

## **Vulnerabilidade das regiões semiáridas às mudanças climáticas: impactos na produção de energia fotovoltaica**

**Vulnerability of semiarid regions to climate change: impacts on the production of photovoltaic energy**

**Vulnerabilidad de las regiones semiáridas al cambio climático: impactos en la producción de energía solar fotovoltaica**

Recebido: 13/02/2021 | Revisado: 20/02/2021 | Aceito: 26/02/2021 | Publicado: 04/03/2021

### **Luiz Felipe Souza Fonseca**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8833-8537>  
Universidade Federal da Paraíba, Brasil  
E-mail: [luiz.fonseca@cear.ufpb.br](mailto:luiz.fonseca@cear.ufpb.br)

### **José Moreira Silva Júnior**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0897-9669>  
Universidade Federal da Paraíba, Brasil  
E-mail: [junior\\_moreira88@hotmail.com](mailto:junior_moreira88@hotmail.com)

### **José Ribeiro Farias Neto**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1971-4655>  
Universidade Federal da Paraíba, Brasil  
E-mail: [joseneto93@gmail.com](mailto:joseneto93@gmail.com)

### **Raphael Abrahão**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-2945-2604>  
Universidade Federal da Paraíba, Brasil  
E-mail: [raphael@cear.ufpb.br](mailto:raphael@cear.ufpb.br)

### **Monica Carvalho**

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8524-3452>  
Universidade Federal da Paraíba, Brasil  
E-mail: [monica@cear.ufpb.br](mailto:monica@cear.ufpb.br)

### **Resumo**

Já está demonstrado que as mudanças climáticas alteram a capacidade de produção das energias renováveis, assim passando a ser uma avaliação necessária no que tange a instalação de novas usinas de energia desse tipo de fonte. A alteração de parâmetro climáticos como temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média e nebulosidade tendem a prejudicar a região semiárida social e economicamente. Haja vista esse cenário, lança-se mão de projeções de parâmetros climáticos, produzindo aproximações da evolução de seus comportamentos, possibilitando prognósticos sobre o desempenho da produção de energias renováveis. Fazendo uma revisão bibliográfica, o presente trabalho se dedica a verificar como as tendências climáticas impactam na produção de energia fotovoltaica em regiões semiáridas. Conclui-se que, apesar da escassez de trabalhos sobre o tema, os resultados de pesquisas científicas e tecnológicas pode contribuir para minimizar a difícil situação das populações que vivem nessas regiões, proporcionando melhoria na qualidade de vida mesmo em situações climáticas adversas. Sendo assim, fica clara a necessidade da consideração de tendências climáticas na implementação e otimização de futuras instalações de energias renováveis no semiárido.

**Palavras-chave:** Mudanças climáticas; Tendências climáticas; Semiárido; Energia solar fotovoltaica.

### **Abstract**

It has already been demonstrated that climate change can alter the production of renewable energy, being a necessary evaluation regarding the installation of new energy plants. The change in climatic parameters such as maximum and mean temperatures, and cloudiness, can further penalize the semiarid region from social and economic perspectives. Considering this scenario, the projections of climatic parameters can produce approximations of the evolution of their behavior, enabling the delineation of prognostics on the performance of renewable energy production. This study carries out a systematic literature review to verify how climate trends can affect the production of photovoltaic solar energy in semiarid regions. It is concluded that, despite the lack of studies on the subject, the results of scientific and technological research can contribute to minimize the difficult situation of the population living in these regions, providing an improvement in life quality even in adverse climatic situations. The necessity of considering climate trends is highlighted as a prior step to the implementation and optimization of future renewable energy developments on semiarid regions.

**Keywords:** Climate change; Climate trends; Semiarid; Solar photovoltaic energy.

### Resumen

Ya se ha demostrado que el cambio climático puede alterar la producción de energía renovable, siendo una evaluación necesaria respecto a la instalación de nuevas plantas energéticas. El cambio en los parámetros climáticos, como las temperaturas máximas y medias, y la nubosidad, puede penalizar aún más a la región semiárida desde las perspectivas sociales y económicas. Considerando este escenario, las proyecciones de parámetros climáticos pueden producir aproximaciones de la evolución de su comportamiento, permitiendo delinear pronósticos sobre el desempeño de la producción de energía renovable. Este estudio realiza una revisión sistemática de la literatura para verificar cómo las tendencias climáticas pueden afectar la producción de energía solar fotovoltaica en regiones semiáridas. Se concluye que, a pesar de la falta de estudios sobre el tema, los resultados de las investigaciones científicas y tecnológicas pueden contribuir a minimizar la difícil situación de la población que vive en estas regiones, proporcionando una mejora en la calidad de vida incluso en situaciones climáticas adversas. Se destaca la necesidad de considerar las tendencias climáticas como paso previo a la implementación y optimización de futuros desarrollos de energía renovable en regiones semiáridas.

**Palabras-clave:** Cambio climático; Tendencias climáticas; Semiárido; Energía solar fotovoltaica.

## 1. Introdução

As demandas globais de eletricidade vêm aumentando continuamente, devido ao crescimento populacional e econômico. Países localizados em regiões semiáridas também têm presenciado um aumento considerável no consumo elétrico, a exemplo do Marrocos, que tem atingido um aumento de 6,5%/ano devido à alta taxa de eletrificação rural e acelerado crescimento econômico. A região do Nordeste Brasileiro, onde também há presença do clima semiárido, é caracterizada por oscilações climáticas consideráveis ao longo do ano, com amplitudes térmicas que podem chegar a 6°C (Silva et al., 2015). A vulnerabilidade climática associada a elevação da temperatura do ar dessas regiões interfere no ecossistema, e também influencia na geração de energia fotovoltaica. Temperaturas elevadas de operação podem interferir no desempenho dos módulos fotovoltaicos, com queda da eficiência e até dano estrutural permanente do módulo se houver estresse térmico contínuo, e devendo ser considerado ao longo da vida útil de um painel fotovoltaico (Jakhrani et al., 2011).

