

DESEMPENHO ELÉTRICO E VIABILIDADE TÉCNICA DA ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA NO NORDESTE BRASILEIRO: REVISÃO DE LITERATURA

ELECTRICAL PERFORMANCE AND TECHNICAL FEASIBILITY OF PHOTOVOLTAIC SOLAR ENERGY IN THE BRAZILIAN NORTHEAST: A LITERATURE REVIEW

DESEMPEÑO ELÉCTRICO Y VIABILIDAD TÉCNICA DE LA ENERGÍA SOLAR FOTOVOLTAICA EN EL NORDESTE DE BRASIL: REVISIÓN DE LITERATURA

Saul de Meneses Caetano Viana¹
Stênio de Sousa Coelho²

RESUMO: Este estudo objetiva sintetizar e organizar criticamente o conhecimento científico sobre o desempenho elétrico e a viabilidade técnica da energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro, considerando dimensões técnicas, ambientais, regulatórias e socioeconômicas. A investigação busca compreender os fundamentos da conversão fotovoltaica, quantificar o potencial solarimétrico regional, analisar condicionantes ambientais relevantes, examinar o marco regulatório vigente e avaliar tecnologias emergentes aplicáveis ao contexto nordestino. O método consiste em revisão bibliográfica qualitativa, contemplando artigos científicos, dissertações e documentos técnicos publicados entre 2009 e 2025, complementada por análises de atlas solarimétricos e normativos elaborados por instituições como ANEEL, EPE e INPE. Os conteúdos foram estruturados em cinco eixos: fundamentos da conversão, potencial solar, condicionantes ambientais, regulamentação e evolução tecnológica. Os resultados evidenciam que o Nordeste apresenta irradiação entre 1.800 e 2.400 kWh/m²/ano, com produtividade média de 1.650 kWh/kWp/ano. Entretanto, temperaturas operacionais elevadas geram perdas entre 8% e 14%, enquanto o acúmulo de sujeira pode reduzir o desempenho em até 12%. Tecnologias de segunda geração demonstram Performance Ratio superior ao silício cristalino, e a complementaridade solar-eólica favorece sistemas híbridos mais estáveis. Conclui-se que o Nordeste possui condições excepcionais para expansão fotovoltaica, exigindo apoio regulatório, seleção tecnológica adequada e políticas integradas que assegurem crescimento sustentável na matriz elétrica regional.

2307

Palavras-chave: Energia fotovoltaica. Nordeste. Desempenho elétrico. Geração distribuída.

¹Graduando em Engenharia Elétrica pelo Centro Universitário Santo Agostinho, Teresina – Piauí.

²Mestre em Engenharia Elétrica - Controle e Automação de Sistemas Elétricos, Universidade Federal do Piauí. Docente no Centro Universitário Santo Agostinho, Teresina – Piauí.

ABSTRACT: This study aims to synthesize and critically organize the scientific knowledge on the electrical performance and technical feasibility of photovoltaic solar energy in the Brazilian Northeast, considering technical, environmental, regulatory, and socioeconomic dimensions. The investigation seeks to understand the fundamentals of photovoltaic conversion, quantify the regional solarimetric potential, analyze relevant environmental constraints, examine the current regulatory framework, and assess emerging technologies applicable to the Northeastern context. The method consists of a qualitative literature review, including scientific articles, dissertations, and technical documents published between 2009 and 2025, complemented by analyses of solarimetric atlases and regulatory documents produced by institutions such as ANEEL, EPE, and INPE. The content was structured into five axes: conversion fundamentals, solar potential, environmental constraints, regulation, and technological evolution. The results show that the Northeast presents irradiation levels between 1,800 and 2,400 kWh/m²/year, with an average productivity of 1,650 kWh/kWp/year. However, high operating temperatures generate losses between 8% and 14%, while dust accumulation can reduce performance by up to 12%. Second-generation technologies exhibit higher Performance Ratio than crystalline silicon, and solar-wind complementarity supports more stable hybrid systems. It is concluded that the Northeast has exceptional conditions for photovoltaic expansion, requiring regulatory support, appropriate technological selection, and integrated policies that ensure sustainable growth of the regional electrical matrix.

Keywords: Photovoltaic energy. Northeast. Electrical performance. Distributed generation.

RESUMEN: Este estudio tiene como objetivo sintetizar y organizar críticamente el conocimiento científico sobre el desempeño eléctrico y la viabilidad técnica de la energía solar fotovoltaica en el Nordeste brasileño, considerando dimensiones técnicas, ambientales, regulatorias y socioeconómicas. La investigación busca comprender los fundamentos de la conversión fotovoltaica, cuantificar el potencial solarimétrico regional, analizar condicionantes ambientales relevantes, examinar el marco regulatorio vigente y evaluar tecnologías emergentes aplicables al contexto nordestino. El método consiste en una revisión bibliográfica cualitativa que incluye artículos científicos, disertaciones y documentos técnicos publicados entre 2009 y 2025, complementada por análisis de atlas solarimétricos y normativas elaboradas por instituciones como ANEEL, EPE e INPE. El contenido se estructuró en cinco ejes: fundamentos de la conversión, potencial solar, condicionantes ambientales, regulación y evolución tecnológica. Los resultados muestran que el Nordeste presenta niveles de irradiación entre 1.800 y 2.400 kWh/m²/año, con una productividad promedio de 1.650 kWh/kWp/año. Sin embargo, las altas temperaturas operativas generan pérdidas entre el 8% y el 14%, mientras que la acumulación de suciedad puede reducir el rendimiento hasta un 12%. Las tecnologías de segunda generación exhiben un Performance Ratio superior al del silicio cristalino, y la complementariedad solar-eólica favorece sistemas híbridos más estables. Se concluye que el Nordeste posee condiciones excepcionales para la expansión fotovoltaica, requiriendo apoyo regulatorio, selección tecnológica adecuada y políticas integradas que garanticen un crecimiento sostenible en la matriz eléctrica regional.

Palabras clave: Energía fotovoltaica. Nordeste. Desempeño eléctrico. Generación distribuida.

1 INTRODUÇÃO

A transição energética global rumo a fontes renováveis tornou-se imperativa diante dos desafios climáticos e da necessidade de diversificação da matriz elétrica mundial. Neste contexto, a energia solar fotovoltaica emerge como uma das alternativas mais promissoras,

devido à sua capacidade de conversão direta da radiação solar em eletricidade, abundância do recurso energético e redução contínua dos custos de implementação. A tecnologia fotovoltaica tem experimentado crescimento exponencial nas últimas décadas, consolidando-se como componente estratégico para a segurança energética e o desenvolvimento sustentável de diversos países (Marques; Krauter; Lima, 2009).

O Brasil apresenta características geográficas e climáticas excepcionalmente favoráveis para o aproveitamento da energia solar, posicionando-se entre os países com maior potencial técnico para exploração dessa fonte. A região Nordeste, em particular, destaca-se por concentrar alguns dos maiores índices de irradiação solar do território nacional, com valores médios anuais superiores a 2.000 kWh/m²/ano em diversas localidades. Segundo o Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), a disponibilidade de radiação solar na região nordestina supera significativamente a média nacional e se equipara aos melhores índices observados em regiões tradicionalmente reconhecidas pelo aproveitamento solar, como o deserto do Saara e o sudoeste dos Estados Unidos (Pereira *et al.*, 2006).

