

Influência das mudanças climáticas na energia eólica: uma revisão bibliográfica

Paula Rose de Araújo Santos¹

Louise Pereira da Silva²

Susane Eterna Leite Medeiros³

Raphael Abrahão⁴

RESUMO

A utilização da energia eólica é uma alternativa para geração de energia por meio de uma fonte limpa. Por outro lado, as energias renováveis são fortemente susceptíveis à variabilidade climática. A velocidade dos ventos pode sofrer alterações em virtude das mudanças no clima. O planejamento energético deve levar em consideração a influência que o cenário climático futuro causará na produção energética renovável. Os modelos climáticos globais (GCMs) e os modelos climáticos regionais (RCMs) levam em conta uma série de parâmetros, como a intensidade e velocidade dos ventos, para projetarem as condições climáticas temporais futuras. A utilização dos resultados de diferentes modelos assegura maior confiabilidade aos dados gerados. O presente trabalho teve o objetivo de realizar uma revisão bibliográfica de trabalhos referentes à utilização de modelos climáticos globais e regionais que simulassem os impactos das mudanças climáticas na energia eólica, publicados em periódicos internacionais. A pesquisa foi realizada nos bancos de dados *Science Direct* e *Web of Science* – Coleção Principal (*Clarivate Analytics*) –, empregando-se um conjunto de palavras-chave predeterminadas. Com base nos resultados foi possível compreender como a geração energética renovável por meio dos ventos será afetada diante das mudanças climáticas.

Termos para indexação: cenários climáticos, fontes renováveis, modelos climáticos, produção energética.

Influence of climate change on wind energy: a bibliographic review

ABSTRACT

The use of wind energy is an alternative for generating energy from a clean source. On the other hand, renewable energies are highly susceptible to climate variability. Wind speeds may change due to changes in weather. Energy planning must take into account the influence that the future climate scenario will have on renewable energy production. Global climate models (GCMs) and regional climate models (RCMs) take into account a series of parameters, such as the intensity and speed of winds, to project future temporal climate conditions. The use of results from different models ensures greater reliability to the data generated. The present work aimed to carry out a bibliographic review of works related to the use of global and regional climate models that simulate the impacts of climate change on wind energy, published in international journals. The research was

¹ Engenheira ambiental, mestre em Energias Renováveis, João Pessoa, PB. E-mail: paularose@cear.ufpb.br

² Engenheira de energias renováveis, doutoranda em Engenharia Mecânica, João Pessoa, PB. E-mail: louise.silva@cear.ufpb.br

³ Bacharel em Física Computacional, doutora em Física, João Pessoa, PB. E-mail: susane.eterna@cear.ufpb.br

⁴ Engenheiro agrícola, doutor em Engenharia Química e Ambiental, professor do Departamento de Engenharia de Energias Renováveis, da Universidade Federal da Paraíba (UFPB), João Pessoa, PB. E-mail: raphael@cear.ufpb.br

Ideias centrais

- As projeções de modelos climáticos são fundamentais para evidenciar cenários do clima futuro.
- O emprego de um conjunto de modelos climáticos é fundamental para conferir confiabilidade aos dados gerados.
- Os dados de projeções climáticas para a produção energética eólica em uma região podem variar de acordo com o modelo climático aplicado.
- A velocidade e a densidade dos ventos podem sofrer influência das mudanças climáticas.

Recebido em
18/05/2022

Aprovado em
05/12/2022

Publicado em
16/03/2023



This article is published in Open Access under the Creative Commons Attribution licence, which allows use, distribution, and reproduction in any medium, without restrictions, as long as the original work is correctly cited.

carried out in the Science Direct and Web of Science – Main Collection (Clarivate Analytics) – databases, using a set of pre-determined keywords. Based on the results, it was possible to understand how renewable energy generation through wind will be affected by climate change.

Index terms: climate scenarios, renewable sources, climate models, energy production.

INTRODUÇÃO

As mudanças climáticas são percebidas em virtude de modificações nas características climáticas por um longo período (décadas ou mais) e podem ocorrer em razão de processos naturais e antropogênicos (IPCC, 2014). O relatório do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) publicado em 2019 destacou o aumento da temperatura terrestre e ressaltou o crescimento da frequência das secas na Amazônia, na região Nordeste do Brasil, na costa leste dos Estados Unidos, na Patagônia, em grande parte da África, em regiões do Mediterrâneo e no nordeste da China (Jia et al., 2019).

As mudanças climáticas geram alterações nos padrões climáticos, como na temperatura do ar, no regime de chuvas (Marengo & Bernasconi, 2015; Matthew & Ohunakin, 2017; Woo et al., 2018), na velocidade dos ventos, na radiação e em outros parâmetros (Lizuma et al., 2013; Koletsis et al., 2016; Bartók et al., 2017; de Jong et al., 2019). Como consequência, podem ser afetados a saúde humana, a economia, a produção alimentar, o abastecimento de água, entre outras atividades humanas (Review..., 2015).

Apesar de ser afetada diretamente pelas mudanças no clima, a utilização das fontes renováveis para a produção energética é uma forma de mitigar os impactos climáticos (Burnett et al., 2014; Review..., 2015). A energia eólica, por exemplo, já é amplamente utilizada para geração de energia; contudo, a variabilidade no clima pode alterar o potencial eólico, causando incertezas na produção energética (Ravestein et al., 2018).

Os modelos climáticos globais (GCMs) e os modelos climáticos regionais (RCMs) são ferramentas utilizadas para simular as condições climáticas. Os modelos são capazes de simular a temperatura, a velocidade dos ventos, a precipitação e outros parâmetros climáticos para diferentes áreas do planeta e diferentes períodos temporais (Pašičko et al., 2012; Queiroz et al., 2016). O primeiro modelo de circulação geral foi desenvolvido no Laboratório de Dinâmica dos Fluidos Geofísicos da NOAA, em Princeton, Estados Unidos, no final da década de 1960. O modelo combinava os processos oceânicos e atmosféricos e foi capaz de prever como fatores climáticos naturais influenciavam as mudanças climáticas (NOAA, 2017).

Diante do exposto, percebe-se a necessidade e importância de entender o comportamento climático aplicando distintas perspectivas a fim de realizar um planejamento energético eficaz para a utilização das energias solar e eólica (Queiroz et al., 2016). Este trabalho apresenta uma sequência de estudos em que foram aplicados modelos climáticos globais e/ou regionais para entender os impactos gerados pelas mudanças climáticas na energia eólica. O propósito foi entender como as alterações climáticas podem afetar a geração de energia gerada por essa fonte renovável e a importância de conhecer o cenário energético renovável futuro para a adequada utilização dessa fonte.

METODOLOGIA

A pesquisa foi realizada utilizando o banco de dados *Web of Science* – Coleção Principal (Clarivate Analytics, 2022) – e *Science Direct* (Elsevier, 2022). Empregou-se uma sequência de palavras-chaves, que foram: “renewable energy”, “climate model”, “climate change”, “solar energy” e “wind energy”. Optou-se por acrescentar a palavra-chave “wind energy” pelo fato de muitos

trabalhos discutirem tanto a energia solar quanto a energia eólica. Como a pesquisa tinha por objetivo que todas as palavras-chave ocorressem de forma simultânea, utilizou-se o conectivo “and”.

Inicialmente, utilizou-se o banco de dados *Science Direct* (Elsevier, 2022), em que foram encontrados 255 resultados, e, ao filtrar-se apenas por artigos publicados em periódicos, restaram 166 artigos. Para o *Web of Science – Coleção Principal* (Clarivate Analytics, 2022) –, 5 resultados foram apresentados. Em seguida, filtraram-se os publicados em periódicos, tendo restado 4 artigos.

Em seguida, mais uma busca foi realizada, dessa vez, excluindo-se a palavra-chave “solar energy”. Nesse caso, para o *Science Direct* (Elsevier, 2022) foram obtidos 350 artigos e, para o *Web of Science – Coleção Principal* (Clarivate Analytics, 2022) –, foram encontrados 45 resultados.

A seleção de artigos foi realizada lendo os títulos e, em seguida, os resumos a fim de escolher apenas os trabalhos que tivessem relação com o objetivo do presente artigo. A pesquisa foi realizada para o período de janeiro de 1995 a dezembro de 2021, tendo resultado em 44 artigos dentro da temática pretendida.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Estudos que abordaram o potencial solar e eólico

Tendo em vista o objetivo do trabalho, discutiram-se apenas os resultados referentes à energia eólica. Na Tabela 1 podem ser observados os artigos que discutiram a respeito do potencial solar e eólico e quais os modelos aplicados para realizar as projeções climáticas.

