

PROJEÇÕES DE MUDANÇAS NA VELOCIDADE DOS VENTOS SOBRE A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

PAULA ROSE DE ARAUJO SANTOS
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

LOUISE PEREIRA DA SILVA
UNIVERSIDADE FEDERAL DA PARAÍBA

SUSANE ETERNA LEITE MEDEIROS
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE FEIRA DE SANTANA

RAPHAEL ABRAHÃO

Introdução

A produção de energia eólica em todo o mundo tem registrado crescimento constante. Em 2021, alcançou um novo marco, atingindo uma capacidade global de 840 GW. Essa capacidade é capaz de suprir mais de 7% da demanda energética global, de acordo com informações da WWEA em 2022. O Brasil tem um papel significativo nesse aumento, principalmente, a região Nordeste do país. Segundo a Abeólica em 2022, a capacidade instalada de energia eólica foi de 25 GW no país. Para prever tendências futuras relacionadas às condições climáticas, utilizam-se modelos climáticos associados a cenários do clima.

Problema de Pesquisa e Objetivo

Tendo em vista as alterações climáticas e os impactos que podem causar, principalmente na região Nordeste, a qual possui um grande potencial eólico, este trabalho tem por objetivo projetar as condições futuras para a velocidade dos ventos a 10 m e 100 m, utilizando os modelos climáticos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de 1961-1990.

Fundamentação Teórica

De acordo com o NOAA (2017), os modelos climáticos globais são ferramentas que utilizam fórmulas matemáticas a fim de representar os processos químicos e físicos atmosféricos relacionando-os com os componentes do sistema climático. A velocidade do vento desempenha um papel fundamental na geração de energia eólica. As mudanças climáticas têm o potencial de modificar as propriedades dos ventos, o que, por sua vez, pode criar circunstâncias mais propícias ou desafiadoras para a produção de energia eólica no futuro (Carvalho et al., 2017; Solaun; Cerda, 2020).

Metodologia

As projeções foram derivadas de três modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES e CanESM2) e um modelo climático regional (Eta), todos obtidos a partir do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) na plataforma do Projeta (Chou et al., 2014a; Chou et al., 2014b; BRAZIL, 2016; Lyra et al., 2017). Foram utilizados os cenários RCP4.5 e RCP8.5, tomando-se o cenário RCP4.5 como o mais otimista entre esses dois e o RCP8.5 é considerado o mais pessimista dos cenários.

Análise dos Resultados

No geral, os resultados mostraram o provável aumento para a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m na região Nordeste sobretudo ao final do século XXI. As projeções derivadas dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 evidenciaram que o aumento das velocidades dos ventos a 10 m e a 100 m será mais intenso na área a oeste do estado do Maranhão. No caso do modelo Eta-BESM sob o RCP4.5, a elevação é maior em parte do estado da Bahia nos dois períodos futuros analisados, tanto para a velocidade dos ventos a 10 m quanto a 100 m.

Conclusão

A região Nordeste do Brasil tem um número expressivo de parques eólicos em operação e em construção. Segundo as projeções, pode ocorrer a redução da velocidade dos ventos a 100 m em áreas onde estão localizados alguns desses empreendimentos. É preciso deixar claro que a velocidade do vento não é o único parâmetro a ser observado para a produção eólica. Características da densidade eólica e a cobertura do solo, por exemplo, também são fatores importantes a serem observados, mas não foram o foco do presente estudo.

Referências Bibliográficas

ABEOLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. Annual Wind Energy Reported 2019. Disponível em: Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf. Acesso em: 26/08/2023. NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 11/10/2020. 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. WWEA - World Wind Energy Association, 2020. Disponível em: <https://wwindea.org/organisation/board/>.

Palavras Chave

Mudanças climáticas, RCP4.5, RCP8.5

Agradecimento a órgão de fomento

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), projeto 306783/2018-5 e bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00.

PROJEÇÕES DE MUDANÇAS NA VELOCIDADE DOS VENTOS SOBRE A REGIÃO NORDESTE DO BRASIL

Resumo

A matriz energética brasileira é majoritariamente composta pela geração de energia a partir de fontes renováveis e uma destas é a produção de eletricidade a partir dos ventos. A capacidade eólica do Brasil cresce anualmente e a região Nordeste tem um grande destaque. Por sua vez, sabe-se que as mudanças climáticas podem interferir nas características dos ventos e com isso causar impactos na geração eólica. Os modelos climáticos globais (GCM's) e regionais (RCM) projetam as condições climáticas futuras de inúmeros parâmetros climáticos, incluindo a velocidade dos ventos. O presente artigo teve como propósito projetar dados de velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m para a região Nordeste do Brasil empregando três modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES e CanESM2) e o modelo climático regional (Eta). Associados a estes utilizou-se os cenários RCP4.5 e RCP8.5 no período de 2041-2069 e 2070-2099 e como referência o período de 1961-1990. Os resultados indicaram que, no geral, a região Nordeste do Brasil terá um aumento futuro na velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m, sobretudo no cenário RCP8.5 e de forma mais intensa na área a oeste da região, o que pode ser um indicativo de um cenário mais favorável para a produção eólica nessa área.

Palavras-chave: Mudanças climáticas, RCP4.5, RCP8.5, projeções climáticas, parques eólicos, energia eólica.