O avanço da energia solar fotovoltaica no Brasil foi significativamente impulsionado pela estruturação de um marco regulatório específico para a micro e minigeração distribuída. A publicação da Resolução Normativa nº 482/2012 pela Agência Nacional de Energia Elétrica (ANEEL) estabeleceu diretrizes fundamentais para a conexão de sistemas fotovoltaicos à rede de distribuição, implementando o sistema de compensação de energia elétrica e definindo procedimentos técnicos para a integração de pequenos geradores. Essa regulamentação representou um marco histórico para o setor, permitindo que consumidores residenciais, comerciais e industriais se tornassem também produtores de energia, fortalecendo o conceito de geração distribuída e democratizando o acesso à tecnologia solar (ANEEL, 2012).

Do ponto de vista tecnológico, o setor fotovoltaico tem experimentado avanços substanciais relacionados ao desenvolvimento de novos materiais semicondutores, arquiteturas inovadoras de dispositivos e aprimoramento das técnicas produtivas. Pesquisas recentes apontam que tecnologias emergentes, incluindo células solares orgânicas, híbridas de heterojunção (HIT), baseadas em *perovskitas* e de terceira geração, têm demonstrado potencial para ampliar significativamente a eficiência de conversão energética e reduzir barreiras econômicas que ainda limitam a expansão da fonte em determinados contextos. Esses desenvolvimentos tecnológicos contribuem para tornar a energia solar cada vez mais

competitiva frente às fontes convencionais, colaborando para sua disseminação em diferentes regiões e estratos socioeconômicos (Rodrigues, 2023).

Entretanto, a consolidação da energia solar fotovoltaica como componente relevante da matriz elétrica regional depende não apenas da disponibilidade do recurso solar, mas também de uma série de condicionantes técnicos, infraestruturais e institucionais. A literatura especializada enfatiza que a expansão sustentável da geração fotovoltaica requer adequada integração entre sistemas de geração, componentes de conversão e armazenamento, qualificação profissional especializada, aprimoramento das redes elétricas de distribuição e desenvolvimento de políticas públicas de incentivo. Ademais, torna-se fundamental compreender como as características climáticas específicas do Nordeste brasileiro – incluindo altas temperaturas, baixa nebulosidade e elevados índices de radiação – influenciam o desempenho elétrico e a viabilidade técnica dos sistemas fotovoltaicos instalados na região (Simões, 2018).

Diante desse contexto multifacetado, que envolve aspectos técnicos, ambientais, regulatórios e socioeconômicos, torna-se essencial sistematizar o conhecimento científico existente sobre o desempenho elétrico e a viabilidade técnica da energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro. Assim, o presente estudo apresenta uma revisão abrangente da literatura, que consolida fundamentos técnicos, examina condicionantes ambientais, analisa o marco regulatório, discute avanços tecnológicos e avalia implicações socioeconômicas relacionadas ao uso dessa tecnologia na região. Dessa forma, busca-se oferecer subsídios científicos para pesquisas futuras, contribuir para a formulação de políticas públicas setoriais e orientar o desenvolvimento de projetos tecnicamente viáveis e ambientalmente sustentáveis, fortalecendo a posição estratégica do Nordeste brasileiro no cenário energético nacional.

2310

2 DESENVOLVIMENTO

2.1 Metodologia

Este estudo utiliza uma abordagem de revisão bibliográfica de caráter qualitativo, desenvolvida com o propósito de analisar, de forma integrada, os fundamentos técnicos, regulatórios e ambientais que condicionam o desempenho elétrico e a viabilidade técnica da energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro. A metodologia de revisão bibliográfica foi selecionada por permitir a síntese de conceitos consolidados, identificação de avanços tecnológicos recentes e mapeamento de discussões teóricas essenciais para compreender a

consolidação da fonte solar como componente estratégico da matriz elétrica nacional e regional (Silva; Menezes, 2005).

O processo de seleção e análise do material bibliográfico seguiu critérios metodológicos destinados a garantir a qualidade e a relevância das fontes consultadas. Foram priorizadas bases como *SciELO (Scientific Electronic Library Online)*, *ScienceDirect*, *Google Scholar* e periódicos especializados em energias renováveis, indexados em plataformas nacionais e internacionais. Além disso, foram incluídos documentos técnicos normativos, atlas solarimétricos e manuais elaborados por organismos oficiais do setor elétrico brasileiro, tais como ANEEL, EPE (Empresa de Pesquisa Energética) e INPE.

A seleção dos materiais bibliográficos considerou critérios específicos de relevância temática, consistência teórica, rigor metodológico e contribuição efetiva para o entendimento dos fatores técnicos e ambientais que influenciam o uso da energia solar no contexto nordestino. Priorizaram-se publicações dos anos (2009–2025), de modo a contemplar desenvolvimentos recentes da tecnologia e do marco regulatório, complementadas por referenciais clássicos e seminais da área, que estabeleceram fundamentos teóricos importantes para o campo de estudo.

Após a seleção e análise crítica do material bibliográfico, os conteúdos foram organizados em cinco eixos temáticos centrais que estruturam a presente revisão: fundamentos físicos da conversão fotovoltaica e caracterização de sistemas; potencial solar e condicionantes ambientais específicos do Nordeste brasileiro; marco regulatório e estrutura normativa da energia solar no Brasil; evolução tecnológica e desenvolvimento de novas gerações de células fotovoltaicas; e aspectos socioeconômicos e ambientais da expansão da energia solar na região. Essa estruturação temática permitiu integrar discussões técnicas, ambientais, regulatórias e institucionais de forma coerente, produzindo uma síntese aprofundada sobre os elementos fundamentais que influenciam o desenvolvimento e a consolidação da energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro.

2.2 Fundamentos da conversão fotovoltaica

A conversão fotovoltaica fundamenta-se no efeito fotoelétrico, fenômeno físico observado em materiais semicondutores no qual a incidência de radiação eletromagnética provoca a excitação e o consequente deslocamento de portadores de carga, gerando corrente elétrica contínua. O efeito fotoelétrico estabelece que a energia dos fótons incidentes, quando superior à energia de banda proibida do material semicondutor, é capaz de promover elétrons da banda de valência para a banda de condução, gerando pares elétron-lacuna que podem ser

separados por um campo elétrico interno, estabelecido tipicamente por uma junção p-n (Marques; Krauter; Lima, 2009).

O silício cristalino, seja monocristalino ou policristalino, permanece como o material semiconductor mais amplamente utilizado na indústria fotovoltaica, representando aproximadamente 95% do mercado global de módulos solares (Machado; Miranda, 2015). As células de silício monocristalino apresentam eficiências de conversão comerciais típicas entre 18% e 22%, enquanto células policristalinas alcançam valores entre 15% e 18%. Tecnologias emergentes, como células de filme fino, células de heterojunção, células de *perovskita* e células orgânicas, têm demonstrado potencial para superar as eficiências convencionais ou oferecer vantagens em termos de flexibilidade, peso reduzido e custo de produção (Rodrigues, 2023).