A região Nordeste do Brasil apresenta a menor média anual de índice de nebulosidade do país, com índices de radiação solar uniformes, tornando-se a região mais favorável a implementação de energia fotovoltaica (Martins et al., 2008). No entanto, devido às altas temperaturas que as placas solares podem atingir em decorrência da temperatura, a geração de eletricidade pode ser comprometida. A utilização de energias renováveis no semiárido não apresenta somente ganhos regionais (e.g., independência da rede elétrica) mas também ganhos nacionais, já que a matriz energética também se beneficia, acumulando também benefícios ambientais devido a menor emissão de poluentes. Sistemas descentralizados podem funcionar como uma expansão do setor elétrico, e são bastante relevantes principalmente quando incorporam energias renováveis. Os sistemas energéticos a base de recursos renováveis são peças-chave para apoiar o desenvolvimento sustentável e a proteção do clima (Carvalho et al., 2021).

Os dados climáticos da região onde as tecnologias solares são instaladas devem ser considerados e avaliados para obter uma boa estimativa da geração da energia fotovoltaica (Siqueira, 2011; Carvalho e Delgado, 2017). Com o passar dos anos, parâmetros climáticos como temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura média, nebulosidade estão sendo alterados devido às mudanças climáticas (Alcântara et al., 2020). As mudanças climáticas envolvem todas as irregularidades nos padrões climáticos, verificadas em períodos extensos e que independem de suas causas, segundo o Intergovernmental Panel on Climate Change (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas, IPCC) (IPCC, 2007). Entre as principais variações está a alteração dos padrões de temperatura do ar (Holanda & Medeiros, 2020) e precipitação pluvial (Barboza et al., 2020) provocadas, por exemplo, pela emissão de gases de efeito estufa devido a ação humana. Essas variações podem ser comprovadas por meio de métodos estatísticos de série meteorológicas. A ocorrência desses fenômenos tem chamado a atenção das autoridades pelas consequências negativas que provocam no âmbito social e econômico. A análise realizada por

Oliveira (2018), na cidade de Uberaba (Minas Gerais), mostrou que no período de 1960 a 2010 houve um aumento generalizado dos índices de temperatura extrema máxima e mínima. Farias Neto et al. (2018) compilaram estudos que avaliam os efeitos climáticos sobre a produção de energias renováveis no mundo, indicando que há interferência do avanço do aquecimento global na produção de energia renovável. Em alguns casos os impactos climáticos beneficiam a produção e, em outros, prejudicam. Porém, como é possível perceber que há regiões que apresentam potencial de queda de sua produção, se faz importante averiguar localmente as melhores alternativas, de maneira a otimizar o sistema energético.

Ainda é comum que os projetos que utilizam painéis fotovoltaicos como fonte de geração de eletricidade considerem os parâmetros climáticos influentes na sua produção como constantes, como por exemplo a incidência de radiação solar (considera-se como isenta de alteração por efeitos climáticos). Entretanto, as tendências climáticas analisadas e avaliadas em diversas regiões, incluindo as regiões semiáridas, têm mostrado que não é possível mais considerar esses parâmetros climáticos como valores constantes e estáveis no decorrer dos anos (Jerez et al., 2015). A criação de séries climáticas é um passo importante para a caracterização especial de regiões semiáridas, mas também pode ser usada para desenvolver estudos climáticos e de gerenciamento dos recursos hídricos da região (García-Garizábal et al., 2020). As regiões semiáridas são regiões nas quais a agricultura é um desafio e, portanto, o investimento em energias renováveis, como solar e eólica, pode contribuir na geração de emprego e renda no semiárido, por meio da instalação e manutenção das unidades produtivas e complexos geradores.

Reconhecendo que a compreensão da dinâmica do clima é de fundamental importância na determinação dos valores produzidos de energia, o objetivo do presente trabalho é realizar uma revisão de literatura para verificar como se comporta a produção de energia em sistemas fotovoltaicos em regiões semiáridas, considerando o impacto das mudanças climáticas.

## 2. Metodologia

Devido a importância da reflexão sobre o que se investiga e do processo de investigação, aplica-se aqui a pesquisa-ação, uma metodologia qualitativa (Pereira et al., 2018), onde é importante a interpretação dos pesquisadores, incluindo suas opiniões sobre o fenômeno em estudo. Uma busca sistemática de artigos científicos foi feita no Portal CAPES de Periódicos e no Google Acadêmico, tanto na língua inglesa quanto na portuguesa.

Foram usados os descritores: *Semiarid*, *Photovoltaic*, *Impact of Climate Change* e *Renewable Energy*, assim como seus sinônimos correspondentes em português, além do operador booleano AND para encontrar os trabalhos que relacionassem discussões que envolvessem a presença de combinações de descritores. Não foi utilizada restrição temporal de estudos, para obter o maior número possível de estudos.

