. Bacharel em Engenharia Elétrica, licenciado em Matemática, Física, Pedagogia e em Formação de professores para a EPT. Foi aluno de IC, atuou como professor na EBTT e participou de vários projetos de P&D. Atualmente, é pesquisador e doutorando em Engenharia Elétrica

E-mail: joelson.paixao@hotmail.com

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/6907289379766915>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0001-8874-5151>

Alzenira da Rosa Abaide

Doutora em Engenharia Elétrica
Professora titular da Universidade Federal de Santa Maria – UFSM

E-mail: alzenira@ufsm.br

Lattes: <http://lattes.cnpq.br/2427825596072142>

Orcid: <https://orcid.org/0000-0003-1043-1608>

RESUMO

O Brasil possui condições excepcionais para o desenvolvimento de energias renováveis, particularmente eólica e solar fotovoltaica, que se consolidam como pilares fundamentais da transição energética nacional. Este artigo analisa o potencial estratégico dessas fontes na matriz energética brasileira, examinando suas características técnicas, evolução regulatória, oportunidades de desenvolvimento e principais desafios. O país detém aproximadamente 500 GW de potencial eólico e níveis de irradiação solar entre 1.500 e 2.300 kWh/m²/ano, superiores aos observados em países europeus líderes no setor. A complementaridade sazonal entre geração eólica e hidrelétrica constitui vantagem competitiva singular, permitindo preservação dos reservatórios hídricos durante períodos críticos e otimizando a operação do sistema elétrico nacional. Apesar dos avanços significativos, com redução expressiva de custos e expansão acelerada da capacidade instalada, persistem desafios relacionados à infraestrutura de transmissão, intermitência, armazenamento de energia, aspectos socioambientais e necessidade de financiamento adequado. O estudo destaca ainda as oportunidades em tecnologias emergentes como eólica offshore, sistemas agrivoltaicos, integração com mobilidade elétrica e desenvolvimento da cadeia produtiva nacional, fundamentais para a construção de um sistema energético sustentável, resiliente e competitivo.

Palavras-chave: Energia renovável; Energia eólica; Energia solar fotovoltaica; Transição energética; Matriz energética brasileira; Sistemas de armazenamento; Microrredes.

ABSTRACT

Brazil has exceptional conditions for the development of renewable energies, particularly wind and photovoltaic solar, which are consolidating as fundamental pillars of the national energy transition. This article analyzes the strategic potential of these sources in the Brazilian energy matrix, examining their technical characteristics, regulatory evolution, development opportunities, and main challenges. The country holds approximately 500 GW of wind potential and solar irradiation levels between 1,500 and 2,300 kWh/m²/year, higher than those observed in leading European countries. The seasonal complementarity between wind and hydroelectric generation constitutes a unique competitive advantage, allowing preservation of water reservoirs during critical periods and optimizing the operation of the national electrical system. Despite significant advances, with substantial cost reduction and accelerated expansion of installed capacity, challenges persist related to transmission infrastructure, intermittency, energy storage, socio-environmental aspects, and the need for adequate financing. The study also highlights opportunities in emerging technologies such as offshore wind, agrivoltaic systems, integration with electric mobility, and development of the national production chain, fundamental for building a sustainable, resilient, and competitive energy system.

Keywords: Renewable energy; Wind energy; Photovoltaic solar energy; Energy transition; Brazilian energy matrix; Storage systems; Microgrids.

1 INTRODUÇÃO

O Brasil encontra-se em posição privilegiada no cenário global de energias renováveis, detendo recursos naturais excepcionais que possibilitam o desenvolvimento robusto tanto da energia eólica quanto da fotovoltaica. Com uma matriz energética historicamente baseada em hidroeletricidade, o país atravessa um momento de transição e diversificação estratégica, impulsionado por fatores técnicos, econômicos e ambientais que convergem para criar um ambiente favorável aos investimentos em fontes renováveis intermitentes (Paixão; Abaide, 2025).

A integração de fontes renováveis à matriz energética brasileira representa não apenas uma resposta às demandas ambientais globais e aos compromissos climáticos assumidos pelo país no Acordo de Paris, mas também uma oportunidade estratégica de fortalecimento da segurança energética nacional. A dependência histórica da geração hidrelétrica, embora vantajosa em diversos aspectos e responsável por conferir ao Brasil uma das matrizes elétricas mais limpas do mundo, expõe o sistema a vulnerabilidades

relacionadas à variabilidade climática, eventos hidrológicos extremos e mudanças nos padrões de precipitação observadas nas últimas décadas.

Neste contexto, a diversificação por meio de fontes eólicas e solares emerge como estratégia fundamental para garantir o fornecimento contínuo e confiável de energia elétrica, ao mesmo tempo em que promove o desenvolvimento tecnológico, a geração de empregos qualificados e a descarbonização progressiva do setor energético. A transição energética brasileira apresenta características únicas, beneficiando-se de uma base hidrelétrica consolidada que pode atuar como fonte de flexibilidade para integrar a geração intermitente de fontes eólicas e solares.

Adicionalmente, o país tem experimentado uma transformação acelerada em seu setor elétrico, com a participação crescente de energias renováveis variáveis exigindo novos modelos de planejamento, operação e regulação. A geração distribuída fotovoltaica, por exemplo, tem revolucionado o relacionamento entre consumidores e o sistema elétrico, promovendo a democratização do acesso à geração de energia e introduzindo novos desafios técnicos e regulatórios (Paixão; Abaide; Sausen, 2021).

Este artigo apresenta uma análise abrangente e atualizada das oportunidades e desafios associados à exploração dos potenciais eólico e fotovoltaico no Brasil, considerando aspectos técnicos, regulatórios, econômicos, socioambientais e as perspectivas de integração com tecnologias emergentes que permeiam o desenvolvimento dessas fontes no contexto nacional contemporâneo.

2 O POTENCIAL EÓLICO BRASILEIRO

2.1 CARACTERÍSTICAS E DISTRIBUIÇÃO GEOGRÁFICA

O território brasileiro apresenta condições ventosas excepcionais, particularmente nas regiões Nordeste, Sul e em áreas específicas do Sudeste. De acordo com o Atlas do Potencial Eólico Brasileiro, elaborado pelo Centro de Referência para Energia Solar e Eólica Sérgio de Salvo Brito (CRESESB), o país possui potencial eólico estimado em aproximadamente 500 GW, considerando ventos a 100 metros de altura (Amarante et al., 2001). Este valor representa uma estimativa conservadora, uma vez que estudos mais recentes, considerando turbinas com alturas de cubo superiores e tecnologias mais eficientes, indicam que o potencial real pode ser ainda maior.