A radiação solar determina diretamente o comportamento elétrico dos módulos fotovoltaicos e influencia de forma significativa a produção de energia dos sistemas instalados. A irradiância solar e a irradiação solar são grandezas fundamentais para a avaliação do potencial energético de uma localidade e para o dimensionamento técnico de sistemas fotovoltaicos. O Atlas Brasileiro de Energia Solar destaca que o Brasil apresenta irradiação solar global horizontal média anual entre 1.500 e 2.400 kWh/m², valores significativamente superiores aos observados em países europeus que lideram a instalação de sistemas fotovoltaicos (Pereira *et al.*, 2006; TIBA, 2001).

2312

Os componentes auxiliares que integram um sistema fotovoltaico completo são elementos essenciais para garantir operação adequada, segura e eficiente. Os inversores fotovoltaicos, responsáveis pela conversão da corrente contínua gerada pelos módulos em corrente alternada compatível com a rede elétrica, representam componentes críticos cuja eficiência, confiabilidade e adequação às normas técnicas influenciam diretamente o desempenho global do sistema. As estruturas de suporte e fixação devem ser dimensionadas considerando cargas mecânicas, garantindo estabilidade e orientação adequada dos módulos para maximização da captação solar (Nascimento *et al.*, 2014; Hinrichs; Kleinbach, 2003).

2.3 Potencial solar e condicionantes ambientais no nordeste

O Nordeste brasileiro destaca-se internacionalmente como uma das regiões com maior potencial para aproveitamento da energia solar fotovoltaica, principalmente devido aos elevados valores de irradiação solar global que se mantêm relativamente estáveis ao longo do ano. Essa característica posiciona o Nordeste em patamar comparável às regiões de maior exploração solar do mundo, incluindo o deserto do Saara, o sudoeste dos Estados Unidos e regiões da Austrália

(SOLANGI et al., 2011). A disponibilidade de radiação solar na região nordestina varia entre 1.800 e 2.400 kWh/m²/ano para irradiação global horizontal, com valores ainda mais expressivos quando considerada a irradiação no plano inclinado dos módulos fotovoltaicos (Pereira et al., 2006).

Esses valores demonstram que mesmo as localidades com menor incidência solar na região nordestina apresentam irradiação significativamente superior à média europeia, onde países como Alemanha e Reino Unido possuem irradiação solar típica entre 1.000 e 1.200 kWh/m²/ano. Essa comparação reforça o papel estratégico que o Nordeste pode desempenhar na expansão da geração solar fotovoltaica no Brasil, tanto para aplicações de geração distribuída quanto para desenvolvimento de usinas solares de grande porte (Marques; Krauter; Lima, 2009; Viana; Ary, 2005).

O clima semiárido predominante em extensa porção do território nordestino caracteriza-se por baixa nebulosidade média anual, reduzidos índices pluviométricos concentrados em poucos meses do ano e elevada insolação (Tolmasquim, 2016). Essas características criam condições excepcionalmente favoráveis para instalação de módulos fotovoltaicos, uma vez que minimizam perdas por sombreamento causado por nuvens, reduzem a componente difusa da radiação solar e proporcionam maior previsibilidade da geração energética ao longo do ano (Marques; Krauter; Lima, 2009). Estudos comparativos demonstraram que os valores medidos de irradiação solar oscilaram apenas 2% em relação às estimativas do Atlas Brasileiro de Energia Solar, comprovando a confiabilidade dos dados disponíveis e a estabilidade do recurso solar na região (Nascimento et al., 2016).

2313

Contudo, as condições ambientais do Nordeste também apresentam desafios técnicos que devem ser considerados no dimensionamento e operação de sistemas fotovoltaicos. As elevadas temperaturas ambientes, que frequentemente superam 30°C durante grande parte do ano e podem atingir valores superiores a 40°C em regiões do semiárido, influenciam negativamente a eficiência de conversão dos módulos fotovoltaicos. A maioria das tecnologias fotovoltaicas apresenta coeficiente de temperatura negativo para potência, tipicamente entre -0,3% e -0,5% por °C para módulos de silício cristalino (Skoplaki; Palyvos, 2009). Pesquisas de campo indicam que a temperatura de operação dos módulos pode exceder 60°C em condições de pico de irradiação, resultando em perdas de desempenho significativas que devem ser adequadamente contabilizadas nas estimativas de geração energética (Simões, 2018).

A deposição de poeira, areia e partículas atmosféricas sobre a superfície dos módulos fotovoltaicos constitui outro fator ambiental relevante que pode comprometer o desempenho

dos sistemas. Estudos experimentais demonstraram reduções de desempenho entre 5% e 12% em diferentes tecnologias fotovoltaicas devido ao acúmulo de sujeira durante períodos sem precipitação (Qasem *et al.*, 2012). A baixa frequência de chuvas em grande parte do ano torna necessária a implementação de estratégias de limpeza periódica dos módulos para manutenção do desempenho ótimo, impactando os custos operacionais dos sistemas (Nascimento *et al.*, 2016).

2.4 Marco regulatório e estrutura normativa da energia solar

A estruturação de um marco regulatório robusto foi determinante para o crescimento acelerado da energia solar fotovoltaica no Brasil, criando ambiente institucional favorável ao investimento e à expansão da geração distribuída (Bazilian *et al.*, 2013). O principal instrumento normativo foi a Resolução Normativa nº 482, publicada pela ANEEL em 17 de abril de 2012, que estabeleceu as condições gerais para acesso de microgeração e minigeração distribuída aos sistemas de distribuição de energia elétrica e criou o sistema de compensação de energia elétrica. Essa regulamentação permitiu que consumidores conectassem seus sistemas fotovoltaicos à rede de distribuição e compensassem a energia injetada com o consumo registrado, estabelecendo o conceito de "*net metering*" e democratizando o acesso à tecnologia solar (ANEEL, 2012).

2314

A Resolução Normativa 482/2012 definiu microgeração distribuída como central geradora com potência instalada menor ou igual a 75 kW, posteriormente ampliada para 100 kW, e minigeração distribuída como central com potência entre 75 kW e 1 MW, posteriormente ajustada para o intervalo entre 100 kW e 1 MW (Uczar, 2012). O sistema de compensação permite que a energia ativa injetada na rede seja cedida à distribuidora como empréstimo gratuito e posteriormente compensada com o consumo de energia elétrica. Os créditos de energia possuem validade de 60 meses, proporcionando flexibilidade temporal para compensação (ANEEL, 2012).

Além disso, a resolução Normativa 687/2015 introduziu modalidades adicionais de compensação, ampliando significativamente o público potencial beneficiário da geração solar. Foram incluídas a geração compartilhada, o empreendimento de múltiplas unidades consumidoras e o autoconsumo remoto. A regulamentação estabeleceu prazo máximo de 34 dias para conexão de microgeradores e 49 dias para minigeradores, agilizando os procedimentos administrativos e reduzindo barreiras burocráticas (ANEEL, 2015; Kissel, 2006).