Abstract

The Brazilian energy matrix is mainly composed of the generation of energy from renewable sources and one of these is the production of electricity from the winds. Brazil's wind capacity grows annually and the Northeast region has a great prominence. In turn, it is known that climate change can interfere with the characteristics of the winds and thereby cause impacts on wind generation. Global (GCM's) and regional (RCM) climate models project future weather conditions for numerous climate parameters, including wind speeds. The purpose of this article was to project wind speed data at 10 m and 100 m for the Northeast region of Brazil using three global climate models (BESM, HadGEM2-ES and CanESM2) and the regional climate model (Eta). Associated with these, the scenarios RCP4.5 and RCP8.5 were used in the period of 2041-2069 and 2070-2099 and as a reference the period of 1961-1990. The results indicated that, in general, the Northeast region of Brazil will have a future increase in wind speeds at 10 m and 100 m, especially in the RCP8.5 scenario and more intensely in the area to the west of the region, which can be a indicative of a more favorable scenario for wind production in this area.

Keywords: Climate change, RCP4.5, RCP8.5, climate projections, wind farms, wind energy.

1. Introdução

A produção eólica mundial vem crescendo anualmente, em 2021 a produção alcançou mais um recorde, com capacidade global de 840 GW. Essa capacidade é suficiente para fornecer mais de 7% da demanda energética do mundo (WWEA, 2022). O Brasil é um dos responsáveis por esse aumento, segundo a Abeolica (2022) a capacidade eólica instalada no país, em 2022, foi de 25 GW.

Sabendo que a produção eólica depende, entre outros aspectos, das condições dos ventos e preocupando-se com as alterações que as mudanças no clima podem causar à disponibilidade e às características destes (Lizuma *et al.*, 2013; Koletsis *et al.*, 2016) são utilizados os modelos climáticos globais e regionais, os quais buscam projetar possíveis condições climáticas futuras utilizando parâmetros de temperatura, precipitação, velocidade dos ventos, entre outros (Pašičko; Branković; Šimić, 2012; Queiroz *et al.*, 2016). De acordo com o NOAA (2017), os modelos climáticos globais são ferramentas que utilizam fórmulas matemáticas a fim de representar os processos químicos e físicos atmosféricos relacionando-os com os componentes do sistema climático.

Associados aos modelos são utilizados os cenários ou Caminhos Representativos de Concentração (RCP) dos relatórios do Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC). Os cenários não levam em consideração apenas a emissão e a concentração dos gases de efeito estufa na atmosfera, mas também ações de mitigação, características econômicas, sociais, populacionais, entre outros (Hdidouan; Staffell, 2017; Müller *et al.*, 2019).

A velocidade do vento é um dos fatores relevantes para a geração de energia eólica. Como as mudanças climáticas podem alterar as características dos ventos e, portanto, gerar condições mais favoráveis ou adversas para a produção eólica futura. Desta forma, alguns estudos preocuparam-se em projetar possíveis mudanças na velocidade dos ventos pelo mundo (Carvalho *et al.*, 2017; Solaun; Cerda, 2020).

Na Península Ibérica, por exemplo, Santos *et al.* (2015) e Santos *et al.* (2018) projetaram redução futura na velocidade e na potência dos ventos. No noroeste da Alemanha, as projeções de Wachsmuth *et al.* (2013) indicaram o aumento da velocidade dos ventos no inverno e uma redução para o verão até o final do século XXI.

Utilizando um conjunto com 12 modelos do NA-CORDEX, as projeções realizadas por Chen (2020) para a América do Norte verificaram a possível redução da produção eólica em parte do oeste e da costa leste dos Estados Unidos, mas aumento no Texas e Oklahoma (verão), nas Grandes Planícies (primavera) e nas Planícies do norte e centro-oeste (inverno e primavera).

Estudos realizados no Brasil destacaram o cenário favorável para a produção de energia a partir dos ventos (Ruffato-Ferreira *et al.*, 2017; De Jong *et al.*, 2019). Para a região Nordeste do país, além de Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) e do De Jong *et al.* (2019), De Jong *et al.* (2017) também projetaram o aumento potencial do recurso eólico na maior parte do ano, com exceção do outono.

Tendo em vista as alterações climáticas e os impactos que podem causar, principalmente na região Nordeste, a qual possui um grande potencial eólico, este trabalho tem por objetivo projetar as condições futuras para a velocidade dos ventos a 10 m e 100 m, utilizando os modelos climáticos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 para 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de 1961-1990.

2. Metodologia

2.1. Caracterização da área de estudo

O Nordeste do Brasil é banhado pelo Oceano Atlântico e localiza-se no extremo leste da América do Sul (Costa *et al.*, 2020). É a segunda maior região do país (Lima *et al.*, 2019) com uma área correspondente a aproximadamente 1.552.175,42 km² de extensão dividida em nove estados e população estimada em 57.667.842 pessoas em 2021 (IBGE, 2021).

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima da região Nordeste se divide em três tipos climáticos: clima tropical, clima semiárido e clima subtropical úmido (Alvares *et al.*, 2013). A região é conhecida por ser uma área de temperaturas elevadas, com resultados médios que variam de 20°C a 28°C e alta variabilidade espacial na precipitação (Lima *et al.*, 2019;

Costa *et al.*, 2020).

A região Nordeste se destaca pela produção eólica, com 558 empreendimentos em operação, o que corresponde a uma potência outorgada de 14.242.89,05 MW. O único estado a não ter nenhum parque eólico instalado é o de Alagoas (ANEEL, 2021).

2.2. Dados dos modelos climáticos

As projeções foram derivadas de três modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES e CanESM2) e um modelo climático regional (Eta), todos obtidos a partir do Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (CPTEC-INPE) na plataforma do Projeta (Chou *et al.*, 2014a; Chou *et al.*, 2014b; BRAZIL, 2016; Lyra *et al.*, 2017).

O BESM é o modelo brasileiro desenvolvido pelo INPE fundamentado na estrutura do modelo oceano-atmosfera do CPTEC (Veiga *et al.*, 2019), acoplado ao modelo oceânico MOM4 (*Modular Ocean Model 4*). Os seus processos da superfície terrestre são representados a partir do Modelo Simples da Biosfera (SSIB) (Chou *et al.*, 2014a).