Tabela 1. Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões no continente europeu.

| Autor(es) | Modelo | Local |
|-------------------------|---|--|
| Ravestein et al. (2018) | EC-EARTH | Atlântico Norte e Europa |
| Schlott et al. (2018) | Três membros do conjunto do projeto EURO-CORDEX | Europa |
| Wachsmuth et al. (2013) | Modelos climáticos regionais CLM e REMO | Região metropolitana do noroeste da Alemanha |
| Pašičko et al. (2012) | GCM: ECHAM5-MPIDM RCM: RegCM | Croácia |

Ravestein et al. (2018) e Wachsmuth et al. (2013) avaliaram a situação futura das energias eólica e solar, sendo o primeiro para o Atlântico Norte e a Europa, e o segundo para o noroeste da Alemanha em virtude das mudanças climáticas.

Ravestein et al. (2018) encontraram que as mudanças no clima poderão causar influência negativa na produção de energia eólica; entretanto, a Oscilação do Atlântico Norte (NAO) pode evitar que as interferências sejam significativas. Os resultados ainda indicaram que as mudanças climáticas afetarão os rendimentos potenciais de energia eólica em todas as regiões estudadas.

Os resultados de Wachsmuth et al. (2013) para o noroeste da Alemanha, nos períodos de 2036–2065 e 2071–2100, indicaram o aumento da velocidade dos ventos no inverno e a redução no verão. Os autores descreveram que a geração de energia eólica atingirá o pico no outono de 2050, e de forma mais significativa no inverno, no final do século XXI em virtude da elevação da velocidade dos ventos nesse período. Observa-se que Moemken et al. (2018) identificaram um aumento do potencial eólico em parte da Alemanha no inverno para o período de 2071–2100.

Schlott et al. (2018) avaliaram o comportamento solar, eólico e hídrico para a Europa e as consequências energéticas para os custos. Pašičko et al. (2012) investigaram como se comportará a produção energética por meio das fontes solar, eólica e hidrelétrica diante das mudanças climáticas na Croácia. Os resultados encontrados por Schlott et al. (2018) demonstraram que o potencial eólico ao sul da Europa terá um comportamento eólico mais favorável até o final do século XXI.

De acordo com os resultados projetados por Pašičko et al. (2012) na Croácia para os períodos de 2011–2040 e 2041–2070, os autores evidenciaram o aumento na velocidade média do vento e, com isso, o provável aumento da produção energética a partir das usinas eólicas. O aumento da velocidade média dos ventos será consideravelmente maior no período de 2041–2070 quando comparado com o período de 2011–2040, sendo esse aumento de 35% a 60% na área costeira, e na região continental da Croácia o aumento será de aproximadamente 5%.

Os trabalhos apresentados na Tabela 2 referem-se à aplicação dos modelos climáticos no potencial solar e eólico em algumas regiões no continente americano.

Tabela 2. Modelos climáticos utilizados para estudar o comportamento do potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas áreas no continente americano.

| Autor(es) | Modelo | Local |
|-------------------------|---|------------------|
| Wang et al. (2020) | PRECIS | Ontário, Canadá |
| Viviescas et al. (2019) | MIROC-ESM-CHEM e HadGEM2-ES | América Latina |
| de Jong et al. (2019) | HADGEM2-ES, MIROC5, CANESM2. RCM: Eta | Brasil |
| Angeles et al. (2010) | Modelo climático paralelo (PCM) e o modelo numérico do sistema de modelagem atmosférica regional (RAMS) | Região do Caribe |

Em seu trabalho, Wang et al. (2020), com base no PRECIS, evidenciaram que é prevista a redução da densidade eólica para os cenários RCP4.5 e RCP8.5 na costa dos Grandes Lagos. Por sua vez, na Baía de Hudson espera-se um aumento futuro na densidade de energia eólica *onshore* e *offshore*.

Para a América Latina, Viviescas et al. (2019) projetaram que as regiões próximas ao Caribe, Venezuela, Suriname, Colômbia e Brasil apresentaram as maiores tendências para maior velocidade dos ventos a partir de 2040, sendo mais elevados sob o RCP8.5.

O potencial eólico e solar foi analisado por de Jong et al. (2019) no Brasil e por Angeles et al. (2010) na região do Caribe. Os estudos de de Jong et al. (2019) concentraram-se no período de 2070–2099. Os autores observaram que a energia eólica, nos estados da Bahia e Maranhão, localizados no Nordeste do País, poderão apresentar aumento de, respectivamente, 19% e 33% na velocidade do vento para o modelo CANESM2/Eta. A partir do HADGEM2/Eta, na década de 2080, a velocidade do vento terá tido aumento de, em média, 9,4% na maior parte da região Nordeste ao se comparar com a década de 2070.

Angeles et al. (2010) empregaram o modelo PCM acoplado ao modelo numérico RAMS e, com base nas projeções realizadas para a velocidade do vento, haverá um aumento sobre a região do Caribe, sendo de 4,84 ms⁻¹ para a velocidade mínima. O período de 2070–2098 demonstrou uma elevação dos ventos do leste ao redor da costa, tendo uma intensidade eólica maior.

A pesquisa evidenciou que os trabalhos publicados a respeito do potencial eólico e solar no continente africano (Tabela 3) apresentam-se em menor número quando comparados aos do continente europeu e americano.

Tabela 3. Modelos climáticos utilizados para estudar o comportamento do potencial solar e eólico diante das mudanças climáticas em algumas áreas no continente africano.

| Autor(es) | Modelo | Local |
|------------------------|---|---------------|
| Sawadogo et al. (2020) | RegCM4 | África |
| Fant et al. (2016) | Modelo Global Integrado de Sistemas (IGSM) e 8 GCMs disponíveis da fase 3 do Projeto de Intercomparação do Modelo Acoplado (CMIP) | África do Sul |

Para o período de 2020–2040 e 2041–2060, Sawadogo et al. (2020) projetaram o aumento do potencial de energia fotovoltaica na África Ocidental, Central e na parte oriental da África Austral. Os resultados para o potencial eólico mostraram que as regiões onde a intensidade do vento já é forte terão melhor potencial, como, por exemplo, o noroeste da África e o Chifre da África. O potencial positivo dos ventos também foi projetado para a África Austral, onde se observou o aumento na densidade de energia eólica.

Fant et al. (2016) concentraram-se em projetar dados para a energia eólica e solar para a África do Sul. Os dados sugeriram que os potenciais eólico e solar apresentarão mudanças sucintas futuras até 2050. Na maior parte, as mudanças para velocidade do vento são baixas na África Austral, com redução nas regiões costeiras da África do Sul, no período de junho a agosto, e aumentos pequenos para Botsuana.

Por fim, o artigo de Zhang et al. (2018) investigou os recursos eólicos e solares no mundo em 2016–2045, 2046–2065 e 2066–2099, comparados aos do período de 1985–2005. As projeções para o período de 2016–2045 sob o RCP2.6 indicaram que o recurso eólico aumentará na América do Sul e África Central. Todavia, os autores projetaram uma redução na América do Norte, Austrália e norte da Ásia. Sob o RCP8.5, os resultados sugeriram o aumento na América do Sul, América do Norte Central e África Central. Por sua vez, o recurso eólico poderá sofrer uma diminuição no norte da Ásia e no nordeste da Austrália.

As projeções de Zhang et al. (2018) para o período de 2046–2065 sob o RCP2.6 mostraram um provável aumento do potencial na maior parte do mundo, com exceção do norte da Ásia. Nessa mesma região, uma redução também foi observada sob o RCP8.5. Os autores projetaram que, sob o RCP2.6, o recurso eólico diminuirá na maior parte do globo, com exceção da América do Sul, África Central e Meridional e Sudeste Asiático. Por sua vez, sob o RCP8.5, os recursos eólicos poderão aumentar na América do Sul, na maior parte da África e no sul da América do Norte, mas diminuirão no centro e norte da Ásia e na América do Norte Central.

Resultados que discutiram o potencial eólico

Com base nas pesquisas, observou-se que o continente europeu apresentou o maior número de artigos publicados tendo em vista os impactos das mudanças climáticas no potencial eólico, aplicando modelagem climática (Tabela 4).