A Lei Federal nº 14.300, sancionada em 6 de janeiro de 2022, estabeleceu o marco legal da micro e minigeração distribuída, conferindo maior segurança jurídica ao setor. A legislação instituiu regras de transição para sistemas solicitados até 12 meses após sua publicação, garantindo manutenção das condições de compensação integral por 25 anos. A lei estabeleceu cobrança gradual de componentes tarifários para novos sistemas, de forma a remunerar adequadamente a infraestrutura de distribuição utilizada, proporcionando previsibilidade regulatória essencial para planejamento de investimentos de longo prazo (BRASIL, 2022; Mazzucato, 2014).

O Módulo 3 do PRODIST estabelece requisitos técnicos para acesso aos sistemas de distribuição, incluindo especificações para inversores fotovoltaicos, proteções e padrões de qualidade de energia. As normas técnicas brasileiras da série ABNT NBR 16 estabelecem requisitos de segurança, desempenho e instalação de sistemas fotovoltaicos, complementando o arcabouço regulatório setorial. A evolução do marco regulatório brasileiro acompanhou e estimulou o processo de amadurecimento tecnológico e expansão do mercado solar fotovoltaico nacional, ajustando-se progressivamente às necessidades identificadas a partir do aumento da participação da fonte na matriz elétrica (ANEEL, 2021; Brown, 2003).

2.5 Evolução tecnológica e novas gerações de células fotovoltaicas

Os avanços tecnológicos no campo das células fotovoltaicas têm impulsionado significativamente o setor solar, possibilitando o desenvolvimento de dispositivos progressivamente mais eficientes e economicamente competitivos. A trajetória evolutiva pode ser compreendida através da classificação em três gerações distintas de células solares, cada qual caracterizada por materiais, processos de fabricação e características de desempenho específicas (RAPHAEL et al., 2018). A primeira geração, baseada em silício cristalino, domina o mercado global e caracteriza-se por eficiências comerciais entre 15% e 22%, elevada confiabilidade e processos industriais maduros (Rodrigues, 2023).

A segunda geração compreende tecnologias de filmes finos que utilizam materiais semicondutores depositados em camadas de espessura micrométrica sobre substratos diversos. As principais tecnologias incluem silício amorfo, telureto de cádmio e disseleneto de cobre-índio-gálio (BÜHLER; GABE, 2018). Embora apresentem eficiências comerciais inferiores às células de silício cristalino, tipicamente entre 10% e 15%, oferecem vantagens em termos de menor consumo de material, processos de fabricação econômicos e melhor desempenho em condições de baixa irradiação. O coeficiente de temperatura menos negativo do silício amorfo

confere melhor desempenho relativo em ambientes de elevada temperatura, característica potencialmente vantajosa para aplicações no Nordeste brasileiro (Nascimento *et al.*, 2016).

A terceira geração representa o atual front de pesquisa e desenvolvimento tecnológico, englobando tecnologias emergentes que buscam superar os limites termodinâmicos de eficiência ou reduzir drasticamente os custos de produção. Entre as tecnologias mais promissoras destacam-se células solares orgânicas, células sensibilizadas por corante, células de pontos quânticos e células de *perovskita* (LIMA *et al.*, 2020). As células de *perovskita* têm atraído extraordinária atenção devido ao rápido avanço de eficiência, partindo de 3,8% em 2009 e atingindo valores certificados superiores a 25% em 2020, comparáveis às melhores células comerciais de silício (Rodrigues, 2023; Green *et al.*, 2010).

As células de heterojunção de silício representam desenvolvimento importante que combina características das primeira e segunda gerações, integrando wafer de silício cristalino com camadas ultrafinas de silício amorfo. Essa arquitetura híbrida permite alcançar eficiências comerciais superiores a 24%, combinando as vantagens do silício cristalino com os benefícios do silício amorfo. Módulos baseados em tecnologia HIT têm demonstrado desempenho superior em condições de elevada temperatura, característica particularmente relevante para aplicações no Nordeste brasileiro, onde as temperaturas de operação dos módulos frequentemente excedem 60°C (Rodrigues, 2023; Rüther *et al.*, 2010).

2316

As células de *perovskita* apresentam propriedades optoeletrônicas excepcionais, incluindo elevado coeficiente de absorção, comprimento de difusão de portadores longo e possibilidade de ajuste do band gap através da composição química (Rosa; Toledo, 2021). Os desafios principais que ainda limitam a comercialização desta tecnologia relacionam-se à estabilidade dos dispositivos quando expostos à umidade, oxigênio e temperatura, e às questões ambientais associadas à presença de chumbo na composição. Esforços intensivos de pesquisa têm sido direcionados ao desenvolvimento de estratégias de encapsulamento eficiente e à substituição do chumbo por elementos menos tóxicos (Rodrigues, 2023).

Os inversores fotovoltaicos evoluíram substancialmente em termos de eficiência de conversão, densidade de potência e funcionalidades de monitoramento. Inversores modernos apresentam eficiências pico superiores a 98% e incorporam funcionalidades avançadas como rastreamento do ponto de máxima potência com múltiplos canais independentes, monitoramento em nível de módulo e controle de tensão e frequência (Burger; Rüther, 2006). A integração de sistemas fotovoltaicos com tecnologias de armazenamento, especialmente baterias de íon-lítio, representa tendência importante que amplia a flexibilidade operacional e o

valor energético da geração solar, permitindo deslocamento temporal da geração e maior autonomia energética (Simões, 2018).

2.6 Desempenho elétrico de sistemas fotovoltaicos no nordeste brasileiro

A avaliação do desempenho elétrico de sistemas fotovoltaicos em condições reais de operação constitui elemento fundamental para validação de projetos, verificação de premissas de dimensionamento e identificação de fatores que influenciam a produção energética. A literatura estabelece metodologias padronizadas para caracterização do desempenho baseadas em indicadores normalizados que permitem comparação entre sistemas instalados em diferentes localidades (MARION et al., 2005). Os principais indicadores são o Yield, que representa a produtividade específica expressa em kWh gerados por kWp instalado, e o Performance Ratio, definido como a relação entre o Yield real e o Yield teórico (Nascimento et al., 2016).

Estudos de campo realizados no Nordeste brasileiro têm demonstrado valores expressivos de Yield e Performance Ratio, confirmando o elevado potencial de geração da região. Pesquisa conduzida em sistema experimental de 10,7 kWp instalado em Brotas de Macaúbas, Bahia, demonstrou que a irradiação solar medida atingiu 2.246 kWh/m²/ano, valor apenas 2% inferior às estimativas do Atlas Brasileiro de Energia Solar, confirmando a precisão dos dados disponíveis e a estabilidade do recurso solar (Nascimento et al., 2016). A análise de distribuição da irradiância demonstrou que 63% da energia recebida concentrou-se na faixa entre 300 e 1.000 W/m², considerada ideal para operação eficiente dos inversores, e 27% apresentou níveis iguais ou superiores a 1.000 W/m² (Nascimento et al., 2016; Simões, 2018).