O modelo HadGEM2-ES é a segunda versão do modelo da família HadGEM, o qual teve a adição da química troposférica, processos do ciclo do carbono, adição de componentes do gelo marinho, entre outros (Martin *et al.*, 2011).

A segunda geração do modelo canadense do sistema terrestre, CanESM2, consiste no modelo físico oceânico atmosférico (CanCM4), aninhado ao modelo de carbono terrestre (CTEM) e também a um modelo carbônico oceânico (CMOC) (Sospedra-Alfonso; Merryfield, 2017).

Por fim, no modelo regional Eta os processos de superfície terrestre são representados pelo modelo de superfície da terra Noah (Ek *et al.*, 2003), a microfísica das nuvens é baseada no esquema de Zhao *et al.* (1997), a radiação de ondas curtas é representada em Lacis e Hansen (1974), e a radiação de ondas longas em Fels e Schwarzkopf (1975).

Foram utilizados os cenários RCP4.5 e RCP8.5, tomando-se o cenário RCP4.5 como o mais otimista entre esses dois, onde medidas para mitigação da emissão e concentração dos gases de efeito de estufa serão tomadas e, com isso, a estabilização da forçante radioativa ficaria em 4,5 W/m². Dessa forma, a concentração de CO₂ se estabilizaria após 2100 em 650 ppm (Thomson *et al.*, 2011). O RCP8.5 é considerado o mais pessimista dos cenários, com um forçamento radioativo de 8,5 W/m² até o final do século XXI, tendo em vista as altas emissões, a ausência de medidas de mitigação das emissões, entre outros aspectos. Desta forma, a concentração de CO₂ ficaria acima de 1370 ppm e continuaria aumentando após 2100 (Riahi *et al.*, 2011).

As mudanças para a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m foram projetadas para os períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099 comparados ao período de referência de 1961-1990, por ser considerado uma normal climatológica de referência, em 3237 pontos os quais encontram-se a uma distância de aproximadamente 22,3 km um do outro, alcançando toda extensão da região Nordeste do Brasil.

A porcentagem das mudanças futuras foi estimada da seguinte forma:

$$\text{Mudança futura} = \frac{\text{Média futura} - \text{Média histórica}}{\text{Média Histórica}} * 100$$

3. Resultados e discussão

As projeções derivadas dos modelos climáticos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-

CanESM2 nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 para a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m podem ser observadas na Figura 1 e Figura 2. No geral, os resultados mostraram o provável aumento para a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m na região Nordeste sobretudo ao final do século XXI. As projeções derivadas dos modelos Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 evidenciaram que o aumento das velocidades dos ventos a 10 m e a 100 m será mais intenso na área a oeste do estado do Maranhão. No caso do modelo Eta-BESM sob o RCP4.5, a elevação é maior em parte do estado da Bahia nos dois períodos futuros analisados, tanto para a velocidade dos ventos a 10 m quanto a 100 m (Figura 1 e Figura 2).

Para os períodos de 2010-2040, 2041-2070 e 2071-2100, Ruffato-Ferreira *et al.* (2017) com o modelo Eta-HadGEM2-ES projetaram o aumento da velocidade do vento a 100 m para todo o Nordeste. De acordo com Eichelbergr *et al.* (2008) a velocidade dos ventos a 10 m aumentará futuramente na maior parte do planeta, incluindo partes do Nordeste do Brasil.

Apesar das projeções de aumento das velocidades dos ventos serem predominantes em algumas regiões, é possível observar possíveis diminuições. As reduções das velocidades dos ventos a 10 m e a 100 m foram notadas em todos os cenários com resultados mais intensos sob o RCP8.5 sobretudo em 2070-2099 nos modelos Eta- BESM e Eta-CanESM2. No caso do Eta-HadGEM2-ES, as projeções de redução ocorrerão de forma mais intensa sob o RCP4.5 (Figura 1 e Figura 2).

Os resultados evidenciaram diminuições em algumas áreas, principalmente nos estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba. Para esses estados, os resultados estão de acordo com o previsto por De Jong *et al.* (2019) no período de 2070-2099 sob o RCP8.5.