Tabela 4. Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico em algumas regiões no continente europeu.

| Autor(es) | Modelo | Local |
|---------------------------------|---|---|
| Lira-Loarca et al. (2021) | Nove modelos do EURO-CORDEX | Mar Mediterrâneo |
| Rusu (2020) | RCA4 | Costa do Mar Báltico |
| Solaun & Cerdá (2020) | 3 modelos climáticos do EURO-CORDEX | Quatro parques eólicos na Espanha |
| Rusu (2019) | RCA4 | Costa do Mar Negro |
| Davy et al. (2018) | RCA4 | Europa com foco no Mar Negro |
| Moemken et al. (2018) | GCMs: CNRM-CM5, EC-EARTH, HadGEM2-ES, MPI-ESM-LR e IPSL-CM5A-MR. RCM: COSMO-CLM e RCA4 | Europa |
| Santos et al. (2018) | Modelos regionais CORDEX | Península Ibérica (Espanha e Portugal) |
| Weber et al. (2018) | CNRM_CM5 EC_EARTH IPSL_CM5A_MR MPI_ESM_LR HadGEM2_ES do EURO-CORDEX e o RCM RCA4 | Europa |
| Hdidouan & Staffell (2017) | ESM2G | Reino Unido |
| Soares et al. (2017) | Conjunto de modelos do experimento CORDEX e o WRF | Península Ibérica |
| Koletsis et al. (2016) | GCMs: Bergen Climate Model (BCM), ECHAM5/MPI e o HadCM3Q16 RCMs: KNMI-RACMO2 e o HIRHAM5 | Áreas marítimas do Mar Mediterrâneo e uma grande parte do Mar Negro |
| Gonçalves-Ageitos et al. (2015) | Modelo Regional de Clima (WRF) | Algumas regiões na Europa |
| Lizuma et al. (2013) | RCM: CLM Modelo de Área Limitada de Alta Resolução (Hirlam) | Mar Báltico, próximo à Costa Letã |
| Barstad et al. (2012) | Modelo Arpege | Norte da Europa |
| Pryor et al. (2006) | HadCM3 | Europa |
| Pryor et al. (2005) | ECHAM4/OPYC3 HadAM3H | Norte da Europa |

O comportamento eólico diante das mudanças climáticas foi avaliado por Moemken et al. (2018), Weber et al. (2018), Monforti et al. (2016), Gonçalves-Ageitos et al. (2015) e Pryor et al. (2006) para toda a Europa; e por Barstad et al. (2012) e Pryor et al. (2005) para o norte europeu.

Os resultados apresentados por Moemken et al. (2018) para o conjunto RCA4 indicaram que haverá um decréscimo para a saída de energia eólica no cenário RCP4.5 durante o período de 2021–2050 para a Escandinávia e Península Ibérica e um aumento da energia eólica para o Mar Báltico e parte do Mar Egeu. Destaca-se situação positiva para o Mar Báltico e Egeu em todos os CGMs. O conjunto RCA4 ainda apontou um aumento do potencial eólico para o Atlântico Norte, Europa Central (incluindo França, partes da Alemanha e Polônia) e partes da Escandinávia e região báltica durante o inverno de 2071–2100. Por outro lado, os resultados para Ilhas Britânicas, Sul da Europa e parte da Escandinávia apontam uma diminuição de 66% do potencial eólico para o RCP4.5 e de 75% para o RCP8.5. A utilização de diferentes modelos climáticos por Moemken et al.

(2018) apontou resultados distintos em algumas situações. O MPI-ESM-LR apresentou um aumento significativo para a energia eólica (até 10%) para a Europa Central e Oriental, enquanto EC-EARTH e HadGEM2-ES mostraram um decréscimo para as mesmas regiões. Já as simulações geradas pelos modelos CNRM-CM5, MPIESM-LR e IPSL-CM5A-MR descrevem o aumento do potencial eólico para a Europa Central e Ocidental, e, por sua vez, a projeção realizada com HadGEM2-ES aponta diminuição de 20% para todo o continente.

Weber et al. (2018) utilizaram um conjunto com cinco modelos climáticos globais do EURO-CORDEX e o modelo climático regional RCA4 para projetar as condições de geração de energia eólica para o período de 2070–2100 na Europa. Os autores observaram que poderá haver uma redução da velocidade dos ventos, que estava entre 3 m/s e 12 m/s, para abaixo de 3 m/s na Europa Continental, trazendo a possibilidade de as turbinas eólicas ficarem ociosas. Reduções também poderão ocorrer no Oceano Atlântico e Mar Mediterrâneo, o que pode gerar impactos futuros em parques eólicos *offshore*. Na Suécia, Finlândia e Estônia, os autores sugeriram que há a probabilidade de a geração de energia eólica ser baixa. Resultados complementares foram encontrados para o Mar Báltico, Mar Egeu e o Estreito de Gibraltar, os quais poderão ser locais favoráveis para a instalação de parques eólicos *offshore*.

Os estudos de Monforti et al. (2016) indicaram que a densidade eólica se mantém estável na Europa continental no período de 1961–2050, tendência contrária ao que ocorre no Mar Mediterrâneo e no Mar do Norte, os quais demonstraram uma diminuição. Além disso, projetou-se um aumento para o Mar Báltico e Ilhas Britânicas. No geral, os autores sugeriram que o impacto das mudanças climáticas na energia eólica não é significativo.

Lizuma et al. (2013) demonstraram resultados para o potencial eólico para o Mar Báltico próximo à Costa Letã. Os autores perceberam que os resultados para a velocidade do vento são mais baixos para 2071–2100 do que para o período de 2021–2050 e que houve uma leve diferença quando comparados aos do período histórico de 1981–2010. Apontou-se que a resposta para o final do século XXI será de pequenas mudanças no potencial energético dos ventos, entre 2% e 4%. O aumento se dará nos territórios *offshore*, entre 1% e 2%, e haverá redução de menos de 1% para as áreas costeiras.

Em seu estudo, Rusu (2020), baseado no modelo RCA4, projetou que, para 2021–2050, haverá um pequeno aumento da energia eólica nos pontos estudados no Mar Báltico, sendo mais favorável no inverno, enquanto uma redução foi notada no verão. De acordo com os autores, os parques eólicos alemães EnBW Baltic 1 e EnBW Baltic 2 e o dinamarquês Anholt apresentaram valores de potência eólica média mais elevados.

Lizuma et al. (2013), Monforti et al. (2016), Moemken et al. (2018), Weber et al. (2018) e Rusu (2020) projetaram um cenário eólico futuro positivo para o Mar Báltico, e destaca-se que Moemken et al. (2018) e Weber et al. (2018) utilizaram alguns modelos climáticos comuns.

Em estudo específico, Gonçalves-Ageitos et al. (2015) observaram uma diminuição na velocidade média dos ventos na costa da Cordilheira do Sul do Mediterrâneo (os Pireneus e o Sistema Ibérico) para o cenário A2 (cenário de altas emissões) durante o período de 2031–2050. Notaram que essa diminuição da velocidade média dos ventos poderá afetar as áreas onde estão localizados os parques eólicos. As simulações geradas pelo WRF-EH1 A2 e WRF-EH3 A2 indicaram redução na densidade da energia eólica, e essas mudanças podem causar variações nas regiões com potencial para a construção de moinhos eólicos.

Em seu estudo, Pryor et al. (2006) projetaram o aumento do potencial eólico para os países europeus com o modelo HadCM3 e identificaram que os dados do ECMWF indicaram que a Dinamarca terá um potencial eólico coeso para a produção de energia eólica futura. Por sua vez, os dados do NCEP/NCAR apontaram uma menor variabilidade interanual para a Islândia.

As simulações realizadas por Barstad et al. (2012) para o período de 2020–2049 demonstraram que o potencial eólico sofrerá uma redução na maior parte do norte da Europa, incluindo o

Mediterrâneo. Por sua vez, no oceano Atlântico Norte, numa pequena região na costa oeste da Noruega e no sudeste da Península Ibérica, haverá um aumento no potencial eólico.

Pryor et al. (2005) identificaram que, para o ECHAM4/OPYC3, haverá um pequeno aumento no potencial eólico para o período de 2071–2100. Todavia, para o modelo HadAM3H, os resultados apontaram diminuição ou nenhuma variação durante o mesmo período. Os autores sugeriram que há incertezas sobre a densidade energética e a velocidade do vento para o norte europeu.

Nos resultados para as Ilhas Britânicas, há uma discordância entre Monforti et al. (2016) e Moemken et al. (2018). Enquanto os primeiros encontraram um aumento do potencial eólico para as Ilhas Britânicas para o período de 1961–2050, os segundos identificaram uma diminuição do potencial eólico para essas mesmas ilhas – nesse caso, para o conjunto de modelos do RCA4 no período de 2071–2100.

Para o norte europeu, Pryor et al. (2005, 2006), ao utilizarem o modelo ECHAM4/OPYC3, concordaram quanto ao aumento da capacidade eólica. No entanto, ao utilizarem o modelo HadAM3, Pryor et al. (2005) encontraram um decréscimo para o potencial eólico, resultado também observado por Barstad et al. (2012) e por Moemken et al. (2018). No caso de Moemken et al. (2018), a redução observada é de até 1,2 m/s para o período de 2006–2100.