Sobre os critérios de inclusão, incluíram-se estudos que avaliassem especificamente o impacto da mudança de variáveis climáticas na produção de eletricidade em sistemas energéticos renováveis. Só foram considerados artigos referentes a energia solar fotovoltaica ou que contivessem, em seu estudo, a análise de sistemas fotovoltaicos.

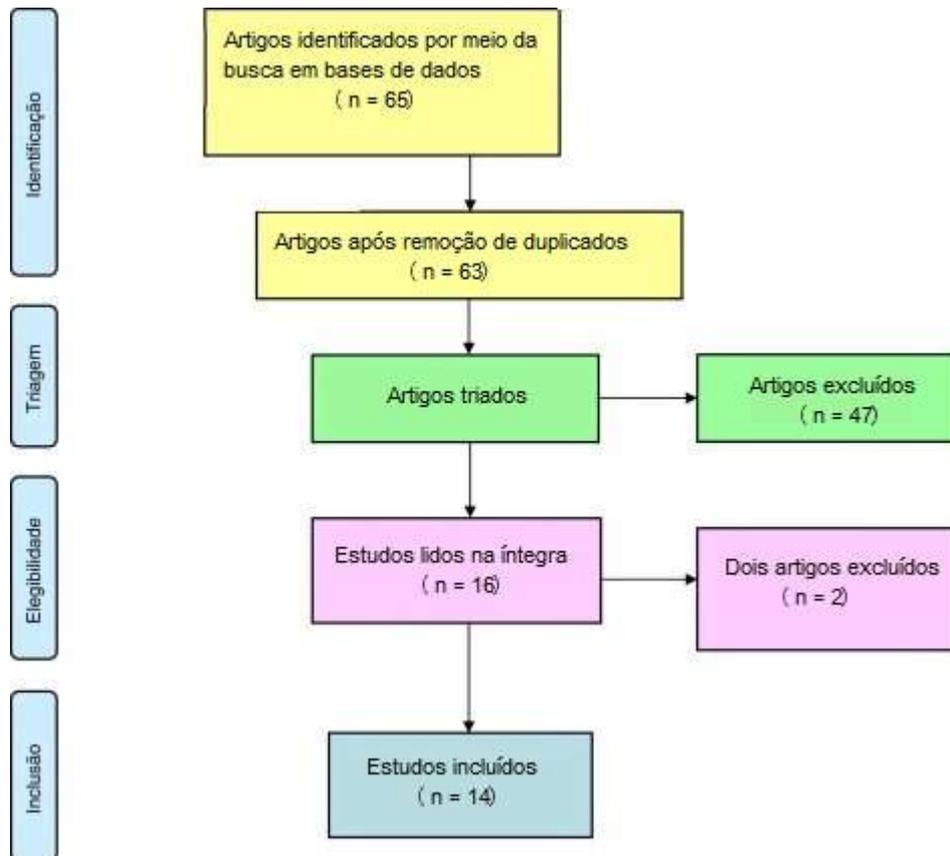
Referente aos critérios de exclusão, foram excluídos da revisão artigos que avaliaram o comportamento da produção fotovoltaica de energia em regiões que não fossem semiáridas.

Inicialmente, foi realizada uma triagem a partir da análise dos títulos e resumos localizados na busca. Posteriormente, todos os estudos que se apresentaram pertinentes ao tema foram obtidos na íntegra e analisados separadamente. Por fim, os artigos analisados e selecionados, seguindo os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos, foram incluídos na sistematização dos dados após reunião de consenso com os autores. As listas de referências de todos os artigos foram também consultadas, na tentativa de encontrar novos estudos para incluir na revisão.

### 3. Resultados e Discussão

A Figura 1 mostra o esquema do processo utilizado na revisão, segundo os procedimentos descritos na metodologia. A estratégia de busca elaborada forneceu um total de 65 estudos. Após a triagem pela leitura dos títulos e resumos, 16 estudos foram considerados potencialmente elegíveis e lidos na íntegra pelos avaliadores.

**Figura 1.** Diagrama do processo de revisão.



Fonte: Autores.

Seguindo o diagrama da Figura 1, ao término das análises, 14 artigos preencheram todos os critérios de inclusão para o estudo: Obregon e Marengo (2007); Skoplaki e Palyvos (2009); Crook et al. (2011); Pinho e Galdino (2014); Fant et al. (2015); Jerez et al. (2015); Popovici et al. (2015); Wild et al. (2015); Bazyomo et al. (2016); Abrahão et al. (2017); Hajjaj et al. (2018); Busson et al. (2019); Medeiros et al. (2019), Andrade et al. (2021). Os estudos selecionados foram publicados entre os anos de 2007 e 2021.

O presente estudo se dedica a analisar trabalhos que relacionam impactos climáticos na produção de energia elétrica a partir de sistemas fotovoltaicos em regiões semiáridas. Para tanto, os resultados são divididos em duas partes, são elas: a apresentação de pesquisas em que há avaliação desses impactos em regiões semiáridas; e uma construção argumentativa, por se tratar de tópico de bibliografia escassa, baseada na combinação de pesquisas, as que tratam da relação entre parâmetros climáticos e a eficiência de painéis fotovoltaicos e as que estudam esses parâmetros em regiões semiáridas.