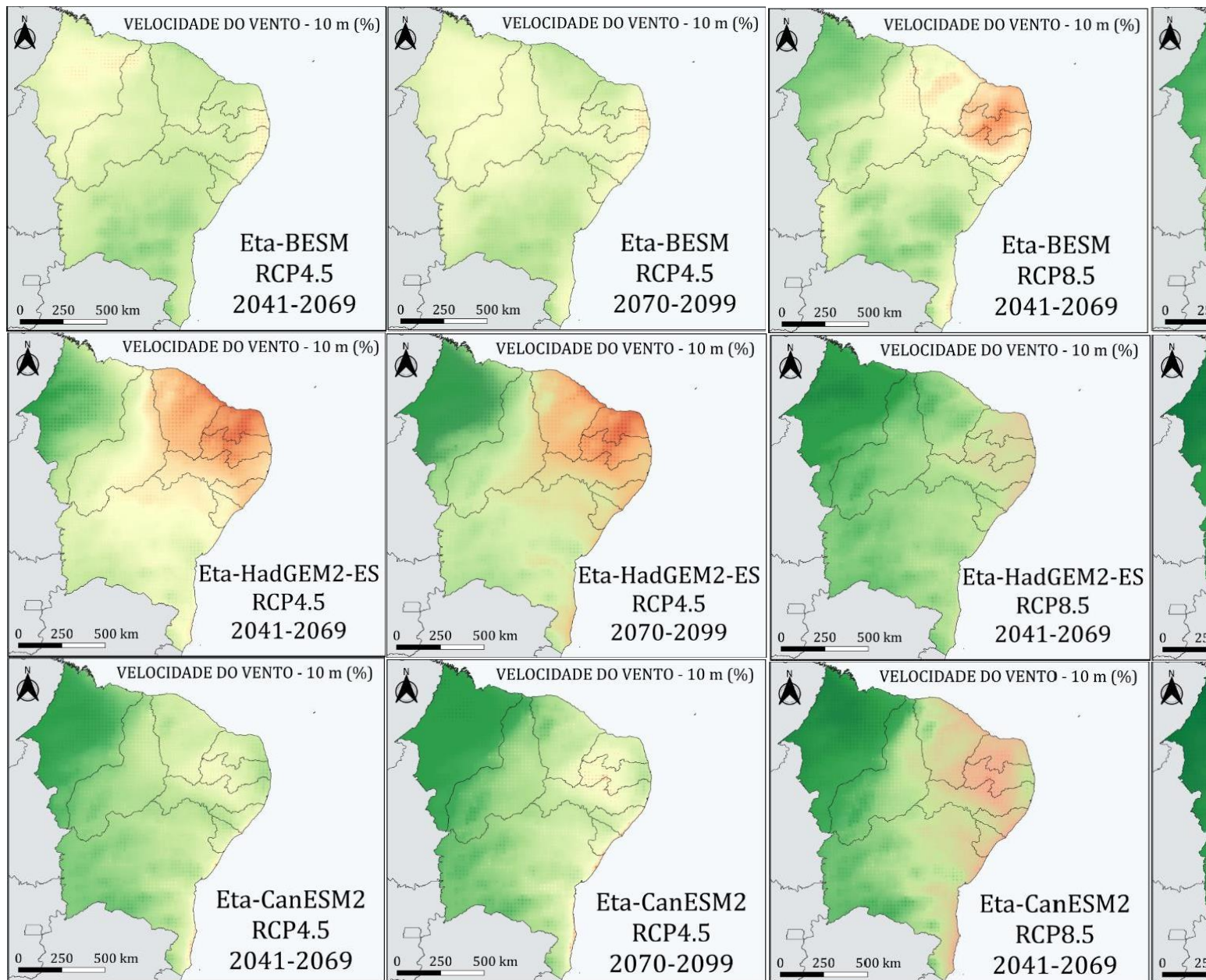


Figura 1: Anomalias projetadas para a velocidade dos ventos a 10 m nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

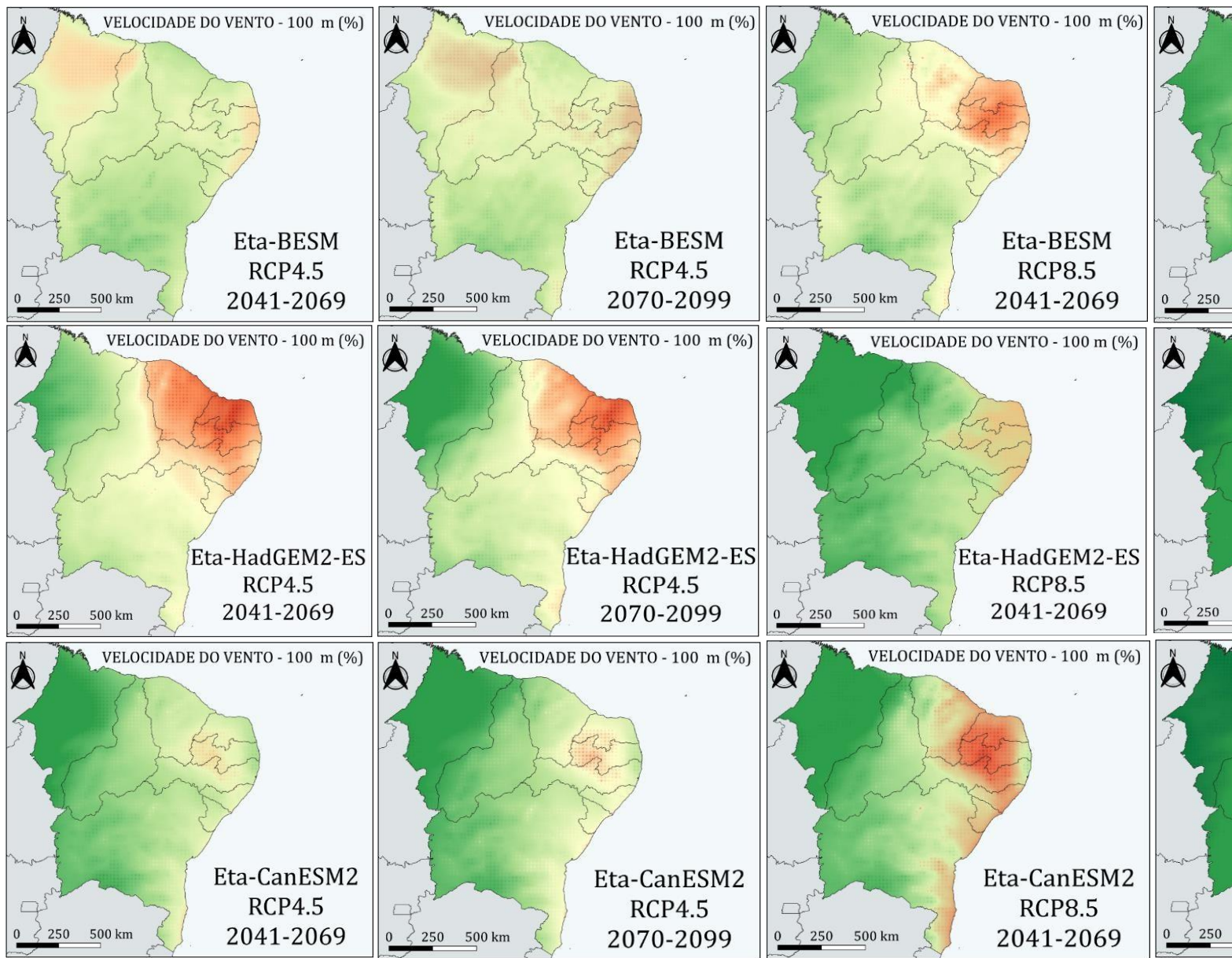


Figura 2: Anomalias projetadas para a velocidade dos ventos a 100 m nos cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2 na região Nordeste do Brasil.