Santos et al. (2015, 2018) e Soares et al. (2017) analisaram o potencial eólico diante das mudanças climáticas para a Península Ibérica. O comportamento eólico para os períodos de 2019–2045, 2046–2072 e 2073–2099 foi avaliado por Santos et al. (2018), que identificaram uma diminuição na velocidade e na potência dos ventos para a Península Ibérica, Baleares e Costa, tanto para o Ocidente quanto para o Oceano Atlântico. No entanto, algumas regiões, como Galiza, a costa atlântica da Galiza e Norte de Portugal, o Vale do Ebro, o Vale do Douro superior, o Vale do Guadalquivir, o Estreito de Gibraltar e o Cabo Gata, terão um aumento no potencial e na velocidade dos ventos. Esse cenário positivo será maior no verão, com exceção do Estreito de Gibraltar, que apresentará esse cenário durante todo o ano. Destaca-se que esse comportamento eólico se intensifica a cada período. Com base nos resultados analisados, Santos et al. (2018) evidenciaram que poderá ocorrer o aumento do potencial eólico em 2019–2045 no Vale do Ebro e no Estreito de Gibraltar. Os autores indicaram que, para o período de 2073–2099, a região da Galiza e sua costa atlântica, o Vale do Guadalquivir e o Cabo Gata demonstraram pontos crescentes para o potencial eólico, e o Estreito de Gibraltar terá um aumento maior do que 25%, todavia, algumas áreas apresentarão redução de mais de 20%.

As análises para o período de 2071–2100 realizadas por Soares et al. (2017) indicaram que, no cenário RCP4.5, as velocidades anuais do vento se manterão quase inalteradas, todavia, apresentarão uma leve redução, entre 2,5% e 5%, na parte ocidental do domínio e em áreas localizadas ao longo da costa sul de Portugal. Além disso, a velocidade dos ventos marítimos se manterá igual no inverno e na primavera, sofrerá uma queda no outono, mas apresentará um aumento superior a 5% na costa noroeste para o verão. Para o cenário RCP8.5, a velocidade média do vento diminuirá entre 2,5% e 5%, principalmente no sudoeste da Península Ibérica, segundo o WRF 9 km. Ao empregarem o modelo WRF 9 km, o ENS_F e o ENS_S, os autores projetaram uma redução na densidade eólica na costa, podendo chegar a 10%, e acima de 5% nas áreas marítimas. Os três modelos empregados também indicaram velocidades inalteradas para o noroeste da Península.

Os resultados encontrados por Santos et al. (2015) para o período de 2071–2100 mostraram uma diminuição do potencial eólico na maior parte da Península Ibérica, sendo as reduções mais significativas encontradas no inverno e na primavera. Foi observada diminuição no norte da Galiza, na faixa norte da Península Ibérica e no Vale do Ebro durante o inverno. O norte da Galiza também apresentou diminuição do potencial eólico no outono, e houve decréscimo mais acentuado no noroeste da Península, no norte da Galiza, em Burgos e no oeste na primavera. Por outro lado, a região sul da Andaluzia e Estreito de Gibraltar apresentaram um significativo aumento da capacidade eólica no cenário futuro. No verão, os resultados são positivos para Bochorno e Cierzo (Vale do Ebro), Galelo (Vale do Douro) e Solano (Albacete), e o Vale do Ebro também apresentou tendências positivas para a primavera. Por fim, os resultados para o sul da Andaluzia são otimistas para o inverno, verão e outono.

Resultados negativos para o potencial eólico na Península Ibérica foram encontrados por Moemken et al. (2018) e Santos et al. (2018) para todos os períodos; por Soares et al. (2017) para a parte ocidental e sudoeste da Península; e por Santos et al. (2015) para o noroeste da Península. Esses resultados são distintos dos indicados por Soares et al. (2017), os quais identificaram um cenário inalterado para o noroeste da Península nos três modelos climáticos utilizados e um aumento para a costa. Destaca-se que os autores citados utilizaram modelos climáticos diferentes. Por fim, Barstad et al. (2012), diferentemente dos outros autores, encontraram um potencial positivo para a Península Ibérica.

O estudo de Lira-Loarca et al. (2021) projetou dados a respeito da energia eólica e das ondas para o Mar Mediterrâneo para os períodos de 2030–2060 e 2070–2100, comparados ao período de 1979–2020 sob o RCP8.5. Segundo os autores, aumentos foram projetados para boa parte do Mar Mediterrâneo – por exemplo, no sudoeste (2030–2060) e centro (2070–2100) e um menor aumento na Líbia. Além disso, as regiões do Golfo de Leão, Mar de Alborão e Mar Egeu demonstraram serem regiões com futuro potencial para a produção de energia eólica. Por sua vez, reduções foram observadas no leste do Mediterrâneo para o final do século XXI.

Projeções realizadas por Solaun & Cerdá (2020), em quatro parques eólicos na Espanha, para os períodos de 2018–2041 e 2042–2065 indicaram declínio do potencial eólico para os parques eólicos de Cuadramón (localizado na Galícia) e Rubió (localizado na Catalunha) em todos os cenários e períodos temporais, se intensificando no futuro mais distante. No caso do parque eólico de Río Almodóvar (localizado em Andaluzia), os autores evidenciaram um possível aumento futuro para a velocidade dos ventos. Por fim, os autores Solaun & Cerdá (2020) mostraram que, para o parque eólico de El Pérdon (localizado em Navarre), os resultados apresentaram uma variabilidade a depender do período e cenário considerado.

Rusu (2019) analisou a Costa do Mar Negro, Davy et al. (2018) avaliaram a Europa com foco no Mar Negro, e Koletsis et al. (2016) estudaram as áreas marítimas do Mar Mediterrâneo e uma grande parte do Mar Negro para a energia eólica. Rusu (2019) identificou que, para o período de 2021–2050, tanto para o cenário RCP4.5 quanto para o cenário RCP8.5, o noroeste do Mar Negro apresenta um melhor potencial futuro, e o lado ocidental da costa do Mar Negro terá a máxima energia eólica. Ambos os cenários apontaram que a localização costeira com a máxima energia eólica será movida para o lado ocidental do Mar Negro.

Os resultados de Davy et al. (2018) para os períodos de 2021–2050 e 2061–2090 indicaram que haverá uma redução na densidade de energia eólica no Mar de Azov para ambos os períodos no cenário RCP8.5. No cenário RCP4.5, não haverá mudanças significativas para os mesmos períodos temporais. Para o noroeste do Mar Negro, não foram encontradas mudanças significativas nem para a densidade eólica nem para a energia eólica extraível (EWP – sigla em inglês) em nenhum dos cenários; por outro lado, no sudeste do Mar Negro, encontraram uma redução na EWP no período de 2061–2090 para o RCP8.5. Segundo Davy et al. (2018), a energia eólica pode ser um recurso viável para os países do norte e oeste do Mar Negro, como a Ucrânia e a Rússia.

As simulações realizadas por Koletsis et al. (2016) para o período de 2021–2050 indicaram um aumento da velocidade do vento no Mar Egeu, no sudeste do Mar Negro e no oeste da beiramar do Estreito de Gibraltar. O modelo HadCM3Q16/RCA3 para o período de 2061–2090 projetou elevação na velocidade do vento para o leste do Mediterrâneo, o Mar de Alborão, a parte leste do Mar Negro e, principalmente, sobre o Norte do Mar Egeu. Sobre o Mar Egeu, todos os modelos, com exceção do ECHAM5-r3/HIRHAM5, apresentaram tendência positiva para o potencial eólico. O Estreito de Gibraltar também demonstrou cenário positivo no período de 2061–2090. Por sua vez, no período de 2061–2090, foi observada uma diminuição em grande parte do Mar Mediterrâneo, chegando a ser de 200 W m^{-2} nas projeções do HIRHAM5 para o período de 2021–2050. Observa-se que a utilização de distintos modelos resultou em respostas distintas. Sobre o Mar Egeu, em julho, o modelo ECHAM5-r3/HIR-HAM5 apresentou redução da energia eólica de 100 a 200 W m^{-2} para ambos os períodos futuros; por outro lado, o modelo BCM/HIR-HAM5 indicou um aumento de 300

$W m^{-2}$. Durante o período de 2061–2090, também aconteceram distinções: o modelo ECHAM5-r3/HIRHAM5 indicou uma diminuição de aproximadamente $200 W m^{-2}$, enquanto ECHAM5-r3/RACMO2 e ECHAM5 identificaram elevação de 100 a $200 W m^{-2}$.

Os autores Pryor et al. (2006), Koletsis et al. (2016) e Monforti et al. (2016) concordam sobre a redução do potencial eólico para o Mar Mediterrâneo. No caso de Koletsis et al. (2016), a redução se deu apenas em parte do Mar Mediterrâneo. Por sua vez, Gonçalves-Ageitos et al. (2015) apontaram um aumento para a capacidade eólica no sul do Mediterrâneo para o período de 2031–2050, e Koletsis et al. (2016), para o leste do Mar Mediterrâneo para o modelo HadCM3Q16/RCA3.