No que se refere a regiões semiáridas, a exemplo do Sul do continente africano, Fant et al. (2015) apresentaram um método estimativo, combinando modelos climáticos do Integrated Global Systems Model (IGSM) e do Coupled Model Intercomparison Project phase 3 (CMIP- 3), para verificar o impacto das mudanças climáticas na produção de energia eólica e solar. Mostrou-se que o potencial de produção energética fotovoltaico não apresentará mudanças médias significativas até

2050, exceto em casos extremos em que essa produção pode variar entre -15% e +15%, porém com baixa probabilidade.

Resultado semelhante foi obtido por Andrade et al. (2021), que avaliaram o desempenho de sistemas fotovoltaicos nas cidades de Patos e Sousa, no Sertão Paraibano. Levando em consideração as tendências climáticas dos locais, e confrontando dados do período 1970-1980 versus 2004-2014, foram verificadas produções elétricas fotovoltaicas quase inalteradas, decrescendo cerca de 1% apenas. Tal resultado corrobora o estudo de Crook et al. (2011), que reforçam a hipótese ao examinarem como a temperatura e a insolação, ao longo do século XXI, afetam a produção de energia fotovoltaica em um cenário projetado de mudanças climáticas (IPCC SRES A1B). As regiões áridas e semiáridas da Espanha, Argélia, Arábia Saudita e Austrália foram avaliadas, e verificou-se que, para o período entre 2010 e 2080, a produção fotovoltaica na Espanha aumentará cerca de 2%, com queda de 2% na Argélia, 6% na Arábia Saudita e menos de 1% na Austrália, considerando apenas o modelo HadGEM1 (new Hadley Centre Global Environmental Model, desenvolvido pelo IPCC). Jerez et al. (2015) confirmaram tal influência avaliando os impactos das mudanças climáticas na produção fotovoltaica de energia elétrica na Europa, indicando que a Espanha apresentará uma variação negativa da produção média de energia de 2% até a virada do século (segundo o cenário climático RCP8.5, que é o pior cenário para emissões atmosféricas).

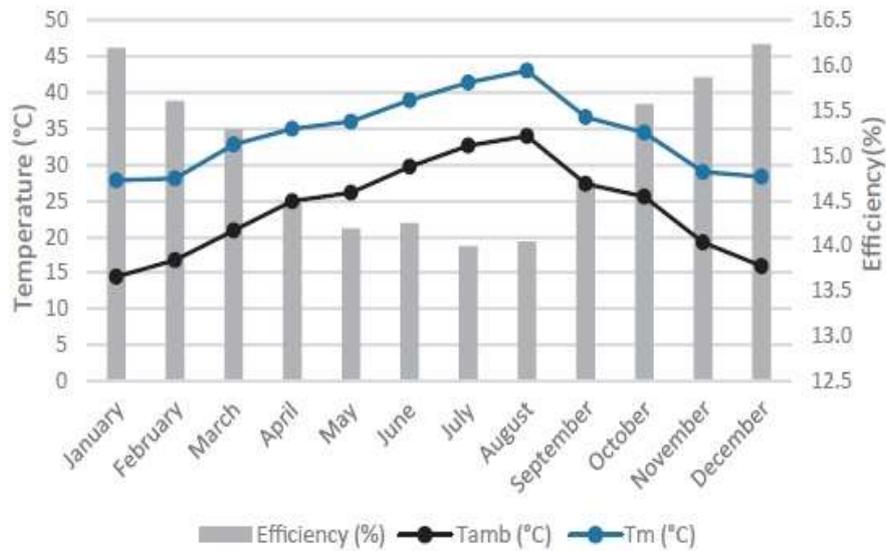
No que diz respeito a relação entre temperatura e eficiência na produção fotovoltaica, o comportamento térmico dos painéis fotovoltaicos que operam em regiões semiáridas é complexo, já que a irradiância dessas regiões é maior do que a indicada pelo NOCT (Nominal Operating Cell Temperature, temperatura nominal de operação da célula) principalmente no período entre 10 e 14 horas (Busson et al., 2019). A temperatura de operação é definida por meio de um balanço de energia, onde a energia proveniente da radiação solar é convertida parcialmente em energia elétrica, com dissipação de energia térmica (Pinho; Galdino, 2014). O estudo verificou que nos módulos fotovoltaicos há uma divergência entre a temperatura de operação estimada pelos modelos matemáticos e a temperatura medida, e uma diferença de 13% foi identificada entre essas duas temperaturas. Para maximizar a eficiência dos coletores, a sua temperatura de operação deve ser a menor possível, já que acima de 25 °C, cada incremento de 1°C reduz a eficiência aproximadamente em 0,45% (Popovici et al., 2015). O mesmo resultado foi obtido por Skoplaki e Palyvos (2009), que discutiram o comportamento da eficiência de um painel fotovoltaico com relação a variação da temperatura. Foi obtido que a temperatura é fator importante num sistema fotovoltaico, pois esta influencia tanto na eficiência do painel quanto na potência produzida. O estudo demonstrou que a potência produzida por um painel fotovoltaico tem relação inversamente linear com a temperatura. Estando estruturada a hipótese de que a temperatura ambiente influencia na eficiência de produção fotovoltaica de energia elétrica, serão a seguir avaliados os impactos climáticos na produção de energia elétrica em regiões semiáridas no mundo.