Como pode ser observado na Figura 1 e Figura 2, há projeção de redução da velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m na costa nordestina em todos os modelos aplicados, principalmente sob o RCP8.5 no modelo Eta-CanESM2 para a velocidade dos ventos a 10 m. Entretanto, a partir do modelo HadCM3, Lucena, Schaeffer e Szklo (2010) projetaram aumento considerável da velocidade do vento nas regiões costeiras e no Nordeste do Brasil, sendo acima de 20% na maior parte do Nordeste em 2091-2100 e acima de 10% no período de 2071-2080 e 2081-2090 no cenário A2.

Para a costa do estado da Bahia, Pereira *et al.* (2013) projetaram redução da densidade eólica para os períodos de outono em 2070-2100. No presente estudo, previu-se que a costa baiana também poderá sofrer com reduções na velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m, principalmente no cenário mais pessimista, sobretudo em 2070-2099 no modelo Eta-CanESM2.

Tendo em vista observar a dispersão dos dados nos modelos climáticos empregados neste estudo, calculou-se o desvio padrão para a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m. De acordo com os resultados, o modelo Eta-BESM apresentou os menores valores de desvio padrão, o que indica que o conjunto de dados é mais uniforme, ou seja, são mais homogêneos (Tabela 1 e Tabela 2).

Tabela 1: Média e desvio padrão (DP) dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para a velocidade dos ventos a 10 m.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	2,4	1,7	1,7	3,4	5,3	3,5
RCP4.5 (70-99)	1,9	1,4	3,3	4,3	6,4	5,4
RCP8.5 (41-69)	2,7	2,6	7,4	5,8	6,4	7,0
RCP8.5 (70-99)	4,5	4,7	11,1	9,9	12,3	13,0
Valores médios	2,9	2,6	5,9	5,8	7,6	7,2

Tabela 2: Média e desvio padrão (DP) dos modelos Eta-BESM, Eta-HadGEM2-ES e Eta-CanESM2, considerando os cenários RCP4.5 e RCP8.5 nos períodos de 2041-2069 e 2070-2099 para a velocidade dos ventos a 100 m.

	Eta-BESM		Eta-HadGEM2-ES		Eta-CanESM2	
	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)	Média (%)	DP (%)
RCP4.5 (41-69)	2,5	1,9	1,8	3,7	5,5	3,8
RCP4.5 (70-99)	1,9	1,6	3,3	4,5	6,3	5,1
RCP8.5 (41-69)	2,4	2,8	7,5	5,8	6,5	7,1
RCP8.5 (70-99)	4,2	5,0	11,2	10,0	12,8	12,5
Valores médios	2,7	2,8	5,9	6,0	7,7	7,1

A capacidade eólica instalada na região Nordeste é de 19.678979,14 kW e são 718 parques eólicos em operação (ANEEL, 2022). Segundo os dados do Boletim Anual de Geração da Abeeolica (2022), 120,51% da energia consumida no subsistema da região Nordeste veio da energia eólica. Além disso, o subsistema do Nordeste representa 90,3% da geração eólica do total em 2020 (ABEEOLICA, 2022). Esses dados refletem o potencial para produção eólica do Nordeste do Brasil.

Observando a Figura 3 percebe-se que os parques eólicos em operação do estado do Rio Grande do Norte estão em sua maioria localizados perto da costa, a qual poderá ser afetada pela redução da velocidade dos ventos de acordo com as projeções realizadas nos três modelos aplicados no presente estudo (Figura 2).

Para o modelo Eta-CanESM2 no cenário mais pessimista observa-se redução mais acentuada da velocidade dos ventos a 100 m em alguns pontos na região Nordeste, principalmente nos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Essas áreas de diminuição poderão alcançar os municípios de São José de Sabugi, Santa Luzia e Natuba (estado da Paraíba) e os municípios de Tenente Lourentino Cruz, Lagoa Nova, Santana do Matos, Bodó e Cerro Cará (estado do Rio Grande do Norte) os quais têm empreendimentos eólicos em operação e também áreas onde há parques em construção em ambos os estados (Figura 3).

As projeções para os estados do Ceará, Pernambuco, Paraíba e Sergipe também evidenciaram possíveis reduções principalmente sob o RCP8.5 no Eta-BESM e no cenário RCP4.5 no Eta-HadGEM2-ES sobretudo em 2041-2069 e no modelo Eta-CanESM2 no cenário mais pessimista nas regiões onde estão presentes os parques eólicos (Figura 2 e Figura 3).

Tendo em vista o observado na Figura 3, no município de Barra de Coqueiros, onde está situado o único empreendimento eólico do estado de Sergipe (próximo à costa) apresentou variabilidade na velocidade dos ventos a 100 m com cenários de aumento ou redução a depender do cenário e modelo empregado.