Santos et al. (2015, 2018) concordam quanto ao aumento do potencial eólico para o Estreito de Gibraltar, o Vale do Ebro e o Vale do Douro, todavia, para as projeções realizadas na Galiza, Santos et al. (2018) encontraram aumento no potencial eólico para a costa atlântica da Galiza, e Santos et al. (2015) verificaram uma redução da capacidade eólica para o norte da Galiza no inverno, outono e primavera. Ressalta-se que os autores utilizaram modelos climáticos distintos.

Assim como Santos et al. (2015, 2018), Koletsis et al. (2016) e Weber et al. (2018) também apontaram uma tendência positiva para o Estreito de Gibraltar. Koletsis et al. (2016) referem-se à beira-mar do Estreito de Gibraltar.

Koletsis et al. (2016), Moemken et al. (2018) e Weber et al. (2018) identificaram o aumento do potencial eólico futuro para o Mar Egeu, todavia, ao utilizarem o modelo ECHAM5-r3/HIRHAM5, projetaram uma redução.

Koletsis et al. (2016), Davy et al. (2018) e Rusu (2019) indicaram potencial eólico positivo para o Mar Negro. Koletsis et al. (2016) e Davy et al. (2018) apontaram uma capacidade eólica otimista para o sudeste do Mar Negro; todavia, Koletsis et al. (2016) também destacaram o leste do Mar Negro. Por sua vez, Rusu (2019) identificou um potencial eólico para o noroeste do Mar Negro, durante o período de 2021–2050, resultado distinto do apresentado por Davy et al. (2018), que não encontraram uma mudança significativa para a mesma região no período de 2061–2090.

Hdidouan & Staffell (2017) estudaram uma série de impactos que a mudança climática poderá causar na energia eólica, nos custos, na distribuição horária da velocidade dos ventos, entre outros, no Reino Unido no período de 2006-2100. O aumento da velocidade média anual dos ventos será mais intenso para o RCP8.5 e mais fraco para o RCP2.6, sendo o recurso eólico maior no Atlântico Norte e no Norte da Escócia. Redução na velocidade do vento foi identificada no Canal Inglês e no Sul da Inglaterra, para esse caso a diminuição é mais acentuada sob o cenário RCP6.0.

Barstad et al. (2012), Hdidouan & Staffell (2017) e Moemken et al. (2018) concordam com o aumento do potencial eólico para o Atlântico Norte. No caso de Moemken et al. (2018) apenas para o conjunto RCA4, RCP4.5 no período de 2071-2100.

Os resultados de González et al. (2017) para os períodos temporais de 2045–2054 e 2090–2099 indicaram um aumento significativo, cerca de 15%, da energia eólica extraível na costa leste de La Palma, Tenerife, Gran Canaria e Fuerteventura – nesta última, o aumento também ocorrerá na região sul. Por sua vez, em La Palma, El Hierro, La Gomera e Tenerife, foi projetada uma redução. Ocorre que a velocidade do vento terá um cenário favorável para toda a região de Fuerteventura, enquanto os parques eólicos de Lanzarote não sofrerão mudanças significativas. Por fim, as partes norte e sul da ilha serão as mais afetadas. As mudanças mais significativas acontecerão no RCP8.5 para os dois períodos temporais futuros. Espera-se que as reduções mais relevantes se darão na parte central de La Palma, costa norte de La Gomera, costas norte e sudeste de El Hierro, costa de Tenerife, costas norte e sul da Gran Canaria e costa noroeste de Lanzarote e Fuerteventura.

Tabela 5. Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões no continente americano.

| Autor(es) | Modelo | Local |
|--------------------------------|---|--|
| Costoya et al. (2020) | 12 modelos do NACORDEX | Costas oeste e leste dos Estados Unidos |
| Chen (2020) | 12 modelos do NACORDEX | América do Norte |
| Costoya et al. (2019) | RCM: RCA4 e sete GCMs | Caribe |
| Wang et al. (2018) | VR-CESM, MERRA-2, CFSR e NARR | Califórnia |
| Ruffato-Ferreira et al. (2017) | Eta-HadGEM2-ES | Brasil |
| Johnson & Erhardt (2016) | NARCCAP: combinação de GCMs e RCMs. Neste caso: RCM3/GFDL, RCM3/CGCM3, WRFG/CCSM e WRFG/CGCM3 | Estados Unidos |
| Pereira et al. (2013) | Eta-HadCM3 | Brasil |
| Lucena et al. (2010) | HadCM3 | Brasil |
| Sailor et al. (2008) | ECHAM5/MPI-OM, GFDL-CM2.1, GIS- S-ER e MRI-CGCM2.3.2 | Idaho, Montana, Oregon, Washington e Wyoming – Noroeste dos Estados Unidos |

Na Tabela 5 observam-se detalhadamente os modelos climáticos aplicados nas projeções para o potencial eólico em diferentes regiões no continente americano. Johnson & Erhardt (2016) analisaram como a variação climática para os Estados Unidos afetará o potencial eólico para a produção de energia. Os autores utilizaram um conjunto de quatro GCMs/RCMs para realizar as projeções climáticas para os cenários de 2038–2070 para os modelos controlados pelo RCM3, e os de 2038–2069 para os modelos controlados pelo WRFG. Os quatro conjuntos de modelos concordam que haverá uma mudança negativa para velocidade média dos ventos no noroeste, nordeste e ao longo da costa leste dos Estados Unidos, e aumento da densidade eólica no centro-oeste, tendo Wyoming a maior densidade. Kansas, Oklahoma e Texas apresentarão aumento na velocidade do vento e na densidade eólica; neste caso, serão os únicos estados em que a projeção de crescimento da energia eólica chega a mais de 2% para todos os cenários.

O potencial eólico foi analisado por Wang et al. (2018) nos parques eólicos da Califórnia, EUA, por Sailor et al. (2008) no noroeste dos Estados Unidos e por Bogardi & Matyasovszky (1996) em Nebraska, EUA. Os resultados de Wang et al. (2018) para o período de 2030–2050 demonstraram que a velocidade dos ventos será maior no verão e se reduzirá no inverno, sendo essas mudanças significativas sob o RCP8.5. Para o sul da Califórnia, foi projetado aumento dos ventos para os meses de junho, julho e agosto. Nos cinco parques eólicos levados em consideração, observou-se aumento do recurso eólico no verão e redução no outono e inverno, tendo-se gerado redução na produção em todos os parques estudados, exceto em Altamont Pass.

Os resultados gerados por Sailor et al. (2008) para o noroeste dos Estados Unidos, aplicando-se distintos modelos climáticos, geraram resultados divergentes. Os dados obtidos para a estação de Yakima, com os modelos GISS e MPI, mostraram um aumento de 5%–6% na velocidade dos ventos. Por outro lado, nos modelos GFDL e MRI, as projeções indicaram uma redução, sendo de 1% no modelo GFDL e de 4% para o modelo MRI durante o mês de maio sob o cenário AIB. Os resultados para o inverno evidenciaram o provável aumento do potencial eólico, superior a 80%, de novembro a fevereiro, todavia, uma redução de mais de 30% no modelo MPI durante 3 dos 4 meses de inverno.

No geral, o potencial eólico futuro será reduzido em 40% nos meses de primavera e verão. Para o inverno, os resultados são variáveis; ainda assim, parte dos modelos indicaram um maior potencial para energia eólica. Johnson & Erhardt (2016) e Sailor et al. (2008) encontraram uma diminuição do potencial eólico para o noroeste dos Estados Unidos.

Projeções para energia eólica *offshore* nas costas leste e oeste dos Estados Unidos, realizadas por Costoya et al. (2020), projetaram a redução do potencial eólico, sendo mais intenso ao longo da costa leste. Regiões localizadas na parte central de ambas as costas indicaram condições favoráveis para o recurso eólico. Por fim, segundo os autores, as áreas costeiras na parte central da costa oeste não apresentarão mudanças.

Para a América do Norte, Chen (2020) utilizou um conjunto de 12 modelos do NACORDEX para os períodos de 2031–2060 e 2071–2100. O autor projetou que, sob o cenário RCP8.5, a energia eólica poderá sofrer uma redução em parte do oeste e da costa leste dos EUA. Todavia, aumentos foram projetados nas Grandes Planícies na primavera; no Texas e em Oklahoma no verão; e nas Planícies do norte e centro-oeste no inverno e na primavera. A redução do potencial eólico também foi observada por Zhang et al. (2018) na região central da América do Norte.

O comportamento eólico foi estudado por Lucena et al. (2010) e Pereira et al. (2013) para todo o território brasileiro. Lucena et al. (2010) utilizaram o modelo HadCM3 para três períodos futuros (2071–2080, 2081–2090 e 2091–2100) com base nos cenários A2 (cenário de altas emissões) e B2 (cenário de baixas emissões) do IPCC. De acordo com os autores, as projeções para o Brasil indicaram um potencial positivo para geração de energia eólica; além disso, Lucena et al. (2010) destacaram o aumento dos ventos para as regiões Norte e Nordeste e nas áreas costeiras.