O desempenho comparativo entre diferentes tecnologias fotovoltaicas revelou comportamentos distintos ao longo do ano, influenciados por fatores ambientais específicos da região. A Performance Ratio em corrente contínua apresentou valores médios anuais de 92,3% para silício amorfo, 88,4% para silício policristalino, 87,9% para silício monocristalino, 83,9% para silício microcristalino e 82,2% para CIGS (Nascimento et al., 2016). O melhor desempenho relativo da tecnologia de silício amorfo foi atribuído ao seu menor coeficiente de temperatura negativo, particularmente vantajoso nas condições de elevada temperatura operacional observadas, e ao fenômeno de recozimento térmico que parcialmente reverte a degradação inicial (Nascimento et al., 2016; Rüther et al., 2003).

A influência da temperatura de operação no desempenho dos módulos foi claramente evidenciada ao longo do ano (Simões, 2018). Durante os meses de maior temperatura ambiente,

observou-se redução do Performance Ratio para todas as tecnologias, sendo as baseadas em silício cristalino as mais afetadas devido aos seus coeficientes de temperatura mais negativos (Simões, 2018; Skoplaki; Palyvos, 2009). As temperaturas médias estimadas dos módulos variaram entre 45°C e 55°C durante o período diurno, resultando em perdas de potência entre 8% e 12% para módulos de silício cristalino. Esse resultado reforça a importância de considerar adequadamente as perdas térmicas no dimensionamento de sistemas para o Nordeste (Simões, 2018).

O acúmulo de sujeira sobre a superfície dos módulos constituiu outro fator relevante identificado nos estudos de campo (Nascimento *et al.*, 2016). Durante períodos de baixa pluviometria, observou-se degradação progressiva do desempenho de todos os sistemas, com reduções mais acentuadas para tecnologias de silício cristalino, até 12% para silício policristalino (Nascimento *et al.*, 2016; QASEM *et al.*, 2012). Após limpeza dos módulos, medições através de curvas características confirmaram recuperação de desempenho entre 4% e 12%, dependendo da tecnologia. Esses resultados evidenciam a necessidade de implementação de programas de manutenção preventiva incluindo limpeza periódica dos módulos, particularmente durante os períodos de estiagem prolongada (Nascimento *et al.*, 2016).

A complementariedade entre geração solar e eólica foi objeto de estudos específicos na região, dado que o Nordeste apresenta excelentes recursos de ambas as fontes (Simões, 2018; Soltermann; Silva, 1998). Análise realizada em Brotas de Macaúbas demonstrou elevada complementariedade temporal entre as fontes, com o recurso eólico apresentando predominância noturna e valores mínimos durante o período da tarde, quando a geração solar atinge seus picos. Simulações de instalação de usina fotovoltaica compartilhando infraestrutura de subestação existente indicaram que a geração combinada excederia a capacidade em apenas 102 horas ao longo do ano, demonstrando a viabilidade técnica e econômica de sistemas híbridos solar-eólicos (Simões, 2018).

2.7 Aspectos socioeconômicos e sustentáveis da energia solar no nordeste

A energia solar fotovoltaica assume papel estratégico para o desenvolvimento socioeconômico do Nordeste brasileiro, atuando como vetor de geração de emprego, renda, redução de desigualdades e promoção da sustentabilidade ambiental (Nascimento, 2015). Sua expansão estimula cadeias produtivas locais, fomenta a criação de empregos qualificados e fortalece oportunidades de capacitação profissional, contribuindo para reduzir disparidades históricas em relação às regiões mais desenvolvidas do país (Nascimento, 2015; De Lima;

Veziroglu, 2001). Além disso, investimentos em projetos solares mobilizam serviços especializados, engenharia e consultoria técnica, ao mesmo tempo em que descentralizam a geração elétrica e aumentam a autonomia energética regional, evitando a transferência de riqueza para outros centros consumidores (Pereira *et al.*, 2006; Fried; Shukla; Sawyer, 2012).

Do ponto de vista ambiental, a energia solar consolida-se como alternativa de baixo impacto e essencial para a mitigação de emissões associadas às fontes fósseis. A substituição de termelétricas por sistemas fotovoltaicos reduz significativamente emissões de CO₂, NO_x, SO_x e material particulado, com benefícios diretos à qualidade do ar e à saúde pública (Marques; Krauter; Lima, 2009). Esse atributo é especialmente relevante no contexto nordestino, caracterizado por vulnerabilidade hídrica e recorrentes períodos de seca, o que torna arriscada a dependência de fontes hidrelétricas. A energia solar, cuja disponibilidade é alta justamente nos períodos de menor oferta hídrica, reforça a segurança energética regional e ainda possibilita a inclusão elétrica de comunidades isoladas por meio de sistemas de pequeno porte (Nascimento, 2015; Viana; Ary, 2005; Soltermann; Silva, 1998).

Experiências práticas reforçam esse potencial, como demonstrado pelo Programa Luz do Sol, que implementou sistemas fotovoltaicos autônomos em 14 comunidades rurais do Ceará, beneficiando 492 residências entre 2002 e 2004 (Marques; Krauter; Lima, 2009). As avaliações do programa revelam impactos positivos, incluindo ampliação de atividades produtivas e educacionais noturnas, melhoria no armazenamento de alimentos e medicamentos, acesso ampliado à comunicação e redução da migração para centros Urbanos (Marques; Krauter; Lima, 2009). Para consolidar esses benefícios, políticas públicas integradas — como linhas de financiamento, capacitação profissional, incentivos fiscais e fortalecimento da pesquisa e desenvolvimento — são essenciais para garantir um ambiente institucional sólido e impulsionar o Nordeste como protagonista da transição energética nacional (Nascimento, 2015; Elkins, 2004; Mazzucato, 2014).

2319

3 RESULTADOS

A revisão de literatura evidenciou que o Nordeste brasileiro apresenta condições naturais excepcionalmente favoráveis para o aproveitamento da energia solar fotovoltaica, posicionando-se entre as regiões com maior potencial técnico mundial. Os dados consolidados do Atlas Brasileiro de Energia Solar demonstram que a irradiação solar global horizontal na região varia entre 1.800 e 2.400 kWh/m²/ano, com destaque para localidades como Petrolina-PE (2.348 kWh/m²/ano) e Bom Jesus da Lapa-BA (2.281 kWh/m²/ano), valores que superam

significativamente a média nacional e se equiparam aos melhores índices observados em regiões tradicionalmente reconhecidas pelo aproveitamento solar (Pereira *et al.*, 2006).

A análise comparativa internacional revelou que as condições solarimétricas do Nordeste superam em mais de 80% os índices observados em países europeus líderes na instalação de sistemas fotovoltaicos, como Alemanha e Reino Unido, que apresentam irradiação típica entre 1.000 e 1.200 kWh/m²/ano (Marques; Krauter; Lima, 2009).

Essa superioridade do recurso solar disponível confere ao Nordeste brasileiro vantagem competitiva fundamental para viabilização técnica e econômica de projetos fotovoltaicos, reduzindo significativamente o período de retorno de investimentos e ampliando a competitividade da fonte solar frente às alternativas convencionais. A estabilidade temporal do recurso solar constitui outro aspecto relevante identificado na literatura, sendo que a comparação entre dados medidos em estações solarimétricas e estimativas do Atlas Brasileiro de Energia Solar demonstrou desvios inferiores a 2%, confirmando a precisão das ferramentas de modelagem disponíveis e a elevada previsibilidade da geração solar na região (Nascimento *et al.*, 2016). Essa característica é particularmente importante para o planejamento energético de longo prazo e para a integração da fonte solar à matriz elétrica regional, reduzindo incertezas associadas à intermitência característica de fontes renováveis.