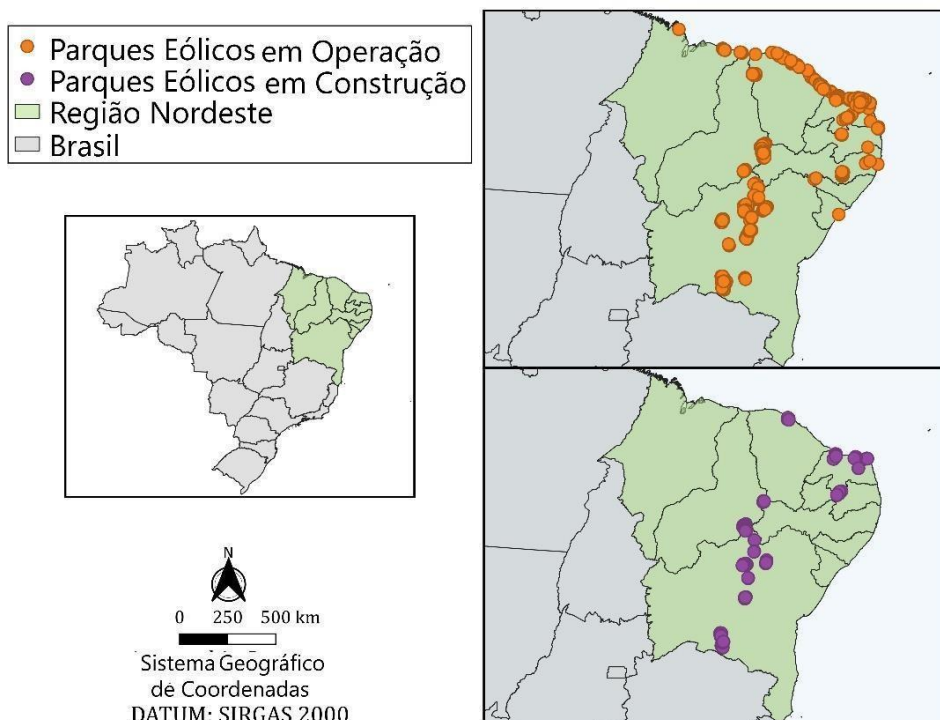


Figura 3: Mapa de localização dos empreendimentos eólicos da Região Nordeste do Brasil. Adaptado de IBGE (2017); ANEEL (2020).

O estado do Maranhão, segundo a Aneel (2022), tem 16 empreendimentos eólicos em

operação com potência instalada de 426.022,50 kW que estão localizados nos municípios de Barreirinhas, Paulino Neves e Cururupu. Conforme os resultados projetados no presente trabalho, todos os modelos evidenciaram o aumento da velocidade dos ventos a 100 m para estas áreas, principalmente para o final do século XXI sob o RCP8.5. Resultados positivos para as condições do vento no estado do Maranhão, incluindo a parte norte, onde estão os empreendimentos eólicos, também foram previstos por Lucena, Schaeffer e Szklo (2010).

Os parques em construção no estado do Piauí estão localizados em áreas onde as projeções indicaram aumento da velocidade dos ventos a 100 m em todos os modelos aplicados, com exceção do Eta-BESM e do Eta-HadGEM2-ES em alguns pontos sob o cenário mais otimista. Os resultados apresentados por Zhang *et al.* (2018) sugeriram um cenário eólico favorável em várias regiões pelo mundo no século XXI, incluindo o Nordeste do Brasil sob o RCP2.6, não estudado aqui, e o RCP8.5.

Apesar das projeções de redução em alguns pontos para o Nordeste, o aumento da velocidade dos ventos a 100 m ainda é predominante. Segundo as projeções de Reboita, Amaro e Souza (2018), a partir do RegCM4 sob o RCP8.5, em 2020-2050 e 2070-2098, algumas regiões da América do Sul, incluindo o Nordeste do Brasil, são locais promissores para a instalação de parques eólicos. Segundo os autores, o aumento da potência da densidade dos ventos a 100 m crescerá em torno de 40% em 2070-2098. Durante o outono essa elevação pode chegar a 100% no leste da região Nordeste do Brasil (Reboita; Amaro; Souza, 2018).

Projeções realizadas em outras áreas pelo mundo também demonstraram que as mudanças climáticas influenciarão na velocidade dos ventos. Os resultados projetados por Solaun e Cerda (2020) para quatro parques eólicos na Espanha nos períodos de 2018-2041 e 2042-2065 sugeriram uma redução na velocidade dos ventos e na produção eólica no parque eólico de *Cuadramón* (localizado na Galícia) e no parque eólico de *Rubió* (localizado na Catalunha). Por sua vez, os resultados para o parque eólico de *Río Almodóvar* (localizado em Andaluzia) indicaram possível aumento da velocidade dos ventos e da produção eólica. Por fim, segundo os autores ocorrerá uma variabilidade a depender do cenário futuro empregado no parque eólico de *El Pérdon* (localizado em Navarre). Projeções realizadas por Wang, Ullrich e Millstein (2018), em cinco parques eólicos na Califórnia-EUA, indicaram o possível aumento do recurso eólico no verão e diminuição no inverno e outono sob o RCP8.5. Segundo os autores, a produção anual diminuirá em todos os locais, exceto em *Altamont Pass*.

Portanto, diante do crescente uso da energia gerada por fontes renováveis, como a eólica, e da influência que as condições climáticas podem ter sobre o potencial de geração, o monitoramento e medidas de mitigação frente às suas mudanças se fazem relevantes. E as projeções climáticas podem nortear e otimizar as tomadas de decisões em relação aos investimentos em construção de novos parques.

4. Conclusão

O presente trabalho empregou um conjunto com três modelos climáticos globais (BESM, HadGEM2-ES, CanESM2) associados ao modelo climático regional Eta a fim de prever o cenário climático da velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m nos períodos futuros de 2041-2069 e 2070-2099, comparando-os com o período de referência de 1961-1990 e levando em consideração os cenários RCP4.5 e RCP8.5.