A partir de modelos climáticos fornecidos no último relatório de avaliação do IPCC, Wild et al. (2015) avaliaram as alterações da radiação solar que atingem a superfície terrestre, a nebulosidade, a temperatura do ar e suas implicações na geração de energia utilizando módulos fotovoltaicos. As projeções entre os anos de 2006 e 2049 nas principais regiões com alto potencial solar indicaram uma redução média na produção fotovoltaica na ordem de 1% a cada década. Os países inseridos em regiões semiáridas, a saber: Austrália, Estados Unidos, Noroeste da China, Índia, África do Sul e Espanha, apresentaram uma projeção de aquecimento de 0,05 °C/ano para as próximas décadas. Ainda segundo o estudo, as tendências de radiação solar com o céu claro são de pequeno decréscimo ou nulas em praticamente todo o mundo. Nas regiões do Sudeste dos Estados Unidos, China, África do Sul e Austrália, a nebulosidade tem uma tendência de reduzir seus índices em cerca de 0,05%/ano. Diante disso, os efeitos da redução da nebulosidade tendem a provocar um aumento da radiação solar em cerca de 0,03 W/m<sup>2</sup>/ano.

Uma comparação de 12 modelos físicos de produção fotovoltaica foi realizada por Hajjaj et al. (2018), no Marrocos, para verificar o desempenho dos módulos fotovoltaicos sob condições climáticas semiáridas e quentes. Identificou-se que, para todas os modelos de células solares utilizados no estudo, o aumento de temperatura de operação do módulo provocou uma

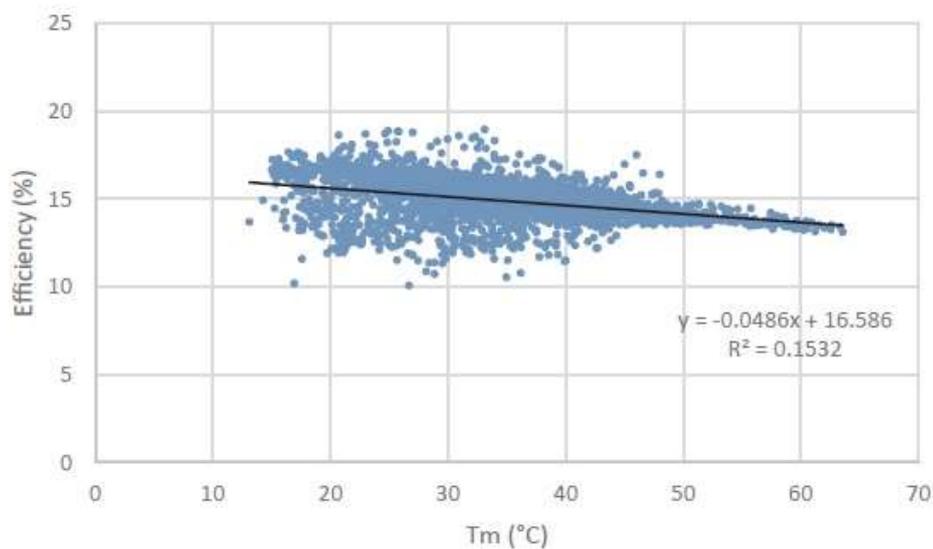
diminuição de 0,01%/°C no seu valor de corrente aberta. Já para a potência máxima produzida, observou-se uma queda de 0,43%/°C, devido a elevação da temperatura. Essa constatação foi comprovada com a redução de 2,5% da eficiência fotovoltaica para o período de verão para o inverno. A Figura 2 mostra as alterações na eficiência dos módulos, provocadas pelas modificações na temperatura durante o ano de 2017. Já a Figura 3 apresenta uma curva de regressão linear do comportamento da eficiência com a variação da temperatura.

**Figura 2.** Variação da eficiência dos módulos fotovoltaicos considerando a temperatura do módulo e temperatura ambiente.



Fonte: Hajjaj *et al.* (2018).

**Figura 3.** Relação entre eficiência e temperatura do módulo fotovoltaico.



Fonte: Hajjaj *et al.* (2018).

Bazyomo *et al.* (2016) realizaram um estudo com oito modelos climáticos em países do oeste africano, com o objetivo de analisar e prever as tendências de irradiação solar e temperatura do ar entre os anos de 2006 e 2100. Observou-se uma

tendência positiva em todas as regiões, com valores de incremento de temperatura de até 0,08 °C/ano. Os autores também identificaram que, devido às alterações de temperatura, a tendência é reduzir a produção fotovoltaica em até 0,032% a cada ano, com exceção da região da Libéria e Serra Leoa. Neste caso, o que pode ter havido é uma compensação dos efeitos de temperatura na eficiência dos coletores, por exemplo, pela redução do índice de nebulosidade. O artigo não engloba a análise dos outros parâmetros climáticos e, por isso, os autores concluem que essas duas regiões, onde não há tendência de redução da geração fotovoltaica, são as mais favoráveis com relação a viabilidade das instalações de placas solares.

As regiões do semiárido normalmente possuem um grande potencial para instalação de placas solares. Por outro lado, em determinados períodos do dia, quando a temperatura é muito elevada, o funcionamento dos módulos é prejudicado. A ação dos ventos deve também ser considerada, tendo em vista que a sua atividade provoca uma troca térmica do ambiente com o coletor, reduzindo a sua temperatura e aumentando a sua potência máxima (Busson et al., 2019).