2320

Os estudos analisados identificaram que, apesar das condições solarimétricas favoráveis, fatores ambientais específicos do Nordeste exercem influência significativa sobre o desempenho operacional dos sistemas fotovoltaicos. A temperatura de operação dos módulos emerge como o principal condicionante de perda de desempenho, com temperaturas médias diurnas variando entre 45°C e 65°C, significativamente superiores aos 25°C de referência das condições padrão de teste (Simões, 2018; Skoplaki; Palyvos, 2009).

As perdas por temperatura identificadas nos estudos de campo variaram entre 8% e 14% para tecnologias baseadas em silício cristalino, dependendo do período do ano e das condições específicas de instalação. Essa constatação reforça a necessidade de consideração adequada do coeficiente de temperatura dos módulos no dimensionamento de sistemas para a região, bem como a implementação de estratégias de ventilação apropriadas para redução da temperatura de operação (Simões, 2018).

O acúmulo de sujeira sobre a superfície dos módulos foi identificado como segundo fator mais relevante de degradação de desempenho, particularmente durante os períodos de estiagem prolongada característicos do semiárido nordestino. As perdas por sujeira observadas variaram entre 3% e 12%, com maior susceptibilidade apresentada por tecnologias de silício cristalino

devido ao padrão não uniforme de deposição das partículas sobre as células interconectadas em série (Nascimento *et al.*, 2016; Qasem *et al.*, 2012). A recuperação de desempenho após procedimentos de limpeza, documentada entre 4% e 12% dependendo da tecnologia e do grau de acúmulo, evidencia a necessidade de incorporação de programas de manutenção preventiva nos projetos fotovoltaicos da região, com impacto direto nos custos operacionais e na viabilidade econômica dos empreendimentos.

A análise de desempenho elétrico de sistemas em operação no Nordeste demonstrou resultados altamente satisfatórios quando comparados a padrões internacionais. Os valores de Performance Ratio observados variaram entre 75% e 90%, com média de 82%, valores que se enquadram no intervalo de excelência estabelecido pela literatura técnica internacional para sistemas fotovoltaicos bem dimensionados e operados (Nascimento *et al.*, 2016; Marion *et al.*, 2005). A produtividade específica anual, expressa pelo indicador Yield, apresentou valores entre 1.450 e 1.850 kWh/kWp/ano, com média de 1.650 kWh/kWp/ano, resultados que superam em 40% a 60% os valores típicos observados em países europeus e confirmam o excepcional aproveitamento energético proporcionado pelas condições naturais da região (Simões, 2018).

A análise comparativa entre diferentes tecnologias fotovoltaicas revelou comportamentos distintos sob as condições ambientais específicas do Nordeste. As tecnologias de segunda geração, particularmente o silício amorfo, demonstraram Performance Ratio superior (92,3% em corrente contínua) quando comparadas às tecnologias convencionais de silício monocristalino (87,9%) e policristalino (88,4%), resultado atribuído ao menor coeficiente de temperatura negativo dessas tecnologias e ao fenômeno de recozimento térmico que parcialmente compensa a degradação inicial característica dos filmes finos (Nascimento *et al.*, 2016; Rüther *et al.*, 2003). Esse resultado sugere que a seleção tecnológica de módulos para aplicações no Nordeste deve considerar não apenas a eficiência nominal em condições padrão, mas também o comportamento sob elevadas temperaturas operacionais, podendo tecnologias com menor eficiência nominal apresentar melhor desempenho energético anual.

O marco regulatório brasileiro, particularmente após a publicação da Resolução Normativa 482/2012 e suas atualizações subsequentes, foi identificado pela literatura como fator determinante para o crescimento exponencial da capacidade instalada fotovoltaica no país (ANEEL, 2012; Uczar, 2012). A criação do sistema de compensação de energia elétrica e a simplificação dos procedimentos de conexão removeram barreiras significativas que anteriormente limitavam a participação de pequenos consumidores na geração distribuída. A análise temporal demonstra que a capacidade instalada de geração distribuída fotovoltaica no

Brasil cresceu exponencialmente após 2012, atingindo taxas de crescimento anual superiores a 200% em determinados períodos, com o Nordeste representando aproximadamente 25% da capacidade nacional instalada, proporção inferior ao potencial técnico da região mas que vem crescendo consistentemente (BAZILIAN et al., 2013).

A introdução de modalidades adicionais de compensação pela Resolução Normativa 687/2015, incluindo geração compartilhada, empreendimentos de múltiplas unidades consumidoras e autoconsumo remoto, ampliou significativamente o público potencial beneficiário e democratizou o acesso à tecnologia solar (ANEEL, 2015; Kissel, 2006). Essas modalidades revelaram-se particularmente relevantes para o contexto nordestino, onde parcela significativa da população urbana reside em edificações multifamiliares ou não dispõe de área adequada para instalação de sistemas em suas próprias unidades consumidoras. A Lei Federal 14.300/2022, ao estabelecer o marco legal permanente da geração distribuída com regras de transição claras, proporcionou a segurança jurídica necessária para planejamento de investimentos de longo prazo, aspecto fundamental para consolidação do setor e atração de investimentos de maior porte (BRASIL, 2022; Mazzucato, 2014).

A evolução tecnológica do setor fotovoltaico, evidenciada pela análise das três gerações de células solares, demonstra trajetória consistente de aumento de eficiência e redução de custos que vem tornando a energia solar progressivamente mais competitiva (Rodrigues, 2023; Raphael et al., 2018). As tecnologias de primeira geração, baseadas em silício cristalino, mantêm dominância comercial devido à combinação de eficiências elevadas, confiabilidade comprovada e processos industriais maduros, mas enfrentam desafios relacionados ao desempenho sob elevadas temperaturas (Machado; Miranda, 2015).

As tecnologias emergentes de terceira geração, particularmente células de perovskita e células de heterojunção, apresentam características potencialmente vantajosas para aplicações no Nordeste, incluindo menores coeficientes de temperatura e possibilidade de fabricação através de processos de baixo custo, embora ainda enfrentem desafios de estabilidade e durabilidade que limitam sua comercialização em larga escala (Rodrigues, 2023; Rosa; Toledo, 2021; Green et al., 2010).

A avaliação de complementaridade entre geração solar e eólica no Nordeste revelou sinergia temporal significativa entre as fontes, com o recurso eólico apresentando predominância noturna e valores mínimos durante o período vespertino, exatamente quando a geração solar atinge seus valores máximos (Simões, 2018; Soltermann; Silva, 1998). Essa complementaridade temporal oferece oportunidades relevantes para otimização do

aproveitamento da infraestrutura de transmissão existente e para desenvolvimento de projetos híbridos que maximizam o fator de capacidade das instalações. Simulações de sistemas híbridos compartilhando infraestrutura comum demonstraram que o aproveitamento combinado das fontes permite redução significativa de investimentos em subestações e linhas de transmissão, com descarte de energia inferior a 1% anualmente mesmo em configurações de elevado fator de ocupação (Simões, 2018).