Os resultados apresentados sugeriram que nos cenários futuros a velocidade dos ventos a 10 m e a 100 m na região Nordeste aumentarão, principalmente sob o RCP8.5 ao final do século XXI. Comparando os dados obtidos nos modelos utilizados, o Eta- HadGEM2-ES e o Eta-CanEM2 apresentaram as médias mais expressivas de elevação, para todo Nordeste, sendo acima de 12% neste e 11% naquele para o final do século XXI sob o cenário mais pessimista. No caso do Eta-BESM, essa

média de aumento foi inferior a 5%.

Apesar de prevalecer projeções de que a velocidade dos ventos aumentará no Nordeste do Brasil, algumas localidades poderão sofrer com a redução, principalmente nos estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte, além de parte da costa nordestina em alguns cenários e modelos.

A região Nordeste do Brasil tem um número expressivo de parques eólicos em operação e em construção. Segundo as projeções, pode ocorrer a redução da velocidade dos ventos a 100 m em áreas onde estão localizados alguns desses empreendimentos. É preciso deixar claro que a velocidade do vento não é o único parâmetro a ser observado para a produção eólica. Características da densidade eólica e a cobertura do solo, por exemplo, também são fatores importantes a serem observados, mas não foram o foco do presente estudo.

Agradecimentos

Os autores agradecem o apoio do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), projeto 306783/2018-5 e bolsas 142451/2018-5 e 481593/2020-00.

Referências

ABEEOLICA - Associação Brasileira de Energia Eólica. Annual Wind Energy Reported 2019. Disponível em: Boletim-de-Geracao-Eolica-2022.pdf. Acesso em: 26/08/2023.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L DE. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.

ANEEL. Agência Nacional de Energia Elétrica, 2020. Disponível em: <https://www.aneel.gov.br/signa>. Acesso em: 02/10/2020.

BESM. Brazilian Earth System Model. Disponível em: <http://www.inpe.br/BESM/>. Acesso em: 26/05/2022.

BRAZIL. Third National Communication of Brazil to the United Nations Framework Convention on Climate Change – Executive Summary. Ministry of Science, Technology and Innovation Secretariat of Policies and Programs of Research and Development General Coordination of Global Climate Change. Brasília, 2016.

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.

CARVALHO, D.; ROCHA, A.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; SANTOS, C. S. Potential impacts of climate change on European wind energy resource under the CMIP5 future climate projections. **Renewable Energy**, v. 101, p. 29-40, 2017.

CHEN, L. Impacts of climate change on wind resources over North America based on NA-CORDEX. **Renewable Energy**, v. 153, p. 1428-1438, 2020.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DERECZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; NOBRE, P.; MARENGO, J. Evaluation

of the Eta Simulations Nested in Three Global Climate Models. **American Journal of Climate Change**, 3, 438-454, 2014a. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52887#.VakHg_IViko. Acesso em: 27/08/2020.

CHOU, S.C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C. Assessment of Climate Change over South America under RCP 4.5 and 8.5 Downscaling Scenarios. **American Journal of Climate Change**, 3, 512-527, 2014b. Disponível em: http://www.scirp.org/journal/PaperInformation.aspx?PaperID=52877#.VakIh_IVikp. Acesso em: 07/08/2020.

COSTA, R. L.; BAPTISTA, G. M DE. M.; GOMES, H. B.; SILVA, F. D DOS. S.; ROCHA JÚNIOR, R.; L DA.; SALVADOR, M DE. A.; HERDIES, D. L. Analysis of climate extremes indices over northeast Brazil from 1961 to 2014. **Weather and Climate Extremes**, v. 28, 2020.

DE JONG, P.; DARGAVILLE, R.; SILVER, J.; UTEMBE, S.; KIPERSTOK, A.; TORRES, A. T. Forecasting high proportions of wind energy supplying the Brazilian Northeast power system. **Applied Energy**, v. 195, p. 538–555, 2017.

DE JONG, P.; BARRETO, T. B.; TANAJURA, C. A. S.; KOULOUKOU, D.; ESQUERRE-OLIVEIRA, 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.

EICHELBERGER, S.; MCCA, J.; NIJESSEN, B.; WOOD, A. W. Climate Change Effects on Wind Speed. **North American Windpower**, n. January, p. 4, 2008.

EK, M.; MITCHELL, K.E.; LIN, Y.; ROGERS, E.; GRUNMANN, P.; KOREN, V.; GAYNO, G; TARPLEY, J.D. Implementation of Noah Land Surface Model Advances in the National Centers for Environmental Prediction Operational Mesoscale Eta Model. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, p. 8851, 2003.

FELS, S.B.; SCHWARZKOPF, M.D. The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 32, p. 1475-1488, 1975.

HDIDOUAN, D.; STAFFELL, I. The impact of climate change on the levelised cost of wind energy. **Renewable Energy**, v. 101, n. June, p. 575–592, 2017.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2017. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 28/05/2022.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Cidades e Estados, 2021. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/pi.html> Acesso em: 27/05/2021.

KOLETSIS, I.; KOTRONI, V.; LAGOUVARDOS, K.; SOUKISSIAN, T. Assessment of offshore wind speed and power potential over the Mediterranean and the Black Seas under future climate changes. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 234–245, 2016.

LACIS A.A.; HANSEN, J. A Parameterization for the Absorption of Solar Radiation in the Earth's Atmosphere. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 31, p. 118-133, 1974.

LIMA, F. J. L DE.; MARTINS, F. R.; COSTA, R. S.; GONÇALVES, A. R.; SANTOS, A. P. P DOS.; PEREIRA, E. B. The seasonal variability and trends for the surface solar irradiation in northeastern region of Brazil. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, v. 35, n. August, p. 335–346, 2019.

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, p. 1– 10, 2013.

LUCENA, A. F. P DE, SCHAEFFER, R.; SZKLO, A. S.; DUTRA, R. M. The vulnerability of renewable energy to climate change in Brazil. **Renewable Energy**, v. 35, n. 5, p. 904–912, 2010.