A região Nordeste concentra as condições mais favoráveis para geração eólica, com destaque para os estados da Bahia, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí. Esses estados beneficiam-se de ventos constantes e de alta intensidade, com fatores de capacidade frequentemente superiores a 40%, valores considerados excepcionais no contexto internacional e que superam significativamente os observados em mercados eólicos maduros como Estados Unidos e Europa (EPE, 2021). O regime de ventos no Nordeste caracteriza-se por forte sazonalidade complementar ao regime hidrológico das principais bacias hidrográficas brasileiras, aspecto de significativa relevância estratégica que será abordado posteriormente.

A região Sul do Brasil também apresenta potencial eólico relevante, especialmente no Rio Grande do Sul, onde parques eólicos operam com fatores de capacidade médios superiores a 35%. Adicionalmente, áreas do litoral do Sudeste, particularmente no Rio de Janeiro e em São Paulo, demonstram condições adequadas para desenvolvimento de projetos eólicos, embora com maior complexidade devido à densidade populacional e questões fundiárias.

Além do potencial onshore consolidado, o Brasil possui extraordinário potencial para energia eólica offshore, com condições de vento favoráveis ao longo de extenso litoral, profundidades adequadas para diferentes tecnologias de fundação e proximidade de grandes centros de consumo. Este segmento representa a nova fronteira da energia eólica nacional e será abordado em seção específica deste artigo.

2.2 EVOLUÇÃO DO SETOR E MARCO REGULATÓRIO

A exploração comercial da energia eólica no Brasil iniciou-se efetivamente nos anos 2000, com a criação do Programa de Incentivo às Fontes Alternativas de Energia Elétrica (PROINFA) em 2002, estabelecido pela Lei nº 10.438/2002. Este programa representou o primeiro esforço sistemático de fomento às energias renováveis alternativas no país, contratando inicialmente 1.423 MW de capacidade eólica através de contratos de longo prazo com remuneração garantida (Dutra; Szklo, 2008).

Embora o PROINFA tenha sido fundamental para iniciar a trajetória da energia eólica no Brasil, criando as primeiras experiências operacionais e permitindo o desenvolvimento inicial da cadeia de suprimentos, o grande impulso ao setor ocorreu a partir de 2009, com a inclusão da fonte eólica nos leilões regulados de energia. Esta mudança de modelo representou um marco divisor no desenvolvimento do setor eólico brasileiro.

Os leilões promovidos pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) e coordenados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) estabeleceram um ambiente altamente competitivo que resultou em reduções substanciais e contínuas nos preços da energia eólica. Entre 2009 e 2019, o preço médio da energia eólica comercializada em leilões caiu de aproximadamente R\$ 148/MWh para valores inferiores a R\$ 100/MWh, tornando-se uma das fontes mais competitivas da matriz brasileira e demonstrando competitividade inclusive frente a fontes tradicionais como hidrelétricas e termelétricas (ABEEÓLICA, 2020).

Esta trajetória de redução de custos foi viabilizada por diversos fatores convergentes: o desenvolvimento tecnológico internacional, com turbinas cada vez mais eficientes e de maior porte; a formação de uma cadeia produtiva nacional; a curva de aprendizado dos desenvolvedores de projetos; e as excelentes condições de vento do Brasil, que resultam em elevados fatores de capacidade e, consequentemente, maior geração de energia por MW instalado.

O marco regulatório brasileiro para o setor eólico tem evoluído continuamente para acompanhar a maturidade do setor. Além dos leilões regulados, que continuam sendo o principal mecanismo de contratação de nova capacidade, o mercado livre de energia tem ganhado importância crescente, permitindo que grandes consumidores contratem energia eólica diretamente de geradores através de contratos bilaterais de longo prazo. Esta diversificação dos mecanismos de contratação tem conferido maior resiliência ao setor e atraído diferentes perfis de investidores.

2.3 OPORTUNIDADES ESTRATÉGICAS

2.3.1 Complementaridade Hidrológica

Uma das oportunidades mais significativas e únicas da energia eólica no Brasil reside em sua complementaridade sazonal com a geração hidrelétrica. Durante o período de estiagem no sistema hidrológico brasileiro, tipicamente entre junho e novembro, quando os níveis dos reservatórios das hidrelétricas encontram-se em seus patamares mais baixos e a afluência é reduzida, os ventos no Nordeste atingem sua maior intensidade, proporcionando picos de geração eólica. Esta característica permite que a geração eólica contribua para a preservação dos reservatórios das hidrelétricas, funcionando como um "hedge" natural contra crises hídricas e reduzindo a necessidade de despacho térmico (Schmidt et al., 2016).

Estudos realizados pela EPE demonstram que a integração otimizada entre geração hidrelétrica e eólica pode reduzir significativamente os custos operacionais do sistema, diminuir a volatilidade dos preços de energia no mercado de curto prazo e aumentar a segurança energética nacional (EPE, 2019). Esta complementaridade constitui vantagem competitiva singular do Brasil, não observada com mesma intensidade em outros mercados globais, e representa um dos principais argumentos técnicos e econômicos para a expansão contínua da fonte eólica na matriz brasileira.

A sinergia entre geração hidrelétrica e eólica vai além da complementaridade sazonal. Os reservatórios das hidrelétricas podem atuar como "baterias gigantes", armazenando água quando a geração eólica é abundante e despachando energia quando os ventos são menos intensos. Esta flexibilidade operacional permite maximizar o aproveitamento dos recursos renováveis disponíveis e minimizar o desperdício de energia, configurando um sistema híbrido hidro-eólico altamente eficiente e sustentável.

Estudos recentes têm avançado na modelagem e otimização desta complementaridade, desenvolvendo estratégias operacionais que maximizam os benefícios sinérgicos entre as fontes. A implementação de sistemas de previsão meteorológica cada vez mais precisos, combinada com modelos avançados de otimização, permite ao Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS) planejar com maior antecedência a operação integrada das diferentes fontes, resultando em ganhos operacionais e econômicos significativos (Paixão; Abaide, 2025).

2.3.2 Desenvolvimento Industrial e Cadeia Produtiva

A expansão da energia eólica proporcionou o desenvolvimento de uma cadeia produtiva nacional relevante e diversificada. Fabricantes internacionais de aerogeradores estabeleceram unidades de produção no Brasil, incluindo empresas como Vestas, GE Renewable Energy, Siemens Gamesa e Nordex, atraídas tanto pelo mercado doméstico crescente quanto pelas políticas de conteúdo local vigentes até 2017 (Nogueira; Pires, 2016).

Este adensamento industrial gerou oportunidades em diversos segmentos da cadeia de valor, incluindo fabricação de torres, pás, naceles, componentes eletrônicos e sistemas de controle. Empresas brasileiras de estruturas metálicas se especializaram na fabricação de torres, aproveitando a expertise existente no país. A produção de pás eólicas, componente tecnologicamente complexo, também se estabeleceu no Brasil com a instalação de plantas de fabricantes internacionais (Paixão; Sausen; Abaide, 2024).