No que tange ao semiárido brasileiro, especificamente, estudos como Obregon e Marengo (2007), sobre a caracterização do clima no século XX no Brasil, avaliaram as tendências lineares das temperaturas médias e apontaram um acréscimo de temperatura da ordem de 0,3 °C/década a 0,4 °C/década em média no Brasil, contemplando a região do Nordeste, indicando um aumento entre 1,2 °C e 1,6 °C em 40 anos. Medeiros et al. (2019) estudaram a variabilidade e tendências para a temperatura média do ar no Sertão da Paraíba. Fazendo uso de dados históricos, foi desenvolvido um modelo de estimativa de tendências, chegando ao resultado de que para essa região haverá acréscimo de entre 0,008 °C/ano e 0,011 °C/ano na temperatura média do ar. O que, em 2040, pode representar um aumento da ordem de 0,2 °C a 0,3 °C. Abrahão et al. (2017) analisaram o comportamento da temperatura da mesorregião Sertão Paraibano, por meio de dados meteorológicos ao longo de 40 anos, entre 1975 e 2015, de estações em duas cidades, Patos e Sousa. Utilizando os testes Mann-Kendall e declividade de Sen, verificaram que em Patos houve um acréscimo na temperatura da ordem de 0,038 °C/ano, enquanto Sousa apresentou acréscimo de temperatura de 0,078 °C/ano e 0,030 °C/ano nos dois semestres do ano, porém não apresentou aumento significativo no ano inteiro.

Seguindo a mesma abordagem de Abrahão et al. (2017), os autores Medeiros et al. (2021) constataram que houve um aumento de 0,010 °C/ano na temperatura média do ar em todos os locais estudados no estado da Paraíba (Água Branca, Aguiar, Coremas, Princesa Isabel, Teixeira, São Gonçalo e Patos). Além disso, os autores também apresentaram que a produção de eletricidade fotovoltaica anual verificada nos dez primeiros anos da série (de 1950 a 2016) foi maior se comparada ao restante do período e explicam que isso era esperado, uma vez que com o aumento anual da temperatura do ar tem influência direta na eficiência dos painéis fotovoltaicos (Schaeffer et al., 2012).

Ainda sobre a região semiárida brasileira, Velloso et al. (2019) estudaram o potencial de geração de energia em um sistema híbrido combinando recursos hídricos e fotovoltaicos. Eles verificaram o potencial de geração de energia quando combinado módulos fotovoltaicos na hidroelétrica de Sobradinho, no Nordeste Brasileiro. Os autores verificaram que a produção de energia poderia ser estimada em um total de 8.350 GWh entre os anos de 2015 e 2018 e que, além da energia produzida, o sistema híbrido contribuiria significativamente para a redução de emissões de gases do efeito estufa, uma vez que os painéis fotovoltaicos substituiriam termoelétricas a carvão, óleo, diesel e gás natural. O estudo mostrou que em torno de 138.188 103 tCO<sub>2</sub> seriam evitados durante os três anos com a implementação do sistema híbrido, sendo que desse montante a redução seria de 27% em termoelétricas a carvão, 27% a óleo, 26% a diesel e 20% a gás natural.

O Quadro 1 apresenta uma compilação dos dados de alguns dos trabalhos discutidos anteriormente, para fácil comparação.

**Tabela 1.** Dados compilados dos artigos analisados.

Autores	Expectativa na produção de energia	Expectativa na variação da temperatura	Região	Período	Modelo Climático	Escopo Espacial
Fant <i>et al.</i> (2015)	Inalterado	n/a	África do Sul	-2050	IGSM, CMIP-3	País
Andrade <i>et al.</i> (2021)	Inalterado	n/a	Nordeste brasileiro	1970-1980, 2004-2014	n/a	Região
Crook <i>et al.</i> (2011)	Aumento	n/a	*	2010-2080	HadGEM1	País
Jerez <i>et al.</i> (2015)	Diminuição	n/a	Espanha	1970-1999, 2070-2099	n/a	País
Wild <i>et al.</i> (2015)	Diminuição	+ 0,05°C/ano	*	2006-2049	n/a	País
Hajjaj <i>et al.</i> (2015)	Diminuição	n/a	Marrocos	2017 (Jan. a Dez.)	n/a	País
Bazyomo <i>et al.</i> (2016)	Diminuição	+ 0,08°C/ano	Oeste africano	2006-2100	*	Região
Medeiros <i>et al.</i> (2019)	n/a	+ 0,008°C/ano a 0,011°C/ano	Sertão Paraibano	-2040	<i>Mann-Kendall</i>	Região
Abraão <i>et al.</i> (2017)	n/a	+ 0,038°C/ano (Patos); n/s (Souza)	Sertão Paraibano	1975-2015	<i>Mann-Kendall</i>	Região
Medeiros <i>et al.</i> (2021)	Diminuição	+ 0,010°C/ano	Paraíba	1950-2016	<i>Mann-Kendall, Declive de Sen</i>	Região

n/a não apresentado; n/s não significativo. \* verificar análise individual do estudo para mais detalhes.

Sobre o Quadro 1, vale ressaltar que no estudo apresentado por Bazyomo et al. (2016), a expectativa é de que haja diminuição na produção de energia, com exceção das regiões da Libéria e Serra Leoa. Além disso, alguns trabalhos apresentam diversas regiões e diversos modelos climáticos que foram utilizados, portanto é aconselhável que seja revisado a análise individual de cada trabalho para mais detalhes, apresentado anteriormente.

Conclui-se que a difícil situação das populações que vivem em regiões semiáridas pode ser atenuada pelos resultados de pesquisas científicas e tecnológicas. Experiências de sucesso em outras regiões semiáridas do mundo podem ser estendidas e adaptadas para o nordeste brasileiro, evidenciando que é possível melhorar as condições de vida em situações climáticas adversas, fazendo com que o desenvolvimento socioeconômico ocorra em sintonia com as avançadas tecnologias da atual idade e com a globalização, porém, com ações locais que respondam pelas demandas típicas de cada região, propiciando o desenvolvimento sustentável e atendendo parte considerável da população que atua nos mais diversos setores da economia nestas regiões.