Os aspectos socioeconômicos identificados pela revisão de literatura evidenciam que a expansão da energia solar fotovoltaica no Nordeste transcende benefícios energéticos, constituindo-se em vetor de desenvolvimento regional multidimensional (Nascimento, 2015; de Lima; Veziroglu, 2001). A geração de empregos diretos na fase de instalação, estimada entre 15 e 25 postos de trabalho por MW instalado, e a demanda por profissionais qualificados em toda a cadeia produtiva representam oportunidades concretas de inclusão produtiva e qualificação da força de trabalho regional (Pereira *et al.*, 2006; Fried; Shukla; Sawyer, 2012). A economia de custos com energia elétrica, que pode representar reduções de 50% a 95% na fatura elétrica de consumidores que adotam geração distribuída, libera recursos financeiros que podem ser direcionados para outras necessidades, com impacto positivo na qualidade de vida e capacidade de investimento das famílias e empresas (Nascimento, 2015).

2323

A dimensão ambiental da expansão solar no Nordeste apresenta relevância estratégica no contexto das mudanças climáticas e dos compromissos brasileiros de redução de emissões. A substituição de geração termelétrica baseada em combustíveis fósseis por energia solar evita emissões significativas de gases de efeito estufa, com valores entre 0,6 e 1,0 kg de CO₂ por kWh gerado, dependendo da fonte convencional substituída (Marques; Krauter; Lima, 2009). Considerando o potencial de expansão da capacidade instalada solar no Nordeste e as projeções de crescimento para as próximas décadas, a contribuição acumulada para mitigação de emissões pode alcançar dezenas de milhões de toneladas de CO₂ evitadas, com benefícios ambientais globais e regionais associados à melhoria da qualidade do ar.

A questão da segurança hídrica emerge como aspecto particularmente relevante no contexto nordestino, região historicamente vulnerável a períodos de estiagem prolongada (Nascimento, 2015; Tolmasquim, 2016). A energia solar, cujo recurso apresenta correlação inversa com a disponibilidade hídrica, oferece complementaridade estratégica às fontes hídricas predominantes na matriz elétrica brasileira, fortalecendo a segurança energética regional justamente nos períodos mais críticos de escassez hídrica (Viana; Ary, 2005). Essa característica confere à expansão solar no Nordeste relevância que transcende aspectos puramente

energéticos, inserindo-se na estratégia mais ampla de adaptação às mudanças climáticas e gestão sustentável dos recursos hídricos (Nascimento, 2015).

A experiência do Programa Luz do Sol, documentada na literatura analisada, demonstra concretamente os impactos socioeconômicos positivos da energia solar em comunidades rurais isoladas do Nordeste (Marques; Krauter; Lima, 2009). Os benefícios identificados nas 492 residências atendidas incluíram ampliação significativa do período de atividades produtivas e educacionais, melhoria nas condições de armazenamento de alimentos e medicamentos, acesso a meios de comunicação e informação, e redução da migração para áreas urbanas. Esses resultados evidenciam o potencial da energia solar como ferramenta de inclusão social e desenvolvimento rural, particularmente relevante para as milhares de comunidades isoladas ainda não atendidas pela rede convencional de distribuição no semiárido nordestino.

Nesse sentido, os resultados apresentados permite concluir que o Nordeste brasileiro reúne condições técnicas, ambientais e regulatórias excepcionalmente favoráveis para consolidação da energia solar fotovoltaica como componente estratégico da matriz elétrica regional (Pereira *et al.*, 2006; Nascimento *et al.*, 2016). Os desafios identificados, relacionados principalmente às elevadas temperaturas operacionais e ao acúmulo de sujeira, são tecnicamente administráveis através de seleção tecnológica apropriada, dimensionamento adequado e implementação de programas de manutenção preventiva (Simões, 2018). A continuidade da expansão solar na região depende, contudo, da manutenção de um ambiente regulatório estável e previsível, do desenvolvimento de políticas públicas integradas de incentivo e capacitação, e do fortalecimento da infraestrutura de pesquisa e desenvolvimento tecnológico adaptado às especificidades regionais (Nascimento, 2015; Mazzucato, 2014; Elkins, 2004).

2324

Não obstante os resultados amplamente favoráveis identificados, a revisão de literatura também evidenciou desafios significativos e limitações que devem ser considerados para uma compreensão realista da viabilidade técnica e econômica da energia solar fotovoltaica no Nordeste brasileiro. O primeiro desafio relaciona-se à degradação acelerada de desempenho dos módulos fotovoltaicos sob condições de elevada temperatura e radiação intensa, fatores que caracterizam o ambiente nordestino (Simões, 2018).

A questão dos custos operacionais associados à manutenção preventiva emerge como limitação relevante para a viabilidade econômica, particularmente em instalações de pequeno porte, sendo que a necessidade de limpeza periódica dos módulos para mitigação das perdas por acúmulo de sujeira implica custos recorrentes que podem representar entre 1% e 3% do investimento inicial anualmente (Nascimento *et al.*, 2016). A literatura analisada não apresenta

consenso sobre as melhores práticas de manutenção adaptadas às condições específicas do Nordeste, indicando necessidade de pesquisas adicionais sobre frequência ótima de limpeza, métodos mais eficientes e custo-efetivos, e desenvolvimento de tecnologias de auto-limpeza apropriadas para o contexto regional.

As limitações relacionadas à infraestrutura de rede elétrica constituem barreira técnica significativa para expansão acelerada da geração distribuída em determinadas localidades do Nordeste (ANEEL, 2021; Brown, 2003). A literatura destaca que redes de distribuição dimensionadas originalmente apenas para fluxo unidirecional de energia enfrentam desafios técnicos quando da conexão de múltiplos geradores distribuídos, incluindo problemas de sobretensão, desequilíbrio de fases e distorções harmônicas.

Ademais, as limitações metodológicas identificadas na literatura revisada incluem a escassez de estudos de longo prazo com séries temporais superiores a cinco anos de operação contínua, o que limita a capacidade de avaliação precisa da degradação de desempenho ao longo do ciclo de vida completo dos sistemas (Nascimento *et al.*, 2016; Burger; Rüther, 2006). A maioria dos estudos de campo analisados concentra-se em períodos de um a três anos, insuficientes para capturar adequadamente fenômenos de degradação gradual e efeitos climáticos extremos que possam ocorrer com baixa frequência, representando lacuna importante no conhecimento científico disponível sobre o comportamento de longo prazo de sistemas fotovoltaicos instalados nas condições específicas do Nordeste brasileiro.

2325

4 CONCLUSÃO

A revisão de literatura evidenciou que o Nordeste brasileiro reúne condições naturais excepcionalmente favoráveis para a geração solar fotovoltaica, com altos índices de irradiação e desempenho elétrico superior à média internacional. Os estudos analisados registram Performance Ratio em torno de 82% e produtividade específica de 1.650 kWh/kWp/ano, confirmando a elevada viabilidade técnica da tecnologia na região. Contudo, desafios ambientais como altas temperaturas operacionais e acúmulo de sujeira — responsáveis por perdas significativas — reforçam a necessidade de estratégias adequadas de seleção tecnológica, dimensionamento e manutenção preventiva.