Adicionalmente, desenvolveu-se expertise nacional significativa em serviços de engenharia, construção, operação e manutenção de parques eólicos. Empresas de engenharia brasileiras adquiriram competências avançadas em estudos de viabilidade técnico-econômica, projeto executivo de parques eólicos, construção de infraestrutura civil e elétrica, e operação de ativos de geração. Esta expertise tem permitido inclusive a exportação de serviços para outros países latino-americanos, criando empregos qualificados e promovendo transferência tecnológica.

O setor eólico tem se destacado também como importante gerador de empregos em regiões historicamente menos desenvolvidas do país, particularmente no interior do Nordeste. Estima-se que a indústria eólica brasileira tenha gerado mais de 200 mil empregos diretos e indiretos ao longo de sua trajetória, contribuindo para o desenvolvimento regional e a interiorização de atividades econômicas de alto valor agregado.

Entretanto, desafios persistem no desenvolvimento da cadeia produtiva nacional. A ausência atual de políticas de conteúdo local tem levado a um aumento nas importações de componentes, particularmente os de maior conteúdo tecnológico. A retomada de políticas que estimulem a nacionalização progressiva da cadeia, equilibrando competitividade com desenvolvimento industrial, constitui desafio importante para as próximas fases de expansão do setor.

2.3.3 Eólica Offshore: A Nova Fronteira

O potencial eólico offshore brasileiro representa uma fronteira emergente de grande magnitude que tem atraído crescente interesse de investidores nacionais e internacionais. Estudos preliminares indicam que o Brasil possui potencial técnico offshore superior a 700 GW, considerando profundidades de até 50

metros e distâncias de até 50 km da costa, valores que podem ser significativamente ampliados com a consideração de tecnologias de fundação flutuante (EPE, 2020).

As regiões Sul e Sudeste apresentam condições particularmente favoráveis para desenvolvimento de projetos offshore, com destaque para os estados do Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Rio de Janeiro. Estas regiões combinam excelentes condições de vento com proximidade de grandes centros de consumo, infraestrutura portuária desenvolvida e profundidade adequada para diferentes tecnologias de fundação. O Nordeste também apresenta áreas promissoras, especialmente no litoral do Ceará e Rio Grande do Norte.

Embora ainda careça de marco regulatório definitivo, com discussões em andamento no Congresso Nacional sobre a cessão de uso de áreas marítimas e modelos de contratação, projetos-piloto estão em desenvolvimento e diversas empresas têm manifestado interesse em investir nesta tecnologia no Brasil. Espera-se que a regulamentação seja consolidada nos próximos anos, abrindo caminho para investimentos significativos e posicionando o Brasil entre os principais mercados emergentes de eólica offshore globalmente.

A energia eólica offshore possui vantagens adicionais importantes em relação à eólica onshore, incluindo maior fator de capacidade devido a ventos mais intensos e constantes no mar, menor impacto visual e fundiário, ausência de restrições relacionadas a ruído, e proximidade dos grandes centros de consumo litorâneos, reduzindo necessidades de investimento em transmissão. Por outro lado, os custos de instalação e manutenção são significativamente superiores, e o setor requer desenvolvimento de infraestrutura especializada e capacitação de mão de obra.

O desenvolvimento da eólica offshore no Brasil representa não apenas oportunidade de ampliação do potencial de geração renovável, mas também de criação de uma nova cadeia industrial, geração de empregos especializados e posicionamento tecnológico em um segmento que experimentará crescimento acelerado globalmente nas próximas décadas. A experiência acumulada pelo Brasil no setor de óleo e gás offshore pode ser parcialmente aproveitada, facilitando a transição para esta nova indústria.

3 O POTENCIAL SOLAR FOTOVOLTAICO

3.1 IRRADIAÇÃO SOLAR E VANTAGENS CLIMÁTICAS

O Brasil apresenta níveis de irradiação solar privilegiados em todo seu território, com valores médios anuais entre 1.500 e 2.300 kWh/m², superiores aos observados em países europeus que lideram a implantação de energia solar, como Alemanha (com média de 1.100 kWh/m²/ano) e Espanha (com média de 1.650 kWh/m²/ano) (Pereira et al., 2017). Mesmo as regiões menos favorecidas do território nacional possuem irradiação superior à média europeia, conferindo ao país vantagem comparativa significativa e demonstrando que projetos fotovoltaicos são viáveis tecnicamente em todas as regiões brasileiras.

O Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através de extensa campanha de medições e modelagem, identifica o Nordeste, especialmente os estados da Bahia, Piauí e o semiárido nordestino, como as regiões de maior potencial, com irradiação global horizontal superior a 2.200 kWh/m²/ano (Pereira et al., 2017). Estas regiões apresentam não apenas alta irradiação, mas também baixa variabilidade interanual e condições climáticas favoráveis, com baixa pluviosidade e nebulosidade durante a maior parte do ano.

Contudo, mesmo regiões com menor incidência de irradiação relativa, como o Sul do Brasil, mantêm excelente viabilidade técnica e econômica para projetos fotovoltaicos, especialmente quando comparadas a regiões europeias e norte-americanas de alta latitude. Esta distribuição favorável do recurso solar por todo o território nacional representa vantagem estratégica, permitindo geração próxima aos centros de consumo e reduzindo necessidades de investimento em transmissão de longa distância.

Além da intensidade da irradiação, o Brasil beneficia-se de outras características climáticas favoráveis à geração fotovoltaica. Temperaturas elevadas, embora reduzam ligeiramente a eficiência dos módulos fotovoltaicos, são compensadas pela maior irradiância. A inclinação do território, predominantemente tropical, permite que sistemas fotovoltaicos instalados com inclinações relativamente baixas captem eficientemente a radiação solar durante todo o ano. Adicionalmente, muitas regiões do país apresentam baixa incidência de fenômenos climáticos extremos como granizo e nevascas, que podem danificar sistemas fotovoltaicos, conferindo maior confiabilidade e vida útil aos ativos de geração.

3.2 MODALIDADES DE GERAÇÃO E MARCO REGULATÓRIO

A energia solar fotovoltaica no Brasil desenvolveu-se simultaneamente em duas modalidades principais: geração centralizada (grandes usinas fotovoltaicas conectadas à rede de transmissão ou distribuição) e geração distribuída (sistemas de pequeno e médio porte instalados em residências, comércios e indústrias). Esta dualidade tem permitido a democratização do acesso à tecnologia fotovoltaica e contribuído para a rápida expansão da fonte no país.

3.2.1 Geração Centralizada

Os primeiros leilões específicos para energia solar ocorreram em 2014, com o Leilão de Energia de Reserva. Desde então, a fonte solar experimentou expansão acelerada em leilões regulados, beneficiando-se da queda acentuada nos custos dos módulos fotovoltaicos no mercado internacional, resultado do desenvolvimento tecnológico e do aumento da escala de produção, particularmente na China. Entre 2014 e 2020, o preço médio da energia solar em leilões reduziu-se de aproximadamente R\$ 215/MWh para valores próximos a R\$ 85/MWh, tornando-se competitiva com fontes tradicionais e, em muitos casos, apresentando preços inferiores aos de novas hidrelétricas e termelétricas (ABSOLAR, 2021).