Por sua vez, Pereira et al. (2013) identificaram que, para o período de 2071–2100, haverá uma tendência decrescente para a densidade eólica, principalmente ao longo do estado da Bahia; no entanto, esse cenário é distinto do que se encontrou para a área marítima do Norte e Nordeste do País. A região Nordeste terá a maior tendência crescente no outono. Por sua vez, a região Sul terá um crescimento moderado em comparação com a região Nordeste.

De acordo com Costoya et al. (2019), em 2019–2099, no Mar do Caribe, haverá um cenário favorável para a energia eólica. Na estação seca, foram projetados ventos acima de 10 m s^{-1} para as bacias da Colômbia e da Venezuela; todavia, para essa mesma estação, ventos moderados foram simulados para a bacia de Yucatán e uma pequena região da Venezuela. A diminuição dos ventos para a estação citada ocorreu na maior parte do Caribe. No período chuvoso, a única queda no potencial eólico foi observada para a bacia de Yucatán.

O aumento da velocidade do vento encontrado por Angeles et al. (2010) em 2070–2098 combina com o potencial favorável para energia eólica identificado por Costoya et al. (2019) no período de 2019–2099 para o Mar do Caribe.

Ruffato-Ferreira et al. (2017) analisaram o potencial eólico e hidroelétrico no Brasil para os períodos de 2010–2040, 2041–2070 e 2071–2100. Os resultados indicaram que haverá um aumento na velocidade do vento para as regiões Norte, Nordeste e Sul, o que as caracteriza como áreas potenciais para a produção de energia eólica, em todos os cenários avaliados. Sob o RCP4.5, no outono e no verão, e sob o RCP8.5, na primavera e no verão, os cenários mais significativos serão para o potencial eólico. Por sua vez, a região Centro-Oeste, no RCP4.5, e o estado do Amazonas apontaram uma redução na velocidade do vento.

Para o Nordeste brasileiro, os autores concordam em parte com o aumento do potencial eólico. Ruffato-Ferreira et al. (2017) encontraram um aumento no potencial eólico no Nordeste com cenário favorável para produção de energia eólica. De Jong et al. (2019) destacaram o aumento de 33% do potencial eólico para o Maranhão e de 19% para Bahia; e Lucena et al. (2010) sugeriram um possível aumento do potencial eólico para todo o País. Todavia, Pereira et al. (2013) relataram uma redução da capacidade eólica para a Bahia. Por fim, Ruffato-Ferreira et al. (2017) e Pereira et al. (2013) encontraram um aumento no potencial eólico para a região Sul – resultado que diverge do observado por Pereira et al. (2013), os quais destacaram que a elevação na densidade eólica acontecerá de forma moderada, comparada à região Nordeste.

Tabela 6. Modelos climáticos utilizados para estudar o potencial eólico diante das mudanças climáticas em algumas regiões nos continentes africano e asiático.

| Autor(es) | Modelo | Local |
|--------------------------------------|--|-----------------------------|
| Costoya et al. (2021) | Conjunto multimodelo de simulações CORDEX-East Asia | China |
| Wu et al. (2021) | HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR e NorESM1-M | China |
| Zhang & Li (2021) | ACCESS-CM2, BCC-CSM2-MR, CanESM5, CESM2, EC-Earth3, FGOALS-g3, INM-CM5-0, IPSL-CM6A-LR, MPI-ESM1-2-HR, MPI-ESM1-2-LR, MRI-ESM2-0, NorESM2-LM | China |
| Guo et al. (2020) | Precis | China |
| Gao et al. (2019) | CORDEX-EA | China |
| Matthew & Ohunakin (2017) | ICTP-RegCM3 | Nigéria |
| Chang et al. (2015) | ECHAM5, CM2.1 e CGCM2.3.2 | Estreito de Taiwan |
| Ratjiranukool & Ratjiranukool (2015) | Modelo PRECIS conduzido pelos modelos HadAM3P e ECHAM | Tailândia |
| Silang et al. (2014) | RegCM3 | Pililla e Rizal (Filipinas) |

Observa-se que a quantidade de trabalhos publicados a respeito do potencial eólico no continente africano é bem pequena. Além disso, no continente asiático, os trabalhos foram predominantemente realizados na China (Tabela 6).

Os resultados para o Estreito de Taiwan, apresentados por Chang et al. (2015) para os períodos de 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100, mostraram que, em 2011–2100, poderá haver uma redução da velocidade do vento e da densidade da energia eólica, tendo esse resultado sido observado em todos os modelos aplicados. Dos três modelos empregados, o CGCM2.3.2 apresentou a menor projeção para a velocidade dos ventos futuros. No geral, os resultados indicaram que o Estreito de Taiwan sofrerá um impacto no recurso eólico em razão das mudanças climáticas até o final do século XXI.

Ratjiranukool & Ratjiranukool (2015) simularam as condições dos ventos com base no modelo PRECIS, conduzido pelos modelos HadAM3P e ECHAM, para o período futuro de 2071–2100, utilizando os cenários de emissões A2 e B2. Os autores observaram mudanças positivas projetadas para a produção eólica na maior parte da Tailândia.

Gao et al. (2019), Guo et al. (2020), Costoya et al. (2021), Wu et al. (2021) e Zhang & Li (2021) projetaram as condições para energia eólica na China.

Zhang & Li (2021) investigaram os recursos eólicos para a China nos períodos 2041 a 2060 e 2081 a 2100 nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Segundo os autores, apesar de os resultados variarem nos diferentes modelos aplicados, as tendências positivas de velocidade dos ventos foram observadas nos cenários SSP2-4.5 e SSP5-8.5. Além disso, as projeções indicaram que a maior parte do Mar da China Oriental e do Mar da China Meridional sofrerá com uma redução em ambos os períodos e cenários aplicados. Por sua vez, Wu et al. (2021) realizaram projeções para a China utilizando modelos climáticos associados a RCP2.6, RCP4.5 e RCP8.5. No geral, os autores evidenciaram que os recursos de energia eólica diminuem nos períodos de 2046 a 2065 e 2080 a 2099, em relação a 1986 a 2005, sob todos os cenários, apesar de existirem algumas variações. Além disso, as projeções referentes às mudanças na energia eólica demonstraram aumento no sul da China, mas redução no noroeste e sudoeste do país.

Guo et al. (2020) projetaram aumento do potencial eólico no sudeste da China até metade do século XXI. A velocidade média dos ventos aumentará também no noroeste, nordeste e sul de

Guizhou, além de um pequeno aumento no oeste da China no início do século XXI. No cenário RCP4.5, projeta-se aumento nas regiões centrais da China, e sob o RCP8.5 a elevação da densidade eólica foi observada na região sudeste, principalmente no leste de Sichuan. Os autores também projetaram a redução da velocidade dos ventos em boa parte da China, com destaque para as montanhas de Tianshan, o sudeste do Platô do Tibete e a maior parte de Yuann para metade do final do século XXI no RCP4.5. Sob o RCP8.5, a redução foi projetada para o sudeste do Tibete, e para o oeste, noroeste e centro da Mongólia no final do século XXI.

Por sua vez, Gao et al. (2019), para o período de 2040–2049, projetaram uma diminuição do potencial de energia eólica no Platô do Tibete, no Corredor Hexi, no interior da Mongólia e em parte de três províncias do nordeste chinês no RCP4.5 e RCP8.5. No RCP4.5 e no RCP8.5, perceberam-se pequenas reduções do recurso eólico para áreas na China; todavia, há exceções: no RCP8.5, no verão, em que se identificou aumento do fator de capacidade eólico para boa parte da China, e no RCP4.5, em que houve um leve aumento para o sudeste (Bacia Sichuan).

Silang et al. (2014) utilizaram o RegCM3 e compararam o período de 2008–2012 com o de 2013–2037 para Pililla, na província Rizal, nas Filipinas. Os autores indicaram o aumento da densidade eólica e do fator de capacidade para o período 2013–2037.

Guo et al. (2020) e Gao et al. (2019) encontraram resultados semelhantes para a Bacia de Sichuan, Platô do Tibete e Mongólia. Guo et al. (2020) projetaram aumento do potencial eólico para leste de Sichuan, e Gao et al. (2019), para sudeste da mesma área. Com relação ao Platô do Tibete, ambos os autores concordam com a redução do potencial eólico e, para Mongólia, Guo et al. (2020) observaram redução para o oeste, noroeste e centro, e Gao et al. (2019), para o interior.