LYRA, A.; TAVARES, P.; CHOU, S. C.; SUEIRO, G.; DEREZYNSKI, C.; SONDERMANN, M.; SILVA, A.; MARENGO, J.; GIAROLLA, A. Climate change projections over three metropolitan regions in Southeast Brazil using the non- hydrostatic Eta regional climate model at 5-km resolution *Theor Appl Climatol*. 2017. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s00704-017-2067-z>. Acesso em: 29/07/2020.

MARTIN, G. M.; BELLOUIN, N.; COLLINS, W. J.; CULVERWELL, I. D.; HALLORAN, P. R.; HARDIMAN, S.C.; HINTON, T. J.; JONES, C. D.; MCDONALD, R.E; MCLAREN, A. J.; O'CONNOR, F. M.; ROBERTS, M. J.; RODRIGUEZ, J. M.; WOODWARD, S.; BEST, M. J.; BROOKS, M. E.; BROWN, A.; R.; BUTCHART, N.; DEARDEN, C.; DERBYSHIRE, S. H.; Dharssi, I.; DOUTRIAUX-BOUCHER, M.; EDWARDS, J. M.; FALLOON, P. D.; GEDNEY, N.; GRAY, L. J.; HEWITT, H. T.; HOBSON, M.; HUDDLESTON, M. R.; HUGHES, J.; INESON, S.; INGRAM, W. J.; JAMES, P. M.; JOHNS, T. C.; JOHNSON, C. E.; JONES, A.; JONES, C. P.; JOSHI, M. M.; KEEN, A. B.; LIDDICOAT, S.; LOCK, A. P.; MAIDENS, A. V.; MANNERS, J. C.; MILTON, S. F.; RAE, J. G.L.; RIDLEY, J. K.; SELLAR, A.; SENIOR, C. A.; TOTTERDELL, I. J.; VERHOEF, A.; VIDALE, P. L., WILTSHIRE, A. The HadGEM2 family of Met Office Unified Model climate configurations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 723–757, 2011.

MÜLLER, J.; FOLINI, D.; WILD, M.; PFENNINGER, S. CMIP-5 models project photovoltaics are a no-regrets investment in Europe irrespective of climate change. **Energy**, v. 171, p. 135–148, 2019.

NOAA. National Oceanic and Atmospheric Administration. The First Climate Model. 2017. Disponível em: http://celebrating200years.noaa.gov/breakthroughs/climate_model/. Acesso em: 11/10/2020.

NYASIMI, M. Review of Targets for the Sustainable Development Goals: The Science Perspective. **Journal of Education for Sustainable Development**, v. 9, n. 2, p. 237– 237, 2015.

PAŠIČKO, R.; BRANKOVIĆ, C.; ŠIMIĆ, Z. Assessment of climate change impacts on energy

generation from renewable sources in Croatia. **Renewable Energy**, v. 46, p. 224–231, 2012.

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.

QUEIROZ, A. R DE.; LIMA, L. M. M.; LIMA, J. W. M.; SILVA, B. C DE.; 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.

REBOITA, M. S.; AMARO, T. R.; SOUZA, M. R DE. Winds: intensity and power density simulated by RegCM4 over South America in present and future climate. **Climate Dynamics**, v. 51, n. 1–2, p. 187–205, 2018.

RIAHI, K.; RAO, S.; KREY, V.; CHO, C.; CHIRKOV, V.; FISCHER, G.; KINDERMANN, G.; NAKICENOVIC, N.; RAFAJ, P. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

RUFFATO-FERREIRA, V.; BARRETO, R DA. C.; OSCAR JÚNIOR, A.; SILVA, L. W.; VIANA, D DE. B.; NASCIMENTO, J. A S DO.; 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, n. October 2015, p. 1124–1137, 2017.

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, n. 2015, p. 68–80, 2015.

SANTOS, F.; GÓMEZ-GESTEIRA, M.; CASTRO, M DE.; 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.

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.

SOSPEDRA-ALFONSO, R.; MERRYFIELD, W. Influences of Temperature and Precipitation on Historical and Future Snowpack Variability over the Northern Hemisphere in the Second Generation Canadian Earth System Model. **Journal of Climate**, v. 30, p. 4633–4656, 2017. THOMSON, A. M.; CALVIN, K. V.; SMITH, S. J.; KYLE, G. P.; VOLKE, A.; PATEL, P.; DELGADO-ARIAS, S.; WISE, M. A.; CLARKE, L. E.; EDMONDS, J. A. RCP4.5: A pathway for stabilization of radiative forcing by 2100. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 77–94, 2011.

VEIGA, S. F.; NOBRE, P.; GIAROLLA, E.; CAPISTRANO, V.; BAPTISTA, M.; MARQUEZ, A. L.; NILO, F. S.; BONATTI, J. P.; KUBOTA, P.; NOBRE, C. A. The Brazilian Earth System Model ocean-atmosphere (BESM-OA) version 2.5: Evaluation of its CMIP5 historical simulation. **Geoscientific Model Development**, v. 12, n. 4, p. 1613–1642, 2019.

WACHSMUTH, J.; BLOHM, A.; GÖBLING-REISEMANN, s.; EICKEMEIER, T.;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.

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.

WWEA - World Wind Energy Association, 2020. Disponível em: <https://wwindea.org/organisation/board/>. Acesso em: 26/05/2022.

ZHANG, F.; WANG, C.; XIE, 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, n. 4, p. 443–451, 2018.

ZHAO, Q. BLACK, T.L.; BALDWIN, M.E. Implementation of the Cloud Prediction Scheme in the Eta Model at NCEP. **Weather and Forecasting**, v. 12, p. 697-712, 1997.