Os estados do Nordeste concentram a maior parte dos projetos de geração centralizada contratados em leilões, aproveitando-se não apenas da elevada irradiação solar, mas também da disponibilidade de terras a preços competitivos, infraestrutura de transmissão desenvolvida inicialmente para os parques eólicos e posteriormente expandida, e condições climáticas favoráveis, com baixa pluviosidade e nebulosidade. Estados como Bahia, Piauí, Ceará e Pernambuco têm recebido investimentos bilionários em complexos solares de grande porte.

A região Sudeste também tem experimentado crescimento na geração centralizada, particularmente em Minas Gerais, onde diversos projetos foram contratados em leilões recentes. A proximidade dos grandes centros de consumo e a infraestrutura de transmissão robusta constituem vantagens importantes desta região. A geração centralizada fotovoltaica tem contribuído significativamente para a diversificação da matriz elétrica brasileira e para a redução da dependência de fontes térmicas em períodos de baixa hidrologia.

Um aspecto importante da geração centralizada é o desenvolvimento de projetos híbridos, que combinam geração solar e eólica no mesmo complexo, aproveitando sinergias de infraestrutura (subestação, linhas de transmissão, sistemas de supervisão) e complementaridade de geração entre as fontes. Estes projetos híbridos representam tendência crescente e permitem melhor utilização da infraestrutura de transmissão e maior previsibilidade de geração (Paixão; Abaide, 2025).

3.2.2 Geração Distribuída

A Resolução Normativa ANEEL nº 482/2012, posteriormente atualizada pela RN 687/2015 e mais recentemente pela Lei nº 14.300/2022 (Marco Legal da Geração Distribuída), estabeleceu as regras para a micro e minigeração distribuída, criando o sistema de compensação de energia elétrica (net metering brasileiro). Este marco regulatório foi fundamental para impulsionar o crescimento exponencial da geração solar distribuída, especialmente em instalações residenciais e comerciais.

Entre 2012 e 2024, a geração distribuída fotovoltaica expandiu-se de alguns megawatts para mais de 30 GW de capacidade instalada, distribuídos em milhões de unidades consumidoras em todo o território nacional (ABSOLAR, 2024). Este crescimento extraordinário, que posicionou o Brasil entre os principais mercados de geração distribuída fotovoltaica globalmente, foi impulsionado por diversos fatores: redução contínua nos custos dos sistemas fotovoltaicos, disponibilidade de linhas de financiamento específicas, tarifas de energia elétrica elevadas em muitas regiões do país, e conscientização crescente sobre benefícios econômicos e ambientais da tecnologia.

Este modelo democratizou o acesso à geração de energia, permitindo que consumidores residenciais, comerciais e industriais reduzissem suas faturas de energia, aumentassem sua independência energética e contribuíssem para a descarbonização da matriz elétrica. A geração distribuída tem também importantes

impactos sociais e educacionais, promovendo a conscientização sobre eficiência energética e fontes renováveis (Paixão; Abaide; Sausen, 2021).

Entretanto, o crescimento acelerado da geração distribuída tem trazido também desafios técnicos e regulatórios. A alta penetração de geração fotovoltaica em circuitos de distribuição pode causar impactos na qualidade de energia, sobretensões, operação inadequada de dispositivos de proteção e redução na capacidade de controle do sistema. Estudos sobre o impacto da microgeração fotovoltaica em redes de distribuição têm sido fundamentais para desenvolver estratégias de mitigação e garantir a integração segura e confiável destes sistemas (Paixão; Abaide; Sausen, 2021).

A Lei nº 14.300/2022 introduziu mudanças importantes no modelo de compensação, estabelecendo gradualmente a cobrança pelo uso do fio para a energia injetada na rede, com o objetivo de garantir a sustentabilidade econômica das distribuidoras e a justa repartição dos custos do sistema elétrico. Embora estas mudanças tenham gerado debates sobre possíveis impactos no ritmo de crescimento da geração distribuída, análises indicam que a tecnologia permanece economicamente atrativa na maioria dos casos, especialmente considerando a continuidade da redução de custos dos sistemas.

3.3 OPORTUNIDADES ESTRATÉGICAS

3.3.1 Diversificação da Matriz e Segurança Energética

A energia solar fotovoltaica contribui fundamentalmente para a diversificação da matriz elétrica brasileira, reduzindo a dependência histórica da hidroeletricidade. Em um contexto de mudanças climáticas, crescente variabilidade hidrológica e eventos climáticos extremos mais frequentes, a diversificação constitui elemento essencial para a segurança energética de longo prazo (Lucena et al., 2010).

Adicionalmente, a geração solar apresenta perfil complementar à demanda elétrica diária, com pico de produção coincidente com o período de maior consumo na maioria das regiões brasileiras, particularmente nas horas de maior temperatura e uso de sistemas de condicionamento de ar. Esta característica reduz a necessidade de acionamento de termelétricas de custo elevado nos horários de ponta, contribuindo para a redução dos custos de operação do sistema e dos preços de energia no mercado de curto prazo (Paixão; Abaide, 2026).

A geração solar, especialmente a distribuída, contribui também para a redução de perdas técnicas no sistema elétrico, uma vez que a energia é gerada próxima aos pontos de consumo, reduzindo a necessidade de transporte através de extensas linhas de transmissão e distribuição. Esta característica é particularmente relevante em um país de dimensões continentais como o Brasil.

Outro aspecto importante relacionado à segurança energética é a capacidade da geração solar de contribuir para a eletrificação de regiões remotas e de difícil acesso através de sistemas isolados (off-grid).

Esta aplicação é especialmente relevante na região amazônica e em comunidades rurais distantes da rede elétrica convencional, promovendo inclusão energética e desenvolvimento social.

3.3.2 Desenvolvimento Tecnológico e Industrial

A cadeia produtiva da energia solar no Brasil encontra-se em estágio de desenvolvimento, com oportunidades significativas em diversos segmentos. Embora a fabricação de módulos fotovoltaicos ainda seja dominada por importações, principalmente da Ásia, há crescimento expressivo em setores complementares, incluindo fabricação de inversores, estruturas de suporte metálicas, sistemas de armazenamento e desenvolvimento de software para projeto, monitoramento e otimização de sistemas fotovoltaicos (Nascimento, 2017).

Empresas brasileiras têm se especializado no desenvolvimento de soluções de engenharia adaptadas às condições locais, sistemas de monitoramento e gerenciamento de energia, e serviços de instalação e manutenção. O país conta com significativo contingente de integradores e instaladores certificados, criando uma indústria de serviços robusta e geradora de empregos distribuídos por todo o território nacional.