No âmbito institucional, o marco regulatório estabelecido pela Resolução Normativa 482/2012 e posteriormente consolidado pela Lei 14.300/2022 mostrou-se decisivo para a expansão da geração distribuída, ao garantir segurança jurídica e atratividade econômica para novos investimentos. Paralelamente, o avanço das tecnologias fotovoltaicas, especialmente as de

terceira geração projetadas para melhor desempenho em altas temperaturas, oferece perspectivas promissoras de aumento da eficiência e redução de custos, contribuindo para ampliar ainda mais o potencial regional.

Por fim, a literatura demonstra que a energia solar no Nordeste possui impactos socioeconômicos e ambientais que ultrapassam o campo energético, ao promover desenvolvimento regional, inclusão elétrica, geração de empregos qualificados e mitigação das emissões de carbono. A consolidação desse cenário, entretanto, depende do fortalecimento de políticas públicas integradas, de estudos de longo prazo e do aprimoramento de práticas de manutenção adaptadas ao clima da região. A articulação entre avanços tecnológicos, estabilidade regulatória e investimentos estruturantes é apontada como condição essencial para que o Nordeste se consolide como protagonista nacional na transição energética rumo à sustentabilidade.

REFERÊNCIAS

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Módulo 3 – Acesso ao sistema de distribuição: Procedimentos de Distribuição de Energia Elétrica no Sistema Elétrico Nacional – PRODIST**. Brasília: ANEEL, 2021.

ANEEL – 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. Brasília: ANEEL, 2012.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA. **Resolução Normativa nº 687, de 24 de novembro de 2015**. Altera a Resolução Normativa nº 482/2012. Brasília: ANEEL, 2015.

BAZILIAN, M. *et al.* Re-considering the economics of photovoltaic power. *Renewable Energy*, v. 53, p. 329–338, 2013.

BRASIL. **Lei nº 14.300, de 6 de janeiro de 2022**. Institui o marco legal da microgeração e minigeração distribuída. Brasília: Presidência da República, 2022.

BROWN, L. R. **Eco-economia: construindo uma economia para a terra**. Salvador: UMA, 2003.

BÜHLER, A. J.; GABE, I. J. Uma revisão sobre as tecnologias fotovoltaicas atuais. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**, 7., 2018. Gramado: ABENS, 2018.

BURGER, B.; RÜTHER, R. Inverter sizing of grid-connected photovoltaic systems in the light of local solar resource distribution characteristics and temperature. *Solar Energy*, v. 80, n. 1, p. 32–45, 2006.

DE LIMA, L. C.; VEZIROGLU, T. N. Long-term environmental and socio-economic impact of a hydrogen energy program in Brazil. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 26, n. 1, p. 39–45, 2001.

ELKINS, P. Step changes for decarbonising the energy system: research needs for renewables, energy efficiency and nuclear power. *Energy Policy*, v. 32, p. 1891–1904, 2004.

FRIED, L.; SHUKLA, S.; SAWYER, S. **Global wind report: annual market update 2011**. Brussels: Global Wind Energy Council, 2012.

GREEN, M. A. *et al.* Solar cell efficiency tables (version 37). *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 18, n. 2, p. 144–150, 2010.

HINRICHS, R. A.; KLEINBACH, M. **Energia e meio ambiente**. São Paulo: Pioneira Thomson Learning, 2003.

KISSEL, J. M.; KRAUTER, S. C. W. Adaptations of renewable energy policies to unstable macroeconomic situations – case study: wind power in Brazil. *Energy Policy*, v. 34, n. 18, p. 3591–3598, 2006.

LIMA, F. J. L. *et al.* Uma revisão dos princípios da conversão fotovoltaica de energia. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 42, e20190162, 2020.

MACHADO, C. T.; MIRANDA, F. S. Energia solar fotovoltaica: uma breve revisão. *Revista Virtual de Química*, v. 7, n. 1, p. 126–143, 2015.

MARION, B. *et al.* Performance parameters for grid-connected PV systems. In: **IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE**, 31., 2005. Lake Buena Vista: IEEE, 2005. p. 1601–1606.

MARQUES, R. C.; KRAUTER, S. C. W.; LIMA, L. C. Energia solar fotovoltaica e perspectivas de autonomia energética para o nordeste brasileiro. *Revista Tecnologia*, v. 30, n. 2, p. 153–162, 2009.

MAZZUCATO, M. **O Estado empreendedor: desmascarando o mito do setor público vs. setor privado**. São Paulo: Portfolio-Penguin, 2014.

NASCIMENTO, A. S. **Energia solar fotovoltaica: estudo e viabilidade no nordeste brasileiro**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Produção) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2015.

NASCIMENTO, L. R. *et al.* Avaliação de desempenho de diferentes tecnologias fotovoltaicas no nordeste brasileiro. **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENERGIA SOLAR**, 6., 2016. Anais [...]. Belo Horizonte: ABENS, 2016.

PEREIRA, E. B. *et al.* **Atlas brasileiro de energia solar**. São José dos Campos: INPE, 2006.

QASEM, H. *et al.* Dust-induced shading on photovoltaic modules. *Progress in Photovoltaics: Research and Applications*, v. 22, n. 2, p. 218–226, 2012.

RODRIGUES, K. H. S. **Perspectivas de novas tecnologias de células solares fotovoltaicas como oportunidade para otimizar o aproveitamento do potencial técnico solar do nordeste brasileiro.** 2023. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2023.

ROSA, E. H. S.; TOLEDO, L. F. R. B. Uma revisão dos princípios de funcionamento de células solares orgânicas. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, v. 43, e20200434, 2021.

RÜTHER, R. *et al.* Performance assessment of a microcrystalline Si PV installation in a warm climate. **IEEE PHOTOVOLTAIC SPECIALISTS CONFERENCE**, 35., 2010. Proceedings. Honolulu: IEEE, 2010.

SIMÕES, G. C. **Análise da complementariedade energética entre fontes solar e eólica para geração de energia elétrica no nordeste brasileiro.** 2018. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

SKOPLAKI, E.; PALYVOS, J. A. On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: a review of efficiency/power correlations. *Solar Energy*, v. 83, n. 5, p. 614–624, 2009.

SOLTERMANN, O. E.; SILVA, E. P. Comparative study between the Hysolar project and a hypothetical international project in Brazil for hydrogen production. *International Journal of Hydrogen Energy*, v. 23, n. 9, p. 735–739, 1998.

TOLMASQUIM, M. T. **Energia renovável: hidráulica, biomassa, eólica, solar, oceânica.** Rio de Janeiro: EPE, 2016.

UCZAR, P. B. **Caderno de altos estudos: energias renováveis – riqueza sustentável ao alcance da sociedade.** Brasília: Câmara dos Deputados, 2012.

VIANA, F. L. E.; ARY, J. C. A. **Infraestrutura do Nordeste: estágio atual e possibilidades de investimento.** Fortaleza: Banco do Nordeste do Brasil, 2005.