Os resultados apresentados por Chang et al. (2015) para os períodos de 2011–2040, 2041–2070 e 2071–2100 apontaram que a velocidade do vento apresentará um decréscimo nas áreas marítimas próximas à costa sudoeste de Taiwan e que, à medida que a distância da costa diminui, a velocidade do vento também se reduz. Comparados esses períodos com o período passado de 1981–2000, a velocidade média dos ventos sofrerá uma diminuição, assim como a densidade eólica, a qual sofrerá redução de 3%. A menor densidade eólica foi projetada pelo modelo CGCM2.3.2 para os três períodos climáticos futuros. No geral, os resultados indicaram que o Estreito de Taiwan sofrerá um pequeno impacto no recurso eólico em virtude das mudanças climáticas até o final do século XXI.

Matthew & Ohunakin (2017) investigaram o potencial eólico na Nigéria. Os resultados de Matthew & Ohunakin (2017) para o período de 2031–2050 apontaram um aumento da velocidade do vento na estação chuvosa (maio a julho), todavia, a estação seca (outubro a janeiro) apresentou um declínio. Os resultados ainda indicaram que a região Sul, nos meses de fevereiro e março, passará por mudanças negativas para a energia eólica, ao contrário do que foi projetado para a região Norte, que apresentou cenário positivo.

CONCLUSÃO

Esta revisão sistemática auxilia as projeções de como as mudanças climáticas impactarão a produção energética eólica no futuro. Nota-se que a maioria dos estudos foram realizados no continente europeu (20 artigos) ou no continente americano (13 artigos). Dos 44 trabalhos estudados nesta revisão, apenas 11 discutiram os impactos que as mudanças climáticas poderão gerar no potencial eólico nos continentes africano e asiático. Desses artigos, 5 estudaram apenas a China.

Depreende-se que as alterações climáticas futuras causarão mudanças no potencial eólico, e essas alterações podem apresentar impactos significativos em boa parte do planeta. Todavia, ressalta-se que, de acordo com os dados observados nos estudos, o potencial da produção de energia eólica poderá ser afetado negativa ou positivamente, a depender da região e também do cenário climático empregado.

Aponta-se que a utilização de modelos climáticos distintos pode gerar resultados diferentes para uma mesma região estudada. Sendo assim, é importante levar em consideração os resultados de diferentes modelos climáticos globais e regionais e, com isso, diminuir as incertezas geradas e atribuir uma maior confiabilidade aos resultados obtidos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), projeto 308753/2021-6 e bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00.

REFERÊNCIAS

- ANGELES, M.E.; GONZÁLEZ, J.E.; ERICKSON III, D.J.; HERNÁNDEZ, J.L. The impacts of climate changes on the renewable energy resources in the Caribbean region. **Journal of Solar Energy Engineering**, v.132, art.031009, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4001475>.
- BARSTAD, I.; SORTEBERG, A.; MESQUITA, M. dos S. Present and future offshore wind power potential in northern Europe based on downscaled global climate runs with adjusted SST and sea ice cover. **Renewable Energy**, v.44, p.398-405, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.02.008>.
- BARTÓK, B.; WILD, M.; FOLINI, D.; LÜTHI, D.; KOTLARSKI, S.; SCHÄR, C.; VAUTARD, R.; JEREZ, S.; IMECS, Z. Projected changes in surface solar radiation in CMIP5 global climate models and in EURO-CORDEX regional climate models for Europe. **Climate Dynamics**, v.49, p.2665-2683, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-016-3471-2>.
- BOGARDI, I.; MATYASOVZKY, I. Estimating daily wind speed under climate change. **Solar Energy**, v.57, p.239-248, 1996. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0038-092X\(96\)00076-X](https://doi.org/10.1016/S0038-092X(96)00076-X).
- BURNETT, D.; BARBOUR, E.; HARRISON, G.P. The UK solar energy resource and the impact of climate change. **Renewable Energy**, v.71, p.333-343, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.034>.
- CHANG, T.-J.; CHEN, C.-L.; TU, Y.-L.; YEH, H.-T.; WU, Y.-T. Evaluation of the climate change impact on wind resources in Taiwan Strait. **Energy Conversion and Management**, v.95, p.435-445, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2015.02.033>.
- CHEN, L. Impacts of climate change on wind resources over North America based on NA-CORDEX. **Renewable Energy**, v.153, p.1428-1438, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.02.090>.
- CLARIVATE ANALYTICS. **Web of Science**. Disponível em: <<https://www.webofscience.com/>>. Acesso em: 20 dez. 2022.
- COSTOYA, X.; DECASTRO, M.; CARVALHO, D.; FENG, Z.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. Climate change impacts on the future offshore wind energy resource in China. **Renewable Energy**, v.175, p.731-747, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2021.05.001>.
- COSTOYA, X.; DECASTRO, M.; CARVALHO, D.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. On the suitability of offshore wind energy resource in the United States of America for the 21st century. **Applied Energy**, v.262, art.114537, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114537>.
- COSTOYA, X.; DECASTRO, M.; SANTOS, F.; SOUSA, M.C.; GÓMEZ-GESTEIRA, M. Projections of wind energy resources in the Caribbean for the 21st century. **Energy**, v.178, p.356-367, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.04.121>.
- DAVY, R.; GNATIUK, N.; PETERSSON, L.; BOBYLEV, L. Climate change impacts on wind energy potential in the European domain with a focus on the Black Sea. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.81, part 2, p.1652-1659, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.253>.
- de JONG, P.; BARRETO, T.B.; TANAJURA, C.A.S.; KOULOUKOU, D.; OLIVEIRA-ESQUERRE, K.P.; KIPERSTOK, A.; TORRES, E.A. Estimating the impact of climate change on wind and solar energy in Brazil using a South American regional climate model. **Renewable Energy**, v.141, p.390-401, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.03.086>.
- ELSEVIER. **Science Direct**. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/>>. Acesso em: 20 dez. 2022.
- FANT, C.; SCHLOSSER, C.A.; STRZEPEK, K. The impact of climate change on wind and solar resources in southern Africa. **Applied Energy**, v.161, p.556-564, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2015.03.042>.
- GAO, Y.; MA, S.; WANG, T. The impact of climate change on wind power abundance and variability in China. **Energy**, v.189, art.116215, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2019.116215>.
- GONÇALVES-AGEITOS, M.; BARRERA-ESCODA, A.; BALDASANO, J.M.; CUNILLERA, J. Modelling wind resources in climate change scenarios in complex terrains. **Renewable Energy**, v.76, p.670-678, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.11.066>.