Iniciativas de pesquisa e desenvolvimento em instituições brasileiras têm investigado tecnologias adaptadas às condições tropicais, incluindo desenvolvimento de módulos com melhor desempenho em altas temperaturas, estudos de degradação acelerada sob alta irradiação e umidade característica do clima brasileiro, sistemas híbridos fotovoltaico-térmicos que aproveitam simultaneamente a conversão fotovoltaica e o calor gerado pelos módulos, e desenvolvimento de tecnologias de armazenamento adequadas ao contexto nacional.

A retomada de políticas industriais que incentivem a nacionalização progressiva da cadeia produtiva, especialmente em componentes de maior valor agregado como módulos fotovoltaicos e inversores, representa oportunidade importante para ampliar a geração de empregos qualificados, desenvolver competências tecnológicas e reduzir a dependência de importações. O mercado brasileiro, com sua escala significativa e crescente, oferece potencial atrativo para instalação de plantas de fabricação, desde que acompanhado de políticas adequadas e previsibilidade regulatória.

3.3.3 Integração com Agricultura e Pecuária: Sistemas Agrivoltaicos

Os sistemas agrivoltaicos, que combinam geração fotovoltaica com atividades agropecuárias na mesma área, representam oportunidade inovadora especialmente relevante para o Brasil, país com extensa área agricultável e elevado potencial solar. Estes sistemas permitem otimização do uso da terra, gerando energia enquanto mantêm produção agrícola ou pastoril, com benefícios potenciais múltiplos (Dinesh; Pearce, 2016).

Entre os benefícios dos sistemas agrivoltaicos destaca-se a redução da evapotranspiração, resultando em menor demanda hídrica para irrigação, aspecto particularmente relevante em regiões de clima semiárido. A sombra proporcionada pelos painéis fotovoltaicos pode proteger culturas sensíveis à radiação excessiva, reduzir o estresse térmico em animais em sistemas de pecuária, e melhorar as condições de trabalho em atividades agrícolas realizadas sob sol intenso.

Adicionalmente, os sistemas agrivoltaicos proporcionam diversificação de renda para produtores rurais, combinando receitas da venda de energia com a produção agrícola ou pecuária tradicional. Esta diversificação pode aumentar a resiliência econômica de propriedades rurais e contribuir para a viabilidade de pequenas e médias propriedades.

Experiências internacionais em países como Alemanha, Japão, França e mais recentemente China e Estados Unidos demonstram viabilidade técnica e econômica dos sistemas agrivoltaicos. Diversos arranjos são possíveis, desde painéis elevados que permitem a passagem de máquinas agrícolas até configurações verticais bifaciais adequadas para pastagens. Iniciativas-piloto começam a surgir no Brasil, particularmente em regiões de agricultura irrigada no Nordeste, áreas de fruticultura e propriedades vinícolas.

O desenvolvimento de sistemas agrivoltaicos no Brasil requer ainda pesquisas sobre culturas adequadas, configurações ótimas para diferentes tipos de agricultura, impactos microclimáticos e aspectos econômicos. Políticas públicas que incentivem a implantação de projetos-piloto e a pesquisa aplicada neste segmento podem acelerar o desenvolvimento desta tecnologia promissora.

3.3.4 Eletrificação Rural e Inclusão Social

A energia solar fotovoltaica oferece solução técnica e economicamente viável para eletrificação de comunidades remotas não conectadas à rede elétrica convencional. O programa Luz para Todos, que levou energia elétrica a milhões de brasileiros entre 2004 e 2018, representou avanço extraordinário na universalização do acesso à energia. Entretanto, ainda restam comunidades isoladas sem acesso, particularmente na região amazônica, onde a extensão de redes elétricas convencionais é tecnicamente desafiadora e economicamente inviável (Pinho et al., 2008).

Sistemas fotovoltaicos isolados (off-grid), frequentemente combinados com baterias para armazenamento e, em alguns casos, com geração diesel de backup, representam alternativa sustentável para estas populações. A energia solar permite o fornecimento contínuo e confiável de eletricidade para necessidades básicas como iluminação, refrigeração de alimentos e medicamentos, comunicações e bombeamento de água, promovendo inclusão social, desenvolvimento humano e oportunidades econômicas em regiões remotas.

A implementação de sistemas isolados em comunidades amazônicas tem demonstrado impactos positivos significativos na qualidade de vida, saúde (através da refrigeração de vacinas e medicamentos),

educação (permitindo iluminação adequada para estudos noturnos e acesso a recursos digitais) e atividades econômicas. O desenvolvimento de modelos sustentáveis de operação e manutenção destes sistemas, incluindo capacitação de membros das comunidades, constitui desafio importante para garantir a sustentabilidade de longo prazo destas iniciativas.

3.3.5 Integração com Mobilidade Elétrica

A sinergia entre geração solar fotovoltaica e mobilidade elétrica representa oportunidade estratégica emergente para o Brasil. Sistemas de recarga de veículos elétricos alimentados por energia solar, seja através de instalações dedicadas ou de integração com a rede elétrica com alta penetração de geração fotovoltaica, podem contribuir para a descarbonização simultânea dos setores de energia e transportes.

Estudos recentes têm explorado a integração de microrredes solares com estações de recarga rápida para veículos elétricos, incluindo sistemas de gerenciamento de energia que otimizam o despacho entre geração fotovoltaica, armazenamento em baterias e demanda de recarga (Paixão et al., 2025; Danielsson et al., 2025). Estes sistemas podem contribuir para reduzir os impactos da recarga de veículos elétricos na rede de distribuição, aproveitando a geração solar local e reduzindo necessidades de reforços em infraestrutura.

A instalação de estações de recarga solar em rodovias, centros comerciais e edifícios corporativos representa não apenas oportunidade de negócio, mas também estratégia de promoção da mobilidade elétrica, ampliando a infraestrutura disponível e aumentando a confiança dos consumidores na viabilidade dos veículos elétricos (Paixão; Sausen; Abaide, 2024).

4 DESAFIOS E BARREIRAS

Apesar das oportunidades abundantes e dos avanços significativos já alcançados, a exploração plena dos potenciais eólico e fotovoltaico enfrenta desafios significativos que devem ser endereçados para garantir desenvolvimento sustentável, otimizado e socialmente justo do setor de energias renováveis no Brasil.

4.1 INFRAESTRUTURA DE TRANSMISSÃO

A concentração dos melhores recursos eólicos e solares em regiões distantes dos principais centros de consumo, particularmente o Nordeste brasileiro, demanda investimentos substanciais em linhas de transmissão de alta tensão para escoamento da energia gerada. O escoamento da energia gerada para os mercados consumidores do Sudeste e Sul requer planejamento integrado e execução coordenada entre geração e transmissão, desafio que tem causado atrasos, restrições operacionais e, em alguns casos, curtailment (limitação) de geração renovável (Aquila et al., 2017).