Destaca-se a necessidade de rigorosos estudos do comportamento histórico do clima no local de instalação dos novos parques solares, incluindo a identificação das tendências climáticas. Esta sugestão estende-se a outros tipos de energia renovável que sejam vulneráveis às mudanças climáticas, como por exemplo a eólica – a verificação de tendências climáticas pode ocorrer antes de um estudo de zoneamento para exploração da energia eólica (Vale et al, 2020), por exemplo. A demanda por pesquisas nesse contexto continuará crescente, necessitando de esforços multidisciplinares, com a interação entre as instituições de pesquisa, a fim de definir métodos e estratégias para serem aplicados no semiárido.

#### 4. Conclusão

Após a análise dos artigos apresentados, constatou-se que a produção de energia renovável por fonte fotovoltaica pode ser influenciada por tendências climáticas. O semiárido brasileiro possui boa localização para instalação de usinas solares, já que possui bons níveis de irradiação ao longo do ano. Porém, apresenta tendências climáticas que apontam para elevação da temperatura média do ar, que conforme demonstrado, resulta numa redução na produção fotovoltaica. Ressalta-se a

necessidade de investigação mais profunda de como e onde se darão esses impactos.

A estratégia de incorporar centrais produtoras de energia solar e eólica no semiárido está direcionada a tentar garantir um futuro sustentável, que pode culminar no aumento da renda na região, com a promoção de uma economia socialmente justa e menos vulnerável aos efeitos das secas associada à variabilidade natural do clima e de suas alterações.

Diante do caráter pouco difundido que o tópico estudado possui, percebeu-se produção de literatura científica ainda escassa. No entanto, a demanda por pesquisas nesse contexto continuará crescente, necessitando de esforços multidisciplinares, com a interação entre as instituições de pesquisa, a fim de definir métodos e estratégias para serem aplicados no semiárido brasileiro.

Trabalhos futuros verificarão a vulnerabilidade de sistemas energéticos renováveis, por meio da obtenção de dados climáticos, estimando a produção de eletricidade dessas fontes. Também se desenvolverão Avaliações de Ciclo de Vida, para verificação do impacto ambiental de diferentes tecnologias, e cálculo do *payback* ambiental (em quanto tempo de operação ocorre a compensação das emissões associadas à sua fabricação, implantação, manutenção e uso).

## Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas de produtividade nº 307394/2018-2 e 306783/2018-5, Projeto Universal nº 401687/2016-3, e pelas bolsas de mestrado e iniciação científica.

## Referências

- Abrahão, R., Peixoto, I. M. B. M., Silva, L. P., & Medeiros, S. E. L. (2017). Mais calor para o Sertão? Perspectivas de tendências no índice de calor do Sertão Paraibano. In Congresso Brasileiro de Agrometeorologia (Vol. 20).
- Alcântara, L. R. P., da Silva, M. E. R., dos Santos Neto, S. M., Lafayette, F. B., Coutinho, A. P., Montenegro, S. M. G. L., & Antonino, A. C. D. (2020). Mudanças climáticas e tendências do regime pluviométrico do Recife. *Research, Society and Development*, 9(3), e178932583-e178932583.
- Andrade, A.R., Melo, V.F.M.B., Lucena, D.B., Abrahao, R. (2021) Wind speed trends and the potential of electricity generation at new wind power plants in Northeast Brazil. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*.
- Barboza, E. N., da Rocha Lima, B. M., de Alencar, F. H. H., & da Silva Alencar, G. S. (2020). Análise temporal do regime pluviométrico na cidade de Iguatu-Ceará. *Research, Society and Development*, 9(7), e66973750-e66973750.
- Bazyomo, S. D. Y. B., Agnidé Lawin, E., Coulibaly, O., & Ouedraogo, A. (2016). Forecasted changes in West Africa photovoltaic energy output by 2045. *Climate*, 4(4), 53.
- Busson, B. O., Dias, P. H. F., Dupont, I. M., Campos, P. H. M., Carvalho, P. C., & Barroso, E. A. Q. (2019). Validação de modelos de comportamento térmico de painéis fotovoltaicos para o Semiárido brasileiro. In: Abdala, P. J. P. (Org.). *Energia Solar E Eólica*. 10.22533/at.ed.6671922012 Ponta Grossa (PR): Atena Editora, 2019. – (Energia Solar e Eólica, v. 1).
- Carvalho, M., & Delgado, D. (2017). Potential of photovoltaic solar energy to reduce the carbon footprint of the Brazilian electricity matrix. *LALCA: Revista Latino-Americana em Avaliação do Ciclo de Vida*, 1(1), 64-85.
- Carvalho, M., de Figueiredo, J. N., Cavalcanti, G. C. D. A., Freire, R. S., Machado, L., & Abrahão, R. (2021). Educação ambiental por meio de um app para quantificação de pegada de carbono. *Research, Society and Development*, 10(1), e0710111058-e0710111058.
- Crook, J. A., Jones, L. A., Forster, P. M., & Crook, R. (2011). Climate change impacts on future photovoltaic and concentrated solar power energy output. *Energy & Environmental Science*, 4(9), 3101-3109.
- Fant, C., Schlosser, C. A., & Strzepek, K. (2015). The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. *Applied Energy*, 161, 556-564.
- Farias Neto, J. R., Silva Junior, J. M., Abrahão, R., Carvalho, M. (2018). Como repercutem as mudanças climáticas na produção de energias renováveis? In: Congresso Brasileiro de Gestão Ambiental e Sustentabilidade – Congestas, João Pessoa.