- GONZÁLEZ, A.; PÉREZ, J.C.; DÍAZ, J.P.; EXPÓSITO, F.J. Future projections of wind resource in a mountainous archipelago, Canary Islands. **Renewable Energy**, v.104, p.120-128, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.12.021>.
- GUO, J.; HUANG, G.; WANG, X.; XU, Y.; LI, Y. Projected changes in wind speed and its energy potential in China using a high-resolution regional climate model. **Wind Energy**, v.23, p.471-485, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.2417>.
- HDIDOUAN, D.; STAFFELL, I. The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. **Renewable Energy**, v.101, p.575-592, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.09.003>.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2014.
- JIA, G.; SHEVLIKOVA, E.; ARTAXO, P.; DE NOBLET-DUCOUDRÉ, N.; HOUGHTON, R.; HOUSE, J.; KITAJIMA, K.; LENNARD, C.; POPP, A.; SIRIN, A.; SUKUMAR, R.; VERCHOT, L. Land-climate interactions. In: SHUKLA, P.R.; SKEA, J.; CALVO BUENDÍA, E.; MASSON-DELMOTTE, V.; PÖRTNER, H.-O.; ROBERTS, D.C.; ZHAI, P.; SLADE, R.; CONNORS, S.; VAN DIEMEN, R.; FERRAT, M.; HAUGHEY, E.; LUZ, S.; NEOGI, S.; PATHAK, M.; PETZOLD, J.; PEREIRA, J.P.; VYAS, P.; HUNTLEY, E.; KISSICK, K.; BELKACEMI, M.; MALLEY, J. (Ed.). **Climate change and land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems**. 2019. Disponível em: <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/sites/4/2022/11/SRCCL_Chapter_2.pdf>. Acesso em: 20 dez. 2022.
- JOHNSON, D.L.; ERHARDT, R.J. Projected impacts of climate change on wind energy density in the United States. **Renewable Energy**, v.85, p.66-73, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2015.06.005>.
- KOLETSIS, I.; KOTRONI, V.; LAGOUVARDOS, K.; SOUKISSIAN, T. Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Sea under future climate changes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.60, p.234-245, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.01.080>.
- LIRA-LOARCA, A.; FERRARI, F.; MAZZINO, A.; BESIO, G. Future wind and wave energy resources and exploitability in the Mediterranean Sea by 2100. **Applied Energy**, v.302, art.117492, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.117492>.
- LIZUMA, L.; AVOTNIECE, Z.; RUPAINIS, S.; TEILANS, A. Assessment of the present and future offshore wind power potential: a case study in a target territory of the Baltic Sea near the Latvian Coast. **The Scientific World Journal**, v.2013, art.126428, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/126428>.
- LUCENA, A.F.P. de; SCHAEFFER, R.; SZKLO, A.S. Least-cost adaptation options for global climate change impacts on the Brazilian electric power system. **Global Environmental Change**, v.20, p.342-350, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2010.01.004>.
- MARENGO, J.A.; BERNASCONI, M. Regional differences in aridity/drought conditions over Northeast Brazil: present state and future projections. **Climatic Change**, v.129, p.103-115, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10584-014-1310-1>.
- MATTHEW, O.J.; OHUNAKIN, O.S. Simulating the effects of climate change and afforestation on wind power potential in Nigeria. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v.22, p.41-54, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/J.SETA.2017.05.009>.
- MOEMKEN, J.; REYERS, M.; FELDMANN, H.; PINTO, J.G. Future changes of wind speed and wind energy potentials in EURO-CORDEX ensemble simulations. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v.123, p.6373-6389, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1029/2018JD028473>.
- MONFORTI, F.; GAETANI, M.; VIGNATI, E. How synchronous is wind energy production among European countries? **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.59, p.1622-1638, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2015.12.318>.
- NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. **The First Climate Model**. [2017]. Disponível em: <http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/>. Acesso em: 11 out. 2020.
- PAŠIČKO, R.; BRANKOVIĆ, Č.; ŠIMIĆ, Z. Assessment of climate change impacts on energy generation from renewable sources in Croatia. **Renewable Energy**, v.46, p.224-231, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.03.029>.
- PEREIRA, E.B.; MARTINS, F.R.; PES, M.P.; CRUZ SEGUNDO, E.I. da; LYRA, A. de A. The impacts of global climate changes on the wind power density in Brazil. **Renewable Energy**, v.49, p.107-110, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2012.01.053>.
- PRYOR, S.C.; BARTHELMIE, R.J.; KJELLSTRÖM, E. Potential climate change impact on wind energy resources in northern Europe: analyses using a regional climate model. **Climate Dynamics**, v.25, p.815-835, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1007/S00382-005-0072-X>.
- PRYOR, S.C.; BARTHELMIE, R.J.; SCHOOF, J.T. Inter-annual variability of wind indices across Europe. **Wind Energy**, v.9, p.27-38, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1002/we.178>.
- QUEIROZ, A.R. de; LIMA, L.M.M.; LIMA, J.W.M.; SILVA, B.C. da; SCIANNI, L.A. Climate change impacts in the energy supply of the Brazilian hydro-dominant power system. **Renewable Energy**, v.99, p.379-389, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2016.07.022>.
- RATJIRANUKOOL, S.; RATJIRANUKOOL, P. Wind speed projections for electricity application over Thailand. **Energy Procedia**, v.79, p.423-429, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.513>.

- RAVESTEIN, P.; van der SCHRIER, G.; HAARSMA, R.; SCHEELE, R.; van den BROEK, M. Vulnerability of European intermittent renewable energy supply to climate change and climate variability. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.97, p.497-508, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.08.057>.
- REVIEW of targets for the sustainable development goals: the science perspective. **Journal of Education for Sustainable Development**, v.9, p.237-237, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1177/0973408215600602h>.
- RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R. da C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, W.L.; VIANA, D. de B.; NASCIMENTO, J.A.S. de; FREITAS, M.A.V. de. A foundation for the strategic long-term planning of the renewable energy sector in Brazil: hydroelectricity and wind energy in the face of climate change scenarios. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.72, p.1124-1137, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.10.020>.
- RUSU, E. A 30-year projection of the future wind energy resources in the coastal environment of the Black Sea. **Renewable Energy**, v.139, p.228-234, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.02.082>.
- RUSU, E. An evaluation of the wind energy dynamics in the Baltic Sea, past and future projections. **Renewable Energy**, v.160, p.350-362, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.06.152>.
- SAILOR, D.J.; SMITH, M.; HART, M. Climate change implications for wind power resources in the Northwest United States. **Renewable Energy**, v.33, p.2393-2406, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2008.01.007>.
- SANTOS, F.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; DECASTRO, M.; AÑEL, J.A.; CARVALHO, D.; COSTOYA, X.; DIAS, J.M. On the accuracy of CORDEX RCMs to project future winds over the Iberian Peninsula and surrounding ocean. **Applied Energy**, v.228, p.289-300, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.06.086>.
- SANTOS, J.A.; ROCHINHA, C.; LIBERATO, M.L.R.; REYERS, M.; PINTO J.G. Projected changes in wind energy potentials over Iberia. **Renewable Energy**, v.75, p.68-80, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.09.026>.
- SAWADOGO, W.; REBOITA, M.S.; FAYE, A.; ROCHA, R.P. da; ODOULAMI, R.C.; OLUSEGUN, C.F.; ADENIYI, M.O.; ABIODUN, B.J.; SYLLA, M.B.; DIALLO, I.; COPPOLA, E.; GIORGI, F. Current and future potential of solar and wind energy over Africa using the RegCM4 CORDEX-CORE ensemble. **Climate Dynamics**, v.57, p.1647-1672, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00382-020-05377-1>.
- SCHLOTT, M.; KIES, A.; BROWN, T.; SCHRAMM, S.; GREINER, M. The impact of climate change on a cost-optimal highly renewable European electricity network. **Applied Energy**, v.230, p.1645-1659, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.09.084>.
- SILANG, A.; UY, S.N.; DADO, J.M.; CRUZ, F.A.; NARISMA, G.; LIBATIQUE, N.; TANGONAN, G. Wind energy projection for the Philippines based on climate change modeling. **Energy Procedia**, v.52, p.26-37, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2014.07.051>.
- SOARES, P.M.M.; LIMA, D.C.A.; CARDOSO, R.M.; NASCIMENTO, M.L.; SEMEDO, A. Western Iberian offshore wind resources: more or less in a global warming climate? **Applied Energy**, v.203, p.72-90, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2017.06.004>.
- SOLAUN, K.; CERDÁ, E. Impacts of climate change on wind energy power – four wind farms in Spain. **Renewable Energy**, v.145, p.1306-1316, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2019.06.129>.
- VIVIESCAS, C.; LIMA, L.; DIUANA, F.A.; VASQUEZ, E.; LUDOVIQUE, C.; SILVA, G.N.; HUBACK, V.; MAGALAR, L.; SZKLO, A.; LUCENA, A.F.P.; SCHAEFFER, R.; PAREDES, J.R. Contribution of variable renewable energy to increase energy security in Latin America: complementarity and climate change impacts on wind and solar resources. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v.113, art.109232, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2019.06.039>.
- WACHSMUTH, J.; BLOHM, A.; GÖBLING-REISEMANN, S.; EICKEMEIER, T.; RUTH, M.; GASPER, R.; STÜHRMANN, S. How will renewable power generation be affected by climate change? The case of a metropolitan region in Northwest Germany. **Energy**, v.58, p.192-201, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.06.035>.
- WANG, M.; ULLRICH, P.; MILLSTEIN, D. The future of wind energy in California: future projections with the variable-resolution CESM. **Renewable Energy**, v.127, p.242-257, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.renene.2018.04.031>.
- WANG, S.; ZHU, J.; HUANG, G.; BAETZ, B.; CHENG, G.; ZENG, X.; WANG, X. Assessment of climate change impacts on energy capacity planning in Ontario, Canada using high-resolution regional climate model. **Journal of Cleaner Production**, v.274, art.123026, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123026>.
- WEBER, J.; GOTZENS, F.; WITTHAUT, D. Impact of strong climate change on the statistics of wind power generation in Europe. **Energy Procedia**, v.153, p.22-28, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2018.10.004>.
- WOO, S.; SINGH, G.P.; OH, J.-H.; LEE, K.-M. Projected changes in summer precipitation over East Asia with a high-resolution atmospheric general circulation model during 21st century. **International Journal of Climatology**, v.38, p.4610-4631, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1002/joc.5727>.
- WU, J.; HAN, Z.-Y.; YAN, Y.-P.; SUN, C.-Y.; XU, Y.; SHI, Y. Future changes in wind energy potential over China using RegCM4 under RCP emission scenarios. **Advances in Climate Change Research**, v.12, p.596-610, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2021.06.005>.

ZHANG, F.; WANG, C.; XI, G.; KONG, W.; JIN, S.; HU, J.; CHEN, X. Projection of global wind and solar resources over land in the 21st century. **Global Energy Interconnection**, v.1, p.443-451, 2018. DOI: <https://doi.org/10.14171/j.2096-5117.gei.2018.04.004>.

ZHANG, S.; LI, X. Future projections of offshore wind energy resources in China using CMIP6 simulations and a deep learning-based downscaling method. **Energy**, v.217, art.119321, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.119321>.