O modelo brasileiro de leilões de transmissão, embora tenha sido exitoso em atrair investimentos e expandir a rede, enfrenta desafios relacionados ao timing entre a entrada em operação de novos empreendimentos de geração e a disponibilização da infraestrutura de transmissão necessária. Atrasos em projetos de transmissão têm resultado em situações em que parques eólicos e solares ficam prontos, mas não podem operar em plena capacidade devido à ausência de infraestrutura adequada para escoamento da energia.

Adicionalmente, a natureza intermitente da geração eólica e solar impõe requisitos adicionais à infraestrutura de transmissão em termos de capacidade de resposta a variações rápidas de fluxo de potência e necessidade de sistemas de controle avançados. O planejamento da expansão da transmissão deve considerar não apenas a capacidade instalada de geração, mas também os padrões de geração e variabilidade associados às fontes renováveis.

A implementação de linhas de transmissão em corrente contínua (HVDC), que permitem o transporte de grandes blocos de energia a longas distâncias com menores perdas, representa opção tecnológica promissora para o contexto brasileiro. Entretanto, os custos elevados destas instalações exigem análises cuidadosas de viabilidade econômica.

Outro aspecto relevante é a necessidade de expansão e reforço das redes de distribuição para acomodar o crescimento da geração distribuída fotovoltaica. A penetração crescente de geração distribuída em circuitos de baixa e média tensão demanda investimentos em automação, sistemas de monitoramento e controle, e, em alguns casos, reforços em transformadores e condutores.

4.2 INTERMITÊNCIA E ARMAZENAMENTO DE ENERGIA

A natureza intermitente das fontes eólica e solar representa desafio fundamental para a operação do sistema elétrico, especialmente com o aumento progressivo da participação destas fontes na matriz energética. Embora a complementaridade com a hidroeletricidade mitigue parcialmente esta questão no contexto brasileiro, a penetração crescente de renováveis intermitentes demandará soluções de armazenamento de energia, gerenciamento de demanda (demand response) e maior flexibilidade operacional (Castillo; Gayme, 2014).

Tecnologias de armazenamento, particularmente baterias de íon-lítio, vêm experimentando reduções de custo significativas nas últimas décadas, resultado do desenvolvimento tecnológico e da economia de escala proporcionada pela indústria de veículos elétricos. Entretanto, os custos ainda representam investimento considerável, e questões relacionadas à degradação das baterias, vida útil e reciclagem ao final da vida útil constituem desafios importantes (Paixão; Sausen; Abaide, 2024).

O desenvolvimento de projetos-piloto de armazenamento em diferentes escalas (desde sistemas residenciais até sistemas de larga escala para suporte à rede) e a regulamentação adequada para sistemas de

armazenamento constituem prioridades para o setor. Aspectos como remuneração dos serviços prestados por sistemas de armazenamento, critérios técnicos para conexão à rede e mecanismos de contratação precisam ser desenvolvidos e implementados (Paixão et al., 2025).

Além do armazenamento em baterias, outras tecnologias merecem atenção, incluindo armazenamento em ar comprimido, volantes de inércia (flywheels), sistemas de hidrogênio verde (produção de hidrogênio através de eletrólise alimentada por energia renovável excedente) e até mesmo a própria expansão da capacidade de armazenamento hidrelétrico através de reversíveis (pumped hydro storage).

A gestão da intermitência também se beneficia significativamente de sistemas avançados de previsão de geração eólica e solar. O desenvolvimento de modelos meteorológicos de alta resolução espacial e temporal, combinados com técnicas de inteligência artificial e aprendizado de máquina, permite previsões cada vez mais precisas, facilitando o planejamento operacional e reduzindo incertezas (Danielsson et al., 2025).

4.3 ASPECTOS AMBIENTAIS E SOCIAIS

Embora ambientalmente superiores às fontes fósseis em termos de emissões de gases de efeito estufa, projetos eólicos e solares de grande porte não são isentos de impactos ambientais e sociais que devem ser cuidadosamente avaliados e mitigados. Parques eólicos podem afetar rotas migratórias de aves e morcegos, gerar poluição sonora que impacta comunidades próximas, causar alterações na paisagem e, em casos específicos, interferir com radares meteorológicos e de controle de tráfego aéreo (Saidur et al., 2011).

Projetos solares de grande escala demandam áreas extensas, potencialmente competindo com outros usos da terra, incluindo agricultura, preservação de ecossistemas nativos e atividades tradicionais de comunidades locais. A escolha adequada de locais, privilegiando áreas degradadas ou de menor valor ecológico, constitui estratégia importante de mitigação.

Adicionalmente, questões fundiárias, processos de consulta e relacionamento com comunidades locais requerem atenção cuidadosa para garantir desenvolvimento sustentável e socialmente justo. A experiência internacional demonstra que projetos de energia renovável que não estabelecem adequadamente processos de consulta com comunidades afetadas e não consideram benefícios locais podem enfrentar oposição significativa e atrasos.

Modelos de desenvolvimento que incluam participação das comunidades locais nos benefícios econômicos dos projetos, seja através de arrecadação tributária municipal, criação de empregos locais, investimentos em infraestrutura comunitária ou modelos de propriedade compartilhada, tendem a ser mais exitosos e sustentáveis no longo prazo.

Aspectos relacionados ao ciclo de vida completo das tecnologias também merecem atenção. A reciclagem de módulos fotovoltaicos e pás de turbinas eólicas ao final de sua vida útil, a gestão de baterias de sistemas de armazenamento e a minimização de impactos ambientais na fase de manufatura de componentes constituem desafios importantes que precisam ser endereçados conforme o setor amadurece.

4.4 FINANCIAMENTO E INVESTIMENTO

Embora os custos de geração de energia eólica e solar tenham reduzido substancialmente, tornando estas fontes competitivas com fontes tradicionais, projetos renováveis ainda demandam investimentos iniciais elevados (CAPEX intensivo), com recuperação através de receitas ao longo de décadas de operação. O acesso a financiamento em condições favoráveis, incluindo prazos alongados, taxas de juros adequadas e garantias proporcionais aos riscos, constitui fator crítico para a viabilização de projetos, particularmente para desenvolvedores de menor porte (Pinto Jr., 2016).

O papel de instituições de fomento como o BNDES (Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico e Social) e bancos de desenvolvimento multilaterais tem sido fundamental no financiamento de projetos de energia renovável no Brasil. Entretanto, há espaço e necessidade para ampliação e diversificação de mecanismos de financiamento, incluindo debêntures incentivadas (isentas de imposto de renda para investidores pessoas físicas), fundos de investimento especializados em infraestrutura renovável, mercado de capitais através de emissão de ações e títulos de dívida, e atração de investidores institucionais internacionais.

A percepção de risco dos projetos renováveis por parte de financiadores tem se reduzido conforme o setor amadurece e demonstra track record operacional consistente. Entretanto, desafios como risco regulatório (mudanças em regras e políticas), risco hidrológico (que afeta os preços de energia no mercado de curto prazo em sistemas hidrotérmicos como o brasileiro), risco de curtailment e risco de crédito de contrapartes em contratos bilaterais continuam sendo aspectos importantes que impactam as condições de financiamento.