- García-Garizábal, I., Abrahão, R., & Medeiros, S. E. L. (2020). Generación de series climáticas para caracterización termo-pluviométrica del semiárido brasileño (1981-2015). *DYNA*, 87(215), 254-262.
- Hajjaj, C., Merrouni, A. A., Bouaichi, A., Benhmida, M., Sahnoun, S., Ghennioui, A., & Zitouni, H. (2018). Evaluation, comparison and experimental validation of different PV power prediction models under semi-arid climate. *Energy Conversion and Management*, 173, 476-488.
- Holanda, R. M., & Medeiros, R. M. (2020). Comportamento térmico e a contribuição pluvial em Lagoa Seca, Brasil entre 1981-2019. *Research, Society and Development*, 9(7), e695974815-e695974815.
- IPCC. (2007) The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. In: Houghton, J. T. (Ed.). *Climate Change*. Cambridge University Press, 2007.
- Jakhrani, A. Q., Othman, A. K., Rigit, A. R. H., & Samo, S. R. (2011). Determination and comparison of different photovoltaic module temperature models for Kuching, Sarawak. In 2011 IEEE Conference on Clean Energy and Technology (CET) (pp. 231-236). IEEE.
- Jerez, S., Tobin, I., Vautard, R., Montávez, J. P., López-Romero, J. M., Thais, F., & Wild, M. (2015). The impact of climate change on photovoltaic power generation in Europe. *Nature communications*, 6(1), 1-8.
- Martins, F. R., Pereira, E. B., Silva, S. A. B., Abreu, S. L., & Colle, S. (2008). Solar energy scenarios in Brazil, Part one: Resource assessment. *Energy Policy*, 36(8), 2853-2864.
- Medeiros, S. E. L., Abrahão, R., da Silva, L. P., & de Medeiros Silva, W. K. (2019). Comparison between observed and estimated data to assess air temperature variability and trends in the Sertão Paraibano mesoregion (Brazil). *Environmental monitoring and assessment*, 191(2), 63.
- Medeiros, S. E. L., Nilo, P. F., Silva, L. P., Santos, C. A. C., Carvalho, M., & Abrahão, R. (2021). Influence of climatic variability on the electricity generation potential by renewable sources in the Brazilian semi-arid region. *Journal of Arid Environments*, 184, 104331.
- Obregon, G. O., Marengo, J. A. (2007). Caracterização do clima no século XX no Brasil: tendência de chuvas e temperaturas médias e extremas. Relatório nº 2 – Projeto: Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade – subprojeto: Caracterização do clima atual e definição das alterações climáticas para o território brasileiro ao longo do século XX.
- Oliveira, A. S., Pereira, G. A., Rodrigues, A. F., & Neto, J. D. O. M. (2018). Tendências em índices extremos de precipitação e temperatura do ar na cidade de Uberaba, MG. *Sustentare*, 2(1), 118-134.
- Pinho, J. T., Galdino, M. A. (2014). Manual de Engenharia para Sistemas fotovoltaicos. Grupo de Energia solar - GTES - CEPEL - DTE – CRESEB.
- Popovici, C. G., Hudişteanu, S. V., Mateescu, T. D., & Cherecheş, N. C. (2016). Efficiency improvement of photovoltaic panels by using air cooled heat sinks. *Energy Procedia*, 85, 425-432.
- Schaeffer, R., Szklo, A. S., de Lucena, A. F. P., Borba, B. S. M. C., Nogueira, L. P. P., Fleming, F. P., & Boulahya, M. S. (2012). Energy sector vulnerability to climate change: A review. *Energy*, 38(1), 1-12.
- Silva, F. D. F. N., Gomes, A. C. D. S., Lucio, P. S., Araújo, E. H. S., & Silva, C. M. S. (2015). Estudo de caso: temperatura média mensal de regiões do litoral e semiárido do nordeste brasileiro (nota de pesquisa). *Revista Brasileira de Climatologia*, 17(11).
- Siqueira, C. D. (2011). Regime internacional de mudanças climáticas e segurança energética. *Mediações-Revista de Ciências Sociais*, 16(2), 210-227.
- Skoplaki, E., & Palyvos, J. A. (2009). On the temperature dependence of photovoltaic module electrical performance: A review of efficiency/power correlations. *Solar energy*, 83(5), 614-624.
- Vale, D. C., Silva, R. S., Rocha, E. D. J. T., & de Alexandria, A. R. (2020). Zoning for exploration of wind energy in Ceará with the use of geographic information systems (GIS) and multicriteria analysis. *Research, Society and Development*, 9(7), e455973809-e455973809.
- Velloso, M. F. A., Martins, F. R., & Pereira, E. B. (2019). Case study for hybrid power generation combining hydro-and photovoltaic energy resources in the Brazilian semi-arid region. *Clean Technologies and Environmental Policy*, 21(5), 941-952.
- Wild, M., Folini, D., Henschel, F., Fischer, N., & Müller, B. (2015). Projections of long-term changes in solar radiation based on CMIP5 climate models and their influence on energy yields of photovoltaic systems. *Solar Energy*, 116, 12-24.