O desenvolvimento de estruturas de project finance robustas, com adequada alocação de riscos entre as partes (desenvolvedores, investidores equity, financiadores, operadores, fornecedores de equipamentos), contratos de longo prazo que proporcionem previsibilidade de receitas e seguros apropriados são elementos fundamentais para viabilização de projetos e atração de capital em condições competitivas.

4.5 CAPACITAÇÃO E RECURSOS HUMANOS

O crescimento acelerado do setor de energias renováveis no Brasil demanda significativa ampliação e aprimoramento contínuo da capacitação de recursos humanos em diversos níveis. Desde técnicos especializados em instalação e manutenção de sistemas fotovoltaicos e eólicos até engenheiros,

pesquisadores, especialistas em regulação e profissionais de gestão de projetos, o setor requer mão de obra qualificada em quantidade e qualidade crescentes.

Instituições de ensino técnico e superior têm expandido a oferta de cursos e programas específicos em energias renováveis, mas desafios persistem em termos de atualização curricular para acompanhar o rápido desenvolvimento tecnológico, disponibilidade de laboratórios e infraestrutura adequada para formação prática, e retenção de profissionais qualificados que muitas vezes são atraídos por oportunidades no exterior.

A capacitação não se limita a aspectos técnicos, incluindo também formação em aspectos regulatórios, financeiros, socioambientais e de gestão de projetos complexos. O desenvolvimento de programas de formação continuada, certificações profissionais reconhecidas e parcerias entre academia, indústria e governo são estratégias importantes para enfrentar este desafio.

5 PERSPECTIVAS FUTURAS E RECOMENDAÇÕES

O Brasil possui oportunidade histórica de consolidar-se como líder global em energias renováveis, aproveitando seus recursos naturais excepcionais, base industrial em desenvolvimento, experiência acumulada em sistemas de grande porte e uma matriz energética já predominantemente renovável que pode servir de plataforma para integração de fontes intermitentes. Para materializar plenamente este potencial e superar os desafios identificados, algumas diretrizes estratégicas são recomendáveis:

- 1. Planejamento Integrado e de Longo Prazo:** Fortalecer o planejamento integrado entre geração, transmissão e distribuição, garantindo que a infraestrutura acompanhe e até antecipe a expansão da geração renovável. O planejamento deve considerar horizontes de longo prazo (20-30 anos), incorporar cenários de diferentes trajetórias tecnológicas e de políticas, e estabelecer mecanismos de coordenação efetivos entre os diversos agentes setoriais.
- 2. Diversificação Tecnológica e Inovação:** Fomentar pesquisa, desenvolvimento e demonstração em tecnologias complementares e emergentes, incluindo armazenamento de energia em diferentes escalas, hidrogênio verde, sistemas híbridos que combinam múltiplas fontes renováveis, tecnologias de conversão de energia oceânica, e soluções digitais para gerenciamento inteligente de energia. O apoio a projetos-piloto e demonstração de novas tecnologias é fundamental para reduzir riscos e acelerar a curva de aprendizado (Paixão; Abaide, 2025).
- 3. Marco Regulatório Estável, Previsível e Adaptativo:** Manter previsibilidade regulatória, aspecto fundamental para atração de investimentos de longo prazo, ao mesmo tempo em que se garante capacidade de adaptação do marco regulatório para acomodar inovações tecnológicas, novos modelos de negócio e mudanças nas condições do setor. A regulação deve equilibrar

incentivos à expansão renovável com sustentabilidade econômica do sistema elétrico e justa repartição de custos entre diferentes grupos de consumidores.

- 4. Desenvolvimento Industrial e Cadeia de Valor Nacional:** Implementar políticas que incentivem o adensamento da cadeia produtiva nacional, geração de empregos qualificados e desenvolvimento tecnológico local, equilibrando competitividade com desenvolvimento industrial. Isto inclui políticas de conteúdo local criteriosamente desenhadas, apoio a P&D industrial, facilitação de acesso a financiamento para empresas nacionais e promoção de exportações de bens e serviços relacionados a energias renováveis.
- 5. Inclusão Social e Desenvolvimento Regional:** Garantir que a transição energética seja inclusiva, beneficiando comunidades vulneráveis, promovendo desenvolvimento regional equilibrado e criando oportunidades econômicas em regiões historicamente menos desenvolvidas. Programas de eletrificação rural através de soluções renováveis, modelos de propriedade comunitária de ativos de geração e políticas de desenvolvimento local associadas a grandes projetos são estratégias importantes nesta direção.
- 6. Integração Setorial:** Promover integração entre o setor elétrico e outros setores da economia, particularmente transportes (através da mobilidade elétrica), indústria (através da eletrificação de processos produtivos e uso de hidrogênio verde) e agricultura (através de sistemas agrivoltaicos). Esta integração setorial amplia oportunidades, cria sinergias e potencializa os benefícios ambientais e econômicos das energias renováveis (Paixão et al., 2025; Danielsson et al., 2025).
- 7. Participação da Sociedade e Educação:** Ampliar programas de educação e conscientização sobre energias renováveis, eficiência energética e mudanças climáticas, envolvendo diferentes públicos (escolas, universidades, consumidores, formuladores de políticas). Uma sociedade informada e engajada é fundamental para dar sustentação política e social à transição energética.
- 8. Cooperação Internacional:** Fortalecer a cooperação internacional em pesquisa, desenvolvimento tecnológico, capacitação e financiamento de projetos renováveis. O Brasil pode beneficiar-se de experiências internacionais bem-sucedidas ao mesmo tempo em que compartilha sua própria experiência, particularmente em integração de grandes proporções de renováveis em sistemas hidrotérmicos.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As oportunidades da exploração eólica e fotovoltaica no Brasil são extraordinárias e multifacetadas, fundamentadas em recursos naturais abundantes e excepcionalmente favoráveis, custos cada vez mais competitivos, benefícios sinérgicos com a matriz hidrelétrica existente e potencial de contribuição para

múltiplos objetivos de desenvolvimento sustentável. A trajetória de crescimento acelerado das últimas décadas, com expansão de alguns megawatts para dezenas de gigawatts em ambas as tecnologias, demonstra maturidade tecnológica, viabilidade econômica e capacidade de execução, posicionando o Brasil como protagonista potencial na transição energética global.

A concretização plena deste potencial extraordinário demanda abordagem estratégica, integrada e de longo prazo, que equilibre múltiplos objetivos por vezes conflitantes: crescimento acelerado da capacidade renovável com sustentabilidade ambiental e social; desenvolvimento tecnológico e industrial com competitividade econômica; ambição com realismo quanto aos desafios a superar; descentralização e democratização do acesso à energia com estabilidade e confiabilidade do sistema elétrico.

Os desafios identificados – infraestrutura de transmissão, intermitência e armazenamento, aspectos socioambientais, financiamento e capacitação de recursos humanos – são significativos, mas não intransponíveis. Diversos países têm enfrentado desafios similares em suas próprias transições energéticas, desenvolvendo soluções inovadoras das quais o Brasil pode aprender e adaptar ao seu contexto específico. Simultaneamente, as características únicas do sistema elétrico brasileiro, particularmente a complementaridade entre fontes renováveis, oferecem vantagens que podem facilitar a transição.

O momento é propício e a janela de oportunidade está aberta, mas requer ação decidida e coordenada. As decisões tomadas na presente década - em termos de políticas públicas, investimentos em infraestrutura, desenvolvimento tecnológico, marcos regulatórios e modelos de negócio - definirão o papel do Brasil no cenário energético global das próximas gerações e a trajetória de emissões de gases de efeito estufa do país.

A integração inteligente de fontes renováveis, o desenvolvimento de soluções de armazenamento e flexibilidade operacional, a modernização e expansão da infraestrutura de transmissão e distribuição, a adoção de políticas consistentes e de longo prazo, e o engajamento de todos os setores da sociedade são elementos-chave para transformar o potencial extraordinário em realidade concreta. Esta transformação contribuirá simultaneamente para a segurança energética nacional, desenvolvimento econômico sustentável e inclusivo, geração de empregos qualificados, avanço tecnológico e cumprimento dos compromissos climáticos globais.

O Brasil do futuro pode e deve ser um Brasil liderando a transição energética global, aproveitando seus recursos naturais privilegiados não apenas para suprir suas próprias necessidades energéticas de forma limpa e sustentável, mas também para se posicionar como exportador de energia limpa, tecnologias, serviços e conhecimento, contribuindo assim para a construção de um futuro energético global sustentável. A base para esta transformação está sendo construída agora, e os avanços já alcançados demonstram que este futuro promissor é plenamente alcançável.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABEEÓLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. **Boletim Anual de Geração Eólica 2020**. São Paulo: ABEEÓLICA, 2020.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Panorama da Energia Solar Fotovoltaica no Brasil e no Mundo**. São Paulo: ABSOLAR, 2021.

ABSOLAR - Associação Brasileira de Energia Solar Fotovoltaica. **Infográfico ABSOLAR nº 43**. São Paulo: ABSOLAR, 2024.

AMARANTE, O. A. C.; BROWER, M.; ZACK, J.; SÁ, A. L. **Atlas do Potencial Eólico Brasileiro**. Brasília: MME/CRESESB, 2001.

AQUILA, G.; PAMPLONA, E. O.; QUEIROZ, A. R.; ROTELA JUNIOR, P.; FONSECA, M. N. An overview of incentive policies for the expansion of renewable energy generation in electricity power systems and the Brazilian experience. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 70, p. 1090-1098, 2017.

CASTILLO, A.; GAYME, D. F. Grid-scale energy storage applications in renewable energy integration: A survey. **Energy Conversion and Management**, v. 87, p. 885-894, 2014.

DANIELSSON, G. H.; DA SILVA, L. N. F.; DA PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R.; NETO, N. K. Rules-Based Energy Management System for an EV Charging Station Nanogrid: A Stochastic Analysis. **Energies**, v. 18, n. 1, p. 26, 2025.

DINESH, H.; PEARCE, J. M. The potential of agrivoltaic systems. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 54, p. 299-308, 2016.

DUTRA, R. M.; SZKLO, A. S. Incentive policies for promoting wind power production in Brazil: Scenarios for the Alternative Energy Sources Incentive Program (PROINFA) under the New Brazilian electric power sector regulation. **Renewable Energy**, v. 33, n. 1, p. 65-76, 2008.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Plano Decenal de Expansão de Energia 2029**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2019.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Roadmap Eólica Offshore Brasil: Perspectivas e Caminhos para a Energia Eólica Marítima**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2020.

EPE - Empresa de Pesquisa Energética. **Balanço Energético Nacional 2021**. Rio de Janeiro: EPE/MME, 2021.

LUCENA, A. F. P.; SZKLO, A. S.; SCHAEFFER, R.; SOUZA, R. R.; BORBA, B. S. M. C.; COSTA, I. V. L.; CUNHA, S. H. F. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Energy Policy**, v. 38, n. 2, p. 879-889, 2010.

NASCIMENTO, R. L. **Energia Solar no Brasil: situação e perspectivas**. Brasília: Câmara dos Deputados, Estudo Técnico, 2017.

NOGUEIRA, L. P. P.; PIRES, S. H. Avaliação do nível de desenvolvimento da indústria eólica brasileira. **Revista Brasileira de Energia**, v. 22, n. 1, p. 59-78, 2016.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Análise do Impacto da Microgeração Fotovoltaica na Rede de Distribuição de Energia Elétrica. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 1, p. 2887-2911, 2021.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Energia Solar e Desenvolvimento Sustentável. **Revista Tópicos**, v. 4, n. 29, p. 1-28, 2026.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R. Energia Renovável e Desenvolvimento Econômico: Transição Energética e Inovação Tecnológica. **Revista Tópicos**, v. 4, n. 29, p. 1-24, 2025.

PAIXÃO, J. L.; ABAIDE, A. R.; DANIELSSON, G. H.; SAUSEN, J. P.; SILVA, L. N. F.; KNAK NETO, N. Optimized Strategy for Energy Management in an EV Fast Charging Microgrid Considering Storage Degradation. **Energies**, v. 18, n. 5, p. 1060, 2025.

PAIXÃO, J. L.; SAUSEN, J. P.; ABAIDE, A. R. Integração de Energias Renováveis e Veículos Elétricos: Avanços em Sustentabilidade Energética e Armazenamento. In: **Engenharia: o pilar do desenvolvimento energético - Volume 1**. 1. ed. Editora Científica Digital, 2024. p. 86-102.

PEREIRA, E. B.; MARTINS, F. R.; GONÇALVES, A. R.; COSTA, R. S.; LIMA, F. L.; RÜTHER, R.; SOUZA, J. G. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. 2. ed. São José dos Campos: INPE, 2017.

PINHO, J. T.; BARBOSA, C. F. O.; PEREIRA, E. J. S.; SOUZA, H. M. S.; BLASQUES, L. C. M.; GALHARDO, M. A. B.; MACÊDO, W. N. **Sistemas Híbridos: Soluções Energéticas para a Amazônia**. Brasília: MME, 2008.

PINTO JR., H. Q. (Org.). **Economia da Energia: fundamentos econômicos, evolução histórica e organização industrial**. 2. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2016.

SAIDUR, R.; ISLAM, M. R.; RAHIM, N. A.; SOLANGI, K. H. Environmental impact of wind energy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, n. 5, p. 2423-2430, 2011.

SCHMIDT, J.; CANCELLA, R.; PEREIRA JR., A. O. The role of wind power and solar PV in reducing risks in the Brazilian hydro-thermal power system. **Energy**, v. 115, p. 1748-1757, 